

# **Konzeption und Evaluation eines vierdimensionalen Rollführungssystems für Verkehrsflugzeuge**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Inform.** Carole Urvoy

aus St-Etienne, Frankreich

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. U. Klingauf

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Bruder

Tag der Einreichung: 11.11.2013

Tag der mündlichen Prüfung: 22.04.2014

D17

Darmstadt 2015



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf, dem Leiter des Instituts, für die Ermöglichung dieser Arbeit und die stetige Unterstützung bei der Erstellung. Für die freundliche Übernahme des Korreferats bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Ralf Bruder vom Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt.

Aufrichtig bedanken möchte ich mich bei allen Piloten, die in ihrer Freizeit an den Untersuchungen zu dieser Arbeit teilgenommen haben.

Mein Dank gilt außerdem den Verantwortlichen der Firma Atrics für Ihre Unterstützung.

Meinen Kollegen des Fachgebiets, insbesondere denen der Arbeitsgruppe CAVOK, mit denen ich die letzten Jahre zusammenarbeiten durfte, gilt mein besonderer Dank.

Für das gewissenhafte Korrekturlesen sowie die Unterstützung möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Winfried Deckelmann, meinem jetzigen Arbeitgeber, herzlich bedanken.

Vielen Dank meinem lieben Mann Muhammad Aslam Panezai für sein Geduld und ständige Unterstützung.

Darmstadt, 9. November 2013

Carole Urvoy

*Science sans conscience  
n'est que ruine de l'âme*  
Rabelais (1542)

# Kurzfassung

In der letzten Prognose zum Luftfahrtwachstum der Eurocontrol wird eine Erhöhung der Flugbewegungen bis 2030 zwischen 70% und 120% ermittelt. Dabei stellen die Flughäfen einen klaren Wachstumsdämpfer dar: die europäische Organisation erwartet, dass im Jahr 2030 ca. 11% der Nachfrage wegen zu geringer Kapazitäten an Flughäfen nicht erfüllt werden kann. In diesem Zusammenhang stellt die Optimierung des Bodenverkehrs eine der größten Herausforderungen für zukünftige Air Traffic Management Systeme dar.

Die angestrebte Optimierung und Neuordnung des Luftverkehrs auf beiden Seiten des Atlantiks beruht auf dem Einsatz von raum- und zeitfesten, vierdimensionalen Trajektorien. In den internationalen Vorhaben NextGen und SESAR ist die Einführung solcher 4DTrajektorien vom Abflug-Gate bis zum Ankunfts-Gate geplant (Gate-to-Gate Prozess), um den Flugverkehrsfluss in allen Phasen zu optimieren. Eine zentrale Frage ist hierbei wie man sicherstellt, dass die jeweiligen Akteure diese neue Planung so umsetzen, dass die erhofften Verbesserungen des Verkehrsflusses eintreten.

Ziel dieser Arbeit war, ein System zur Übermittlung der notwendigen 4D Information an die Cockpitbesatzung während der Rollphase eines Fluges zu konzipieren und zu validieren.

Ausgehend von einer Analyse des Stands der Forschung und Entwicklung wurde ein 4D-Rollführungssystem mittels einer dynamischen Anschaltung der Rollwegbefehrsselemente der Taxilinie vor dem Flugzeug entlang der Solltrajektorie konzipiert. Dieses System wurde in zwei Ausführungen entworfen: einem informativen Ansatz mit einer reinen Steuerung der Piloten entlang der Trajektorie und einem kooperativen Ansatz bei dem die Piloten in ihren Entscheidungen mithilfe eines Reglers unterstützt werden.

Das prototypisch entwickelte System wurde anschließend anhand einer zweistufigen Untersuchung evaluiert und validiert. Die erste Reihe von Untersuchungen diente der Identifikation der notwendigen Parameter für den Regler und wurde in Versuchen mit Copiloten durchgeführt. Die zweite Reihe von Untersuchungen erfolgte nach einem 2x3 zweifaktoriellen Versuchsplan mit Messwiederholungen und wurde in Versuchen mit 16 aktiven Kapitänen – die Zielgruppe für das System – realisiert. Hierbei war der erste Faktor das Vorwissen der Probanden über das System. Das zweite Faktor war die Art der zeitlichen Führung anhand der Rollwegbefehrsselemente: ohne Führung (Baseline), mit einer reinen Steuerung (informativer Ansatz) oder mit dem anhand der ersten Untersuchungen ermittelten Regler (kooperativer Ansatz).

Die vorgegebenen räumlichen und zeitlichen Trajektorien wurden durchwegs von den Piloten anhand beider Ausführungen des Systems – informativen Ansatz und kooperativen Ansatz – eingehalten. Die Abweichungen zur Sollposition an jedem gegebenen Zeitpunkt entlang der Rolltrajektorien blieben für alle Versuche zwischen +400 und -200 Metern.

Durch das konzipierte System, das bewusst die Risiken einer Vollautomatisierung durch den Einbezug des Piloten für die Ausführung der Rollaufgabe vermeidet, wird die Sicherheit des Flugzeugs und des Flughafens während der 4D-Rollphase nicht gefährdet. Hinzu wurden die zwei Sicherheitsfaktoren – Situationsbewusstsein und Beanspruchung – gezielt während der Versuche untersucht.

Um die Akzeptanz der Piloten für den möglichen Einsatz eines solchen Systems zu erhöhen, ist eine Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit unabdingbar. Das System wurde durchwegs als geeignet für die Aufgabe eingeschätzt und die Benutzbarkeit positiv bewertet. Die erreichte Einhaltung der Trajektorie auch ohne Vorwissen durch den Probanden in den ersten Versuchen zeugt ebenfalls von einer hohen Intuitivität und somit Gebrauchstauglichkeit des Systems.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen</b> .....	<b>v</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. <i>Motivation</i> .....	1
1.2. <i>Ziele</i> .....	2
1.3. <i>Aufbau der Arbeit</i> .....	3
<b>2. Grundlagen und Stand der Forschung und Entwicklung</b> .....	<b>5</b>
2.1. <i>4D-Rollführungssysteme</i> .....	5
2.1.1. <i>Zukünftige Systeme für das Flugverkehrsmanagement</i> .....	5
2.1.2. <i>Heutiger Rollprozess</i> .....	7
2.1.3. <i>4D-Rollprozesse</i> .....	10
2.2. <i>Grenzen der Automatisierung</i> .....	18
2.2.1. <i>Definition der Automatisierung</i> .....	19
2.2.2. <i>Beanspruchung</i> .....	22
2.2.3. <i>Situationsbewusstsein</i> .....	23
2.2.4. <i>Fertigkeitsverlust</i> .....	24
2.2.5. <i>Dilemma der Automatisierung</i> .....	25
2.2.6. <i>Verlagerung der Fehlerquelle</i> .....	25
2.3. <i>Rollführung mit Rollwegbefeuerungselementen</i> .....	26
2.3.1. <i>„Follow the Greens“</i> .....	26
2.3.2. <i>Einsatz von Rollwegbefeuerungselementen zur Optimierung der Rollphase</i> .....	28
2.3.3. <i>Grenzen bisheriger Ansätze</i> .....	31
<b>3. Konzeption eines 4D-Rollführungssystems</b> .....	<b>33</b>
3.1. <i>Anforderungen</i> .....	33
3.1.1. <i>Ausrüstungsgrad</i> .....	33
3.1.2. <i>Automatisierungsgrad</i> .....	33
3.1.3. <i>Vermittlungsart</i> .....	34
3.1.4. <i>Vermittlungsort</i> .....	37
3.1.5. <i>Gebrauchstauglichkeit</i> .....	40
3.1.6. <i>Zusammenfassung der Anforderungen</i> .....	42
3.2. <i>Hypothesen</i> .....	42
3.2.1. <i>Einhaltung der Solltrajektorie</i> .....	43
3.2.2. <i>Sicherheitsfaktoren</i> .....	43
3.2.3. <i>Gebrauchstauglichkeit</i> .....	43
3.2.4. <i>Zentrale Hypothese</i> .....	44
3.3. <i>Geometrische Einschränkungen und technologische Annahmen</i> .....	44
3.3.1. <i>Geometrische Einschränkungen der Rollwegbefeuerungselemente</i> .....	44
3.3.2. <i>Technologische Annahmen</i> .....	46
3.4. <i>Konzept</i> .....	50
3.4.1. <i>Follow the Greens</i> .....	50
3.4.2. <i>Entscheidungsunterstützungssystem: Zwei Ansätze</i> .....	51
3.4.3. <i>Architektur</i> .....	52
3.4.4. <i>Reglerauslegung</i> .....	53
3.4.5. <i>Vorversuche</i> .....	56
<b>4. Konzeption der experimentellen Untersuchungen</b> .....	<b>63</b>
4.1. <i>Experimentelles Design</i> .....	63
4.1.1. <i>Variablen</i> .....	63

4.1.2.	Überprüfung der Hypothesen .....	66
4.1.3.	Stichprobenumfang .....	67
4.1.4.	Statistische Tests.....	68
4.2.	<i>Realisierung des Konzepts</i> .....	68
4.2.1.	Simulationsarchitektur .....	68
4.2.2.	Forschungssimulator .....	69
4.2.3.	Außensicht.....	71
4.2.4.	Fremdverkehr .....	71
4.2.5.	Räumliche Führung.....	72
4.2.6.	Zeitliche Führung.....	73
4.3.	<i>Versuchsplanung</i> .....	74
4.3.1.	Szenarien .....	75
4.3.2.	Versuchsplan .....	77
4.3.3.	Ablauf der Versuche .....	78
<b>5.</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>81</b>
5.1.	<i>Stichprobenbeschreibung</i> .....	81
5.2.	<i>Aufzeichnungen</i> .....	83
5.2.1.	Datenreduzierung.....	83
5.2.2.	Räumliche Führung.....	84
5.2.3.	Zeitliche Führung.....	84
5.2.4.	Gebrauchstauglichkeit.....	92
5.3.	<i>Fragebögen</i> .....	96
5.3.1.	Modified Cooper-Harper Rating Scale .....	96
5.3.2.	System Usability Scale .....	98
5.3.3.	Raw TLX.....	99
5.3.4.	Situation Awareness Rating Technique .....	103
5.4.	<i>Debriefing</i> .....	108
5.5.	<i>Hypothesenprüfung</i> .....	109
5.5.1.	Einhaltung der Solltrajektorie.....	109
5.5.2.	Sicherheitsfaktoren.....	110
5.5.3.	Gebrauchstauglichkeit.....	110
5.5.4.	Zentrale Hypothese.....	111
5.6.	<i>Weitere Erkenntnisse</i> .....	111
5.6.1.	Sicherheitsbereich.....	112
5.6.2.	Notwendige Vorabinformationen.....	114
5.6.3.	Solltrajektorie.....	114
5.6.4.	Visuelle Anweisungen.....	118
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>121</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>123</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>135</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>139</b>
	<b>Anhang A: Eingangsfragebogen</b> .....	<b>CXLI</b>
	<b>Anhang B: Modified Cooper Harper Rating Scale (MCHS)</b> .....	<b>CXLV</b>
	<b>Anhang C: System Usability Scale (SUS)</b> .....	<b>CXLVII</b>
	<b>Anhang D: Raw TLX</b> .....	<b>CXLIX</b>
	<b>Anhang E: Situation Awareness Rating Technique (SART)</b> .....	<b>CLI</b>

<b>Anhang F: Ergebnis Debriefing.....</b>	<b>CLIII</b>
<b>Anhang G: Szenarien .....</b>	<b>CLV</b>

# Abkürzungen

4D	4-dimensional
4DT	4D-Trajektorie
ACAP	Airplane Characteristics for Airport Planning
AGARD	Advisory Group for Aerospace Research and Development
AGL	Airfield Ground Lighting
AGLAS	Airfield Ground Lighting Automation System
AI	Artificial Intelligence
AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
AIRAC	Aeronautical Information Regulation And Control
AMDB	Aerodrome Mapping Database
AMM	Airport Moving Map
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
AP	Auto Pilot
AR	Augmented Reality
A-SMGCS	Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ASRS	Aviation Safety Report System
ASTERIX	All Purpose STructured Eurocontrol SuRveillance Information EXchange
ATA	Air Transport Association
ATC	Air Traffic Control
ATGS	Advanced Taxiway Guidance System
ATM	Air Traffic Management
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CAVOK	Ceiling And Visibility Okay
CDM	Collaborative Decision Making
CFMU	Central Flow Management Unit
COTS	Commercial Off-The-Shelf
CTOT	Calculated Take Off Time
DERP	Design Eye Reference Point
DFS	Deutsche Flugsicherung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
dt.	deutsch
EASA	European Aviation Safety Agency
EFIS	Electronic Flight Information System

## *Abkürzungen*

---

eng.	englisch
ETA	Estimated Time of Arrival
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
FAA	Federal Aviation Administration
FARGO	Flight-deck Automation for Reliable Ground Operation
FL	Flight Level
FO	First Officer
FSR	Flugsysteme und Regelungstechnik
GA	Genetic Algorithm
FCFS	First-Come First-Served
GUI	Graphical User Interface
HDD	Head Down Display
HF	Human Factors
HUD	Head-Up Display
HMD	Helmet-Mounted Display
ICAO	International Civil Aviation Organisation
iPort	Innovativer Airport
JPDO	Joint Planning Development Office
LED	Lichtemittierende Diode
LOA	Level of Automation
LP	Linear Programming
LVP	Low Visibility Procedure
MABA-MABA	Men Are Better At – Machines Are Better At
MCHS	Modified Cooper-Harper Rating Scale
METAR	message d'observation METéorologique pour l'Aviation Régulière
MILP	Mixed Integer Linear Programming
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASA TLX	NASA Task Load Index
ND	Navigation Display
NextGen	Next Generation Air Transportation System
NOTAM	Notice To Airmen
OEB	Operational Engineering Bulletin
OTW	Out-the-Window
PCP	Proximity Compatibility Principle
PDT <sub>1</sub>	Proportional-Differentialglied mit Verzögerung 1. Ordnung

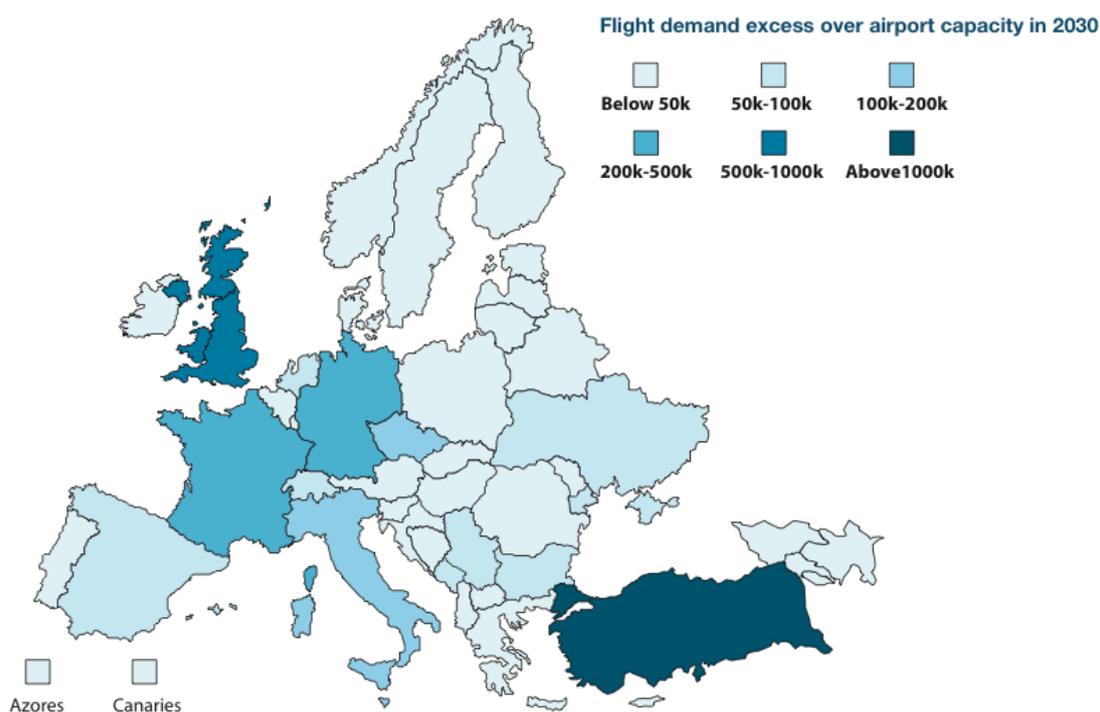
PF	Pilot Flying
PFD	Primary Flight Display
PIB	Preflight Information Bulletin
PID	Proportional Integral Derivative
PI <sub>2</sub>	Proportional Integral Integral
PNF	Pilot Non Flying
PSR	Primary Surveillance Radar
RH	Receding Horizon
RM-ANOVA	Repeated Measurements-ANOVA
RTA	Required Time of Arrival
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics
RTLX	Raw Task Load Index
RVR	Runway Visual Range
SESAR	Single European Sky ATM Research
SFO	Senior First Officer
SGS	Surface Guidance System
SMAAS	Surface Movement Awareness and Alerting System
SMGCS	Surface Movement Guidance and Control System
SOAR	Surface Operation Automation Research
SUS	System Usability Scale
SMAN	Surface Manager
SWIM	System Wide Information Management
TLX	Task Load Index
TOBT	Target Off-Block Time
TSAT	Target Start Up Approval Time
WFF	Wettbewerbsfähiger Flughafen
XML	EXtensible Markup Language



# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation

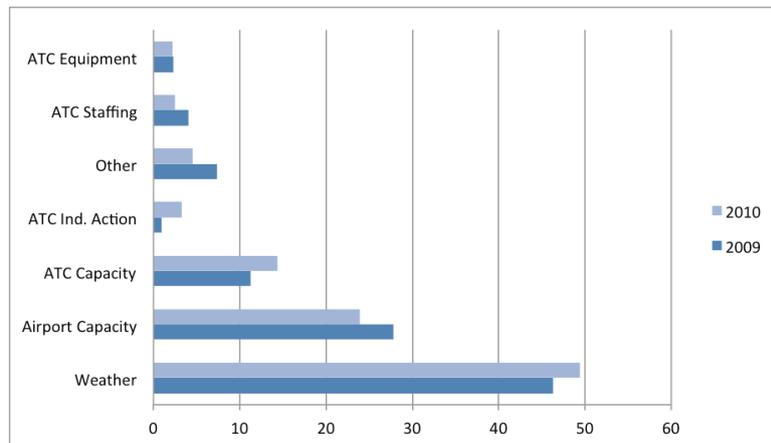
In der letzten Prognose zum Luftfahrtwachstum der European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) wird eine Erhöhung der Flugbewegungen bis 2030 zwischen 70% und 120% errechnet [EC08a]. Dabei stellen die Flughäfen eine deutliche Wachstumsbremse dar: die EUROCONTROL erwartet, dass im Jahr 2030 durchschnittlich 11% der Luftfahrt-Nachfrage wegen zu geringer Kapazitäten an Flughäfen nicht befriedigt werden kann. Dies wird vorrangig die heutigen Großflughäfen in Großbritannien, Frankreich und Deutschland betreffen (s. Abbildung 1). In diesem Zusammenhang stellt die Optimierung des Bodenverkehrs mit einer der größten Herausforderungen für zukünftige Air Traffic Management Systeme dar.



**Abbildung 1: Luftfahrt-Nachfrage gegenüber den Flughafen Kapazitäten im Jahr 2030 [EC08a]**

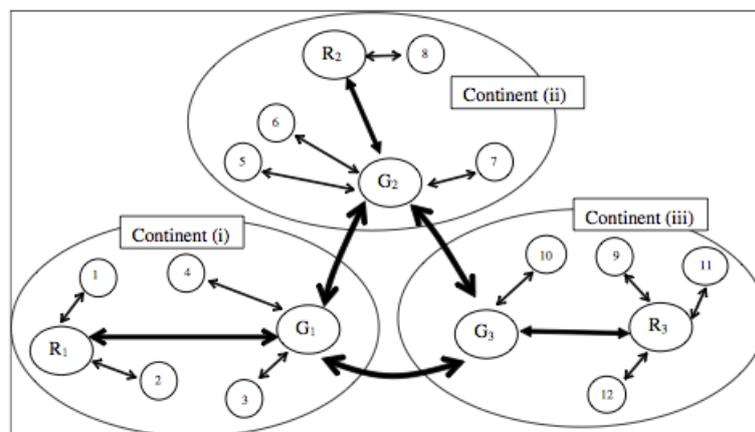
Die Verspätungen während der Taxi-Out Phase eines Fluges tragen im Schnitt mehr als 60% zur gesamten Verspätung im heutigen Flugprozess bei [GS07]. Hierbei ist insbesondere die eingeschränkte Kapazität der Flughäfen für diese Verzögerungen verantwortlich (Abbildung 2). Trotz der elastischen Eigenschaft von Flugverspätungen kann diese Zeit während des kompletten Fluges nicht wieder aufgeholt werden.

Dr. Yiannis Paraschis, Präsident der Airports Council International (ACI) Europe fasste die zunehmende Bedeutung von Flughafenkapazität wie folgt zusammen: “Airport capacity is the main bottleneck that the aviation system will be facing over the coming years. You can add as much capacity in the sky as you want, but if this is not matched by capacity on the ground, you are not resolving anything but rather just creating more inefficiency from an economic and environmental point of view” [Eur07].



**Abbildung 2: Ursachen für verspätete Flüge an europäischen Flughäfen nach [CODA11]**

Des Weiteren erhöht die derzeitige Entwicklung des Luftverkehrs zu einem Speichennetz (eng.: Hub and Spoke network, s. Abbildung 3) die Notwendigkeit einer Optimierung der Bodenphasen. Schon heute ist eine speichenartige Struktur zu erkennen mit einer Konzentration von fast drei Viertel des Flugverkehrs auf nur 114 von mehr als 2300 Flughäfen [Air11b].



**Abbildung 3: Speichennetz im Luftverkehr [AS07]**

Folglich beschäftigen sich seit einigen Jahren mehrere internationale Forschungsvorhaben mit einer Neugestaltung des Luftverkehrs, insbesondere mit den Phasen am Boden. Die resultierende angestrebte Optimierung und Neuordnung des Luftverkehrs auf beiden Seiten des Atlantiks beruht auf dem Einsatz von raum- und zeitfesten vierdimensionalen Trajektorien. In den internationalen Vorhaben NextGen [JPD07] und SESAR [EC09] ist die Einführung solcher 4D-Trajektorien vom Abflug-Gate bis zum Ankunfts-Gate geplant (Gate-to-Gate Prozess).

Mögliche zeitliche Verzögerungen während der Rollphase gewinnen noch an Bedeutung in diesen zukünftigen Air Traffic Management (ATM) Verfahren, bei denen der komplette Flug vom Abflug-Gate bis zum Ankunfts-Gate zeitlich fest geplant ist.

### 1.2. Ziele

Ziel der Arbeit ist es, zu untersuchen wie die notwendige räumliche und zeitliche Information zur Einhaltung dieser festgeplanten 4D-Trajektorien an die Cockpitbesatzung während der Rollphase optimal übermittelt werden kann. Ein System, das diese dynamische,

kontinuierliche und konfliktfreie 4D-Trajektorie für alle Verkehrsteilnehmer erzeugt, wird hierbei vorausgesetzt.

Das gezielte 4D-Rollführungssystem soll der Cockpitbesatzung ermöglichen möglichst genau die vorgegebene 4D-Trajektorie abzurollen, ohne dabei die Sicherheit des Fluges und des Flughafens während der kritischen Rollphase zu gefährden.

### 1.3. Aufbau der Arbeit

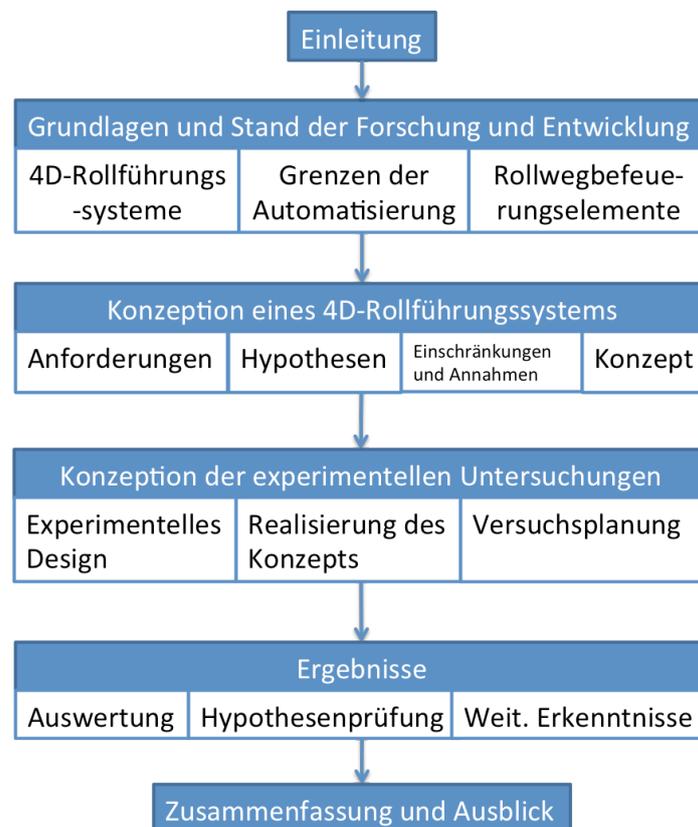
Ausgehend von der in Kapitel 1 erläuterten Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit, wird in Kapitel 2 ein Überblick über die Grundlagen der Rollführung und ihre Anbindung in zukünftige ATM Systeme gegeben. Weiterhin werden der Stand der Technik und ausgewählte Forschungsarbeiten im Bereich des Einsatzes von Rollwegbefeuerelementen zur Rollführung vorgestellt. Ebenfalls werden der Bereich der Automatisierung sowie ihre Grenzen aufgezeigt.

In Kapitel 3 werden, ausgehend von den Anforderungen an das System, die zu untersuchenden Hypothesen, sowie die technologischen Annahmen und Einschränkungen des 4D-Rollführungssystems erläutert. In Kapitel 4 wird die Entwicklung der notwendigen Untersuchungen zur Validierung des Systems vorgestellt.

Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen in Kapitel 5 im Detail dargestellt.

Geschlossen wird die vorliegende Arbeit mit einer Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse, sowie einem Ausblick über die notwendigen Erweiterungen hinsichtlich einer konkreten Anwendung des Systems zur Optimierung von Rollprozessen.

Eine Zusammenfassung des Aufbaus der Arbeit wird in Abbildung 4 visualisiert.



**Abbildung 4: Aufbau der Arbeit**



## 2. Grundlagen und Stand der Forschung und Entwicklung

Im folgenden Kapitel werden notwendige Grundlagen erläutert, sowie der Stand der Forschung und Entwicklung dargestellt. Dazu werden zunächst 4D-Rollführungssysteme vorgestellt, dann die Grenzen der Automatisierung zusammengefasst und anschließend bisherige Einsätze von Rollwegbefeuerungselementen in der Rollführung aufgezeichnet.

### 2.1. 4D-Rollführungssysteme

Die Einführung einer 4D-trajektorienbetriebenen Rollphase wird durch den Vergleich zwischen den heutigen Rollprozessen und den zukünftigen Systemen für das Flugverkehrsmanagement (eng.: Air Traffic Management (ATM)) deutlich. Die theoretisch berechnete Erhöhung der Kapazität an Flughäfen durch diese Einführung verstärkt ihre Notwendigkeit. Zwei verschiedene Ansätze werden bereits erforscht, um diesen theoretischen Gewinn an Kapazität in die Praxis umzusetzen: der vollautomatische Ansatz, sowie erste Überlegungen den menschlichen Faktor zu betrachten.

#### 2.1.1. Zukünftige Systeme für das Flugverkehrsmanagement

Um das zukünftige Wachstum des Luftverkehrs bedienen zu können, ist eine grundlegende Veränderung der weltweiten ATM Systeme notwendig. Dies wird im Wesentlichen von zwei Säulen getragen: die Umsetzung einer Trajektorien getriebenen ATM in Raum und Zeit (4D), sowie die zentrale Rolle des Menschen in diesen zukünftigen Systemen.

##### Paradigmenwechsel: 4D-Trajektorie

Zurzeit wird sowohl am Boden als auch En-Route eine rein räumliche Führung der Verkehrsteilnehmer ohne Vorgabe von Zeiten vorgenommen. Die Abläufe an Flughäfen werden hierbei nach dem einfachen Windhundprinzip (First-Come, First-Served) realisiert [SES08], wie in Abbildung 5 dargestellt.

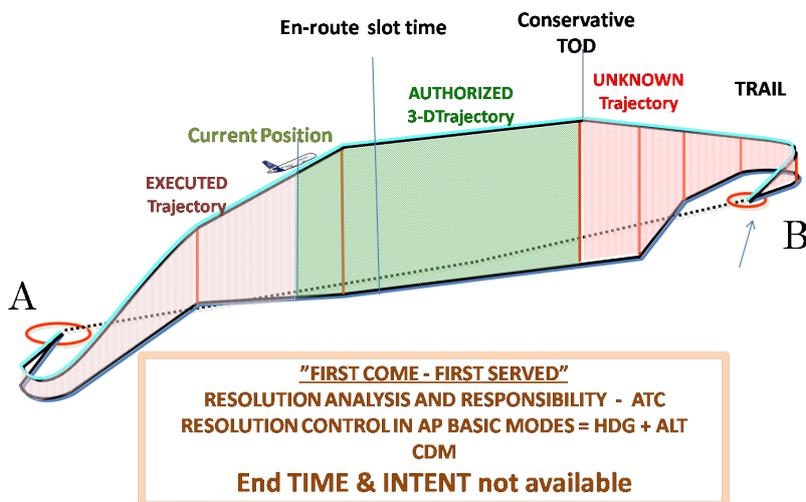


Abbildung 5: Heutige Verfahren: First Come-First Served Trajektorie nach [BH07]

Insbesondere um die Wirtschaftlichkeit der Luftfahrt durch eine Erhöhung der Planbarkeit von Luftverkehrsbewegungen zu verbessern, ist der Einsatz von vierdimensionalen Business Trajektorien (4DBT) geplant. In diesem Zusammenhang werden die Boden- und Flugtrajektorien von Verkehrsflugzeugen, sowohl räumlich als auch zeitlich, hochgenau geplant. Dieses neue System sieht dann vor, dass Flugzeuge, die entsprechend der Planung

geflogen sind, als erste von der Flugsicherung bedient werden (On Time – First Served). Dieses wird in Abbildung 6 dargestellt. Die Umsetzung dieser Planung wird durch die Einführung von trajektorienbasierten Operationen (Trajectory-Based-Operations) in einem performanzbasierten (Performance-Based) Umfeld ermöglicht.

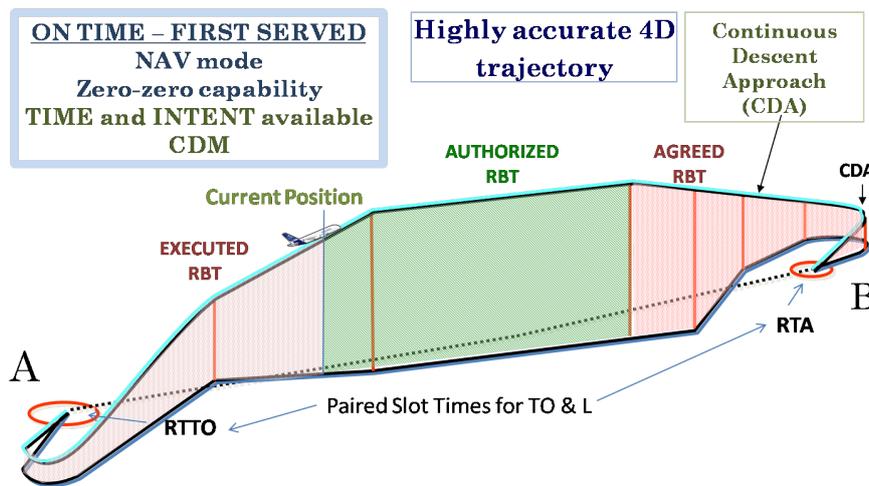


Abbildung 6: Zukünftige Verfahren: 4D-Trajektorie nach [BH07]

Das Verbesserungspotential dieses On Time – First Served Paradigmas im Vergleich zum heutigen First-Come First-Served wurde methodisch mit der Validierung des Co-operative Local resource planners (CLOU) vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) [Pic07] untersucht. Die Abflugzeitgenauigkeit konnte mit dem Einsatz des Prototyps um etwa 40% gesteigert werden.

Dieser Paradigmenwechsel wird im Wesentlichen vom Global Air Navigation Plan der ICAO [ICAO07a] getragen. Dieses Dokument versteht sich als methodologische Planungshilfe, um die Harmonisierung aller ATM Systeme zu erreichen und gibt mittel- und langfristige Ziele in allen Programme zur Entwicklung der Luftfahrt auf regionaler Ebene vor. Die hier angestrebten Ziele für ein weltweites ATM sind: Interoperabilität und nahtlose Übergänge im Hinblick auf eine effizientere und sicherere Nutzung des Luftraums. Um diese Ziele zu erreichen sind

- physikalische Vernetzung,
- gemeinsame Anforderungen, Standards und Prozeduren,
- sowie nahtlose Sicherheit über alle Regionen

notwendig. Die physikalische Vernetzung wird mit Hilfe eines sogenannten System Wide Information Management (SWIM) Systems ermöglicht.

Der Single European Sky wurde initiiert, um die notwendigen Harmonisierungsvorgaben des ICAO Global Air Navigation Plans auf einer europäischen Ebene umzusetzen. Die technische Säule dieser Initiative stellt das Single European Sky ATM Research (SESAR) Programm dar. Dieses Programm hat sich vier „politische“ Leistungsziele bis 2020 gegeben [EC09]:

- eine Verdreifachung des Flugverkehrs,
- eine Verbesserung der Sicherheit um den Faktor 3 und den Faktor 10 nach 2020,
- eine Halbierung der ATM Kosten,
- und eine Verminderung der Umweltbelastung durch den Luftverkehr um 10%.

Diesen Forderungen wird durch eine Umsetzung der 4D-Trajektorie Rechnung getragen. Dies geschieht, indem die Architektur des ATM Systems, mit der Einführung eines gesamten

Netzwerks zum Umtausch aller Informationsarten zwischen allen ATM Prozessteilnehmern, tiefgreifend verändert wird.

Die Entwicklungen des amerikanischen ATM Systems, im Hinblick auf einen weltweit harmonisierten Luftverkehr nach den Vorgaben des ICAO Global Air Navigation Plans, sind im Betriebskonzept des Next Generation Air Transport Systems (NextGen, [JPD07]) zusammengefasst. In diesem Vorhaben sind der Entwicklungshorizont 2025 und die formulierten Ziele wie folgt beschrieben:

- eine signifikante Verbesserung der Sicherheit,
- eine signifikante Erhöhung des Flugverkehrs,
- eine generelle Erhöhung des Wirtschaftswachstums.

NextGen setzt wie SESAR auf eine Umstellung der heutigen, räumlichen Prozesse auf die 4D-Trajektorien. Ebenso wird das Prinzip einer Vernetzung aller Teilnehmer und eine einzige Verwaltung aller Informationsarten von SWIM in NextGen umgesetzt.

### Menschzentriertes System

Im Gegensatz zur technologiegetriebenen Entwicklung der Automatisierung, insbesondere im Cockpit von Verkehrsflugzeugen in den letzten Jahren, und die dadurch entstandenen Mensch-Maschine Schnittstellenproblematik, wird für zukünftige ATM Systeme ein Augenmerk auf ein menschenzentriertes System gerichtet. Im SESAR Master Plan wird die zentrale Rolle des Menschen als eines der Prinzipien des Betriebskonzepts definiert ([EC08b], S. 15).

Das NextGen Programm war hingegen zunächst rein technologiegetrieben. Daraus resultieren eine Reihe von Veröffentlichungen ([SCN06], [MP08], [FMB09]), die einen stärkeren Bezug auf den Menschen empfohlen haben. Eine Human System Integration (HSI) Roadmap wurde 2008 initiiert, die diese Empfehlungen integrieren und umsetzen soll [JPD11].

### 2.1.2. Heutiger Rollprozess

Der Rollprozess erfolgt heute über eine Kette von Abfragen und Anweisungen zwischen der Cockpitbesatzung eines Flugzeugs und den jeweiligen verantwortlichen Lotsen. Die Verfahren sind nach ICAO Vorgaben [ICAO86] reguliert und dienen dazu eine konfliktfreie Führung aller Luftfahrzeuge von der Abstellposition zur Bahn bzw. von der Bahn zur Abstellposition zu gewährleisten. Die Positionen für die jeweiligen Freigaben (Rollfreigabe zur Piste, Aufrollfreigabe (optional Startfreigabe), Startfreigabe, Landefreigabe, Rollfreigabe zum Vorfeld, Parkinformationen) sind in Abbildung 7 aufgelistet.

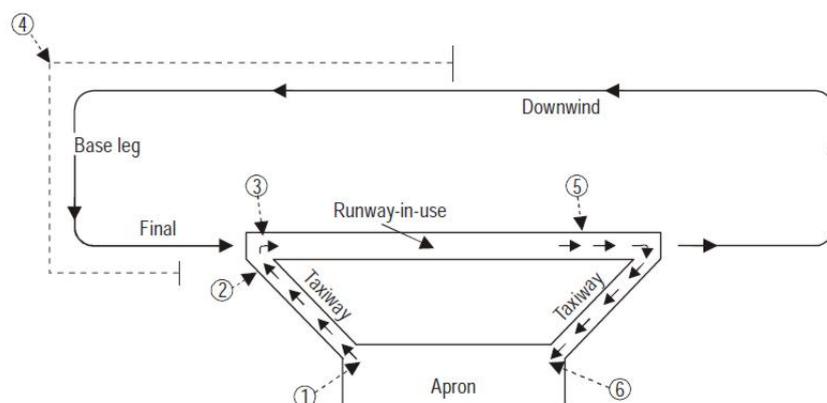


Abbildung 7: Freigabepositionen [ICAO07b]

## 2. Grundlagen und Stand der Forschung und Entwicklung

Hierbei sind zeitliche Vorgaben auf die Angabe von Reihenfolgen („Number two after LH477“) und Halteanweisungen eingeschränkt. Die Komplexität dieses Prozesses mit der Vielzahl an Akteuren und Interaktionen wird am Beispiel eines abgehenden Flugs in Abbildung 8 dargestellt.

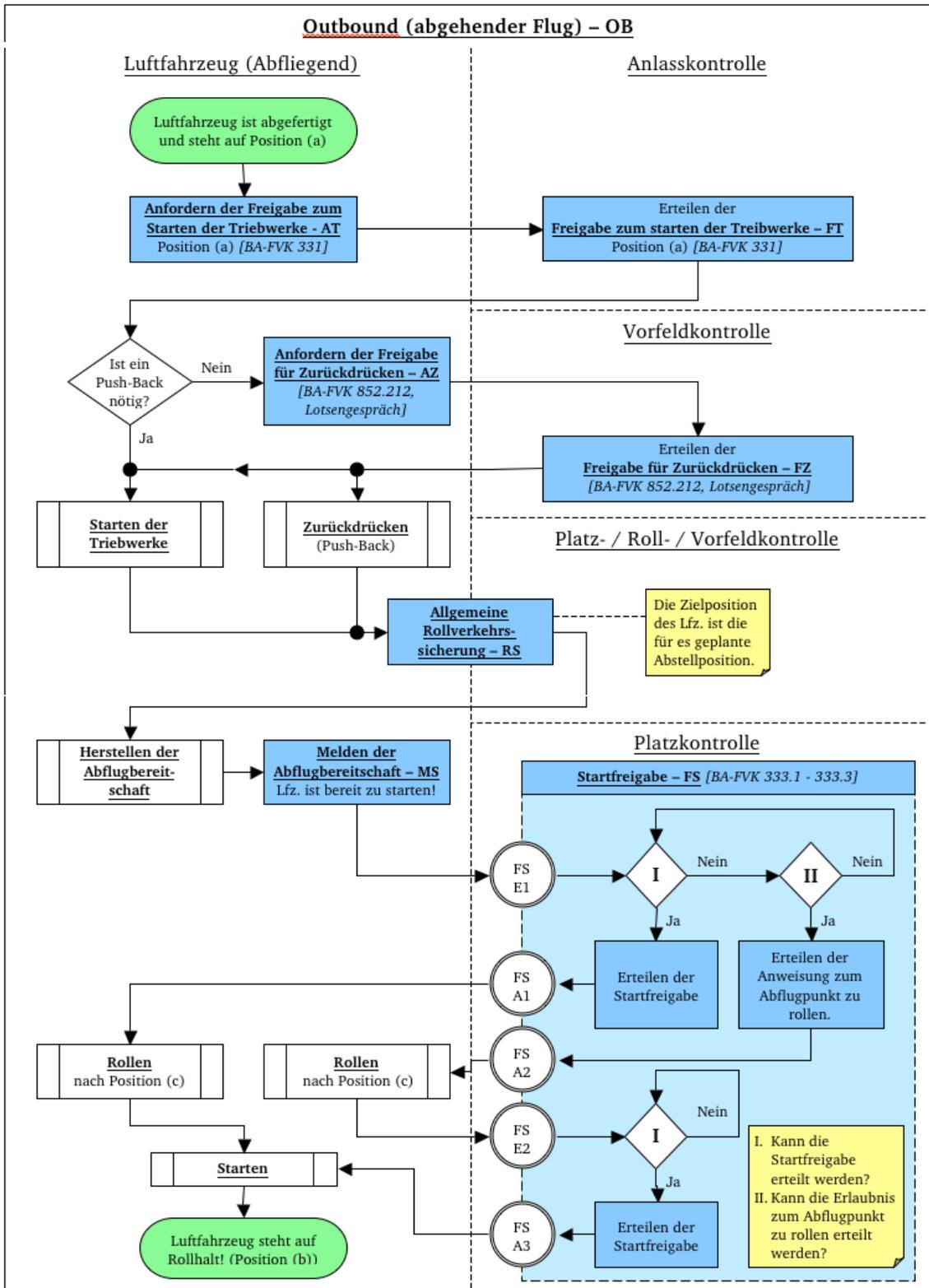


Abbildung 8: Rollführungsprozess am Beispiel des Outboundverfahrens [Blu10]

Für die Cockpitbesatzung selbst entsteht eine geregelte Aufgabenverteilung zwischen dem Erstoffizier und dem Kapitän um diesen Prozess abzuwickeln. Dazu kommt auch der Prüffragenkatalog. Die resultierende Aufgabenabwicklung im Cockpit während der Rollphase wird in Abbildung 9 dargestellt. Die Rollphase gehört so zu den anspruchsvollsten und kritischsten Phasen eines Fluges.

Die tatsächliche Führung des Luftfahrzeugs auf dem Boden erfolgt in der Regel durch den Kapitän über die Steuerung des Schubs anhand des Schubhebels, der Radenbremsen mit den Pedalen, sowie des Bugrads durch die Handräder. Während der Rollphase steht der Schub meistens auf „Ground Idle“ und die Regelung der Geschwindigkeit von Seiten des Piloten erfolgt über die Bremsen [CS09].

Es gibt auf dem Rollfeld keine harten Geschwindigkeitsgrenzen, diese werden jedoch von den jeweiligen Fluggesellschaften als „company policy“ festgelegt. Die empfohlene maximale Geschwindigkeit liegt hierbei zwischen 20 und 30 kn (1 kn = 1,852 km/h), je nach Fluggesellschaft. Die Beschreibung der gewöhnlichen Rollgeschwindigkeiten in [ICAO04b] entspricht diesen Richtlinien mit etwa 55 km/h (30 kn) auf geraden Rollwegen und eine Reduzierung auf etwa 20 km/h (10 kn) in Kurven und auf komplexen Rollwegkonfigurationen. Die Geschwindigkeit in Kurven ist oft je nach Radius durch den Flugzeugtyp eingeschränkt. Beispielsweise kann der Airbus A380 Flugzeug keine Kurve mit einer Geschwindigkeit höher als acht Knoten (14,8 km/h) durchfahren.

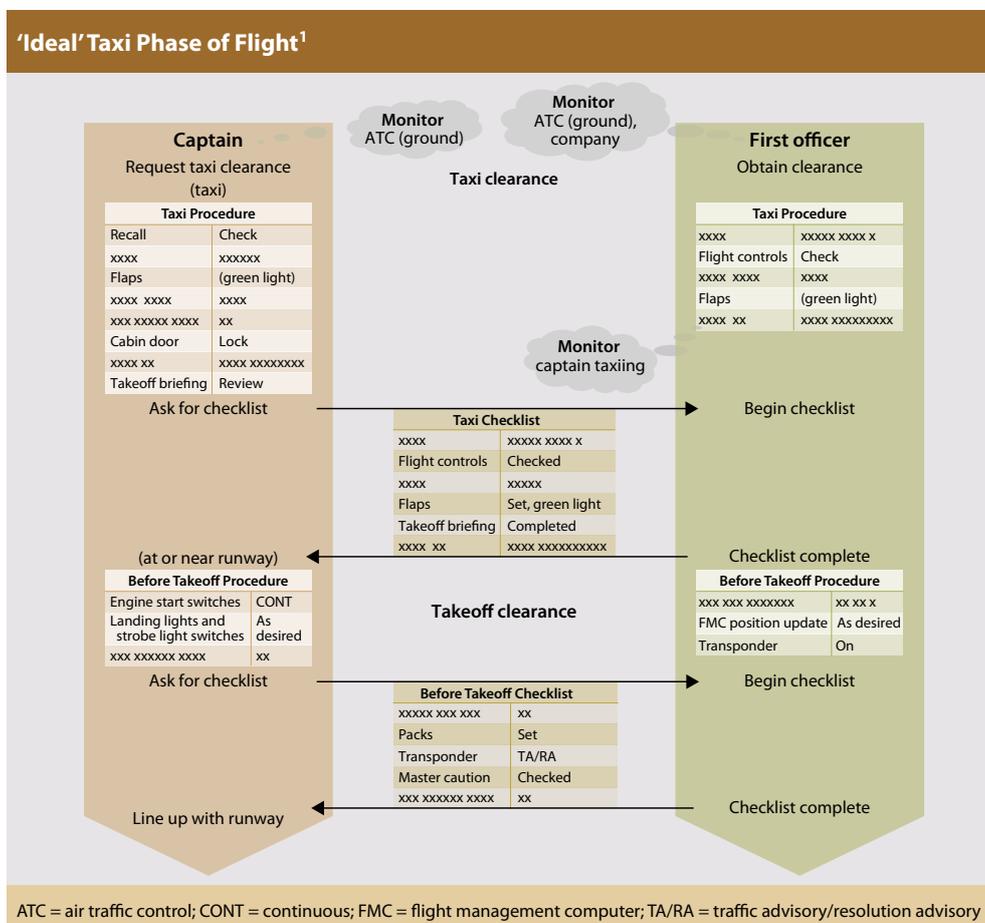


Abbildung 9: Aufgabenverteilung im Cockpit während der Rollphase [LDB09]

Durch die Erhöhung der Anzahl von Flugbewegungen weltweit und die damit verbundene Kapazitätserweiterung an Flughäfen ist eine Verlängerung der Rollzeit zu beobachten.

## 2. Grundlagen und Stand der Forschung und Entwicklung

Zwischen 1995 und 1998 wurde so eine Erhöhung der durchschnittlichen Outbound Rollzeit von 16 auf 19 Minuten am Chicago O'Hare Flughafen festgestellt [VH00].

Erste Ansätze die Prozesse am Boden, anhand von Zeitfenstern für Start Up und Take Off, zu optimieren, wurden bereits in mehreren Flughäfen getestet und eingesetzt: Frankfurt, München, London, Paris und Brüssel. Das sogenannte Airport CDM (Collaborative Decision Making) ist der von der Eurocontrol standardisierte, operationelle Ansatz zur Abwicklung eines optimalen Boden-Turnaround Prozesses am Flughafen – von der Landung bis zum nächsten Start des Flugzeugs, wie in Abbildung 10 dargestellt. Eine starke Koordination des Systems mit der zentralisierten Verkehrsflusssteuerung CFMU (Central Flow Management Unit) ermöglicht frühzeitig verlässliche Vorhersagen der Lande- bzw. Abflugzeiten, sowie eine genaue Berechnung der Calculated Take Off Time (CTOT) auf Basis lokaler Zielstartzeiten.

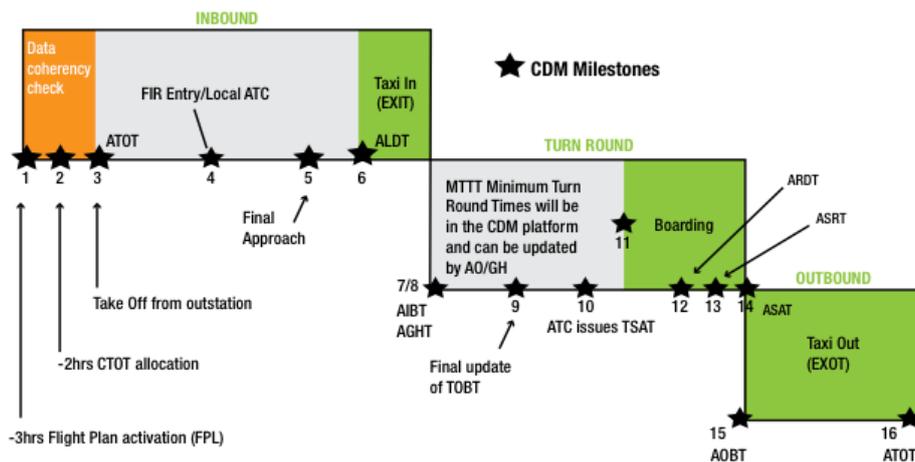


Abbildung 10: Airport CDM Meilensteine [EC10]

Die Optimierung des tatsächlichen Verkehrsflusses am Boden wird von diesem Airport CDM System jedoch nicht angestrebt. Die Einbindung in den 4D-Prozess beschränkt sich auf die reine Vergabe von Slots (dt. Zeitnischen).

### 2.1.3. 4D-Rollprozesse

Die Erneuerung von Luftfahrtprozessen wird zwingend Veränderungen im Bereich der Bodenbewegungen mit sich bringen [ASY08], wie die starke Einbindung der Rollphase im gesamten Flugprozess in Abbildung 11 verdeutlicht.

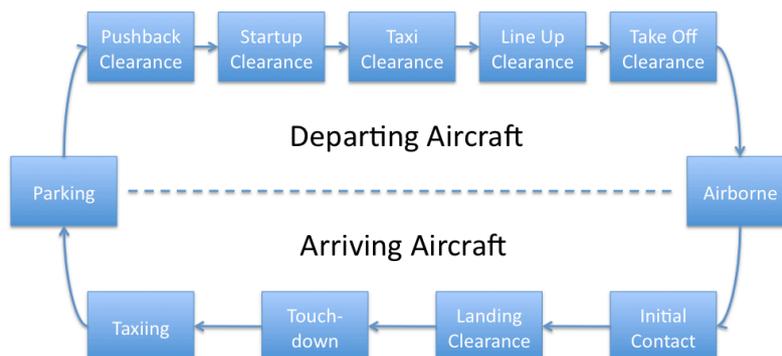


Abbildung 11: Zustände von Flugzeugen in der Rollphase nach [Köc09]

Die Notwendigkeit einer Erweiterung der Rollführung von der heutigen rein räumlichen Führung mit einer zeitlichen Komponente, resultierend aus den SESAR und NextGen Vorhaben, wurde in einer Studie für die Deutsche Flugsicherung (DFS) ausführlich analysiert und dokumentiert [Urv10].

Zusätzlich zur Einbindung der Rollphase in die 4D-trajektoriengetriebenen, zukünftigen ATM Systeme, bringt die 4D-Rollführung großes Potential für die Optimierung des Verkehrsflusses am Boden. Die Umsetzung dieses räumlich und zeitlich geführten Rollprozesses wurde sowohl als vollautomatischer Prozess, als auch mit der Einbeziehung menschlicher Operateure erforscht.

### Rollfluss Optimierung

Die Optimierung des Rollverkehrs am Boden versteht sich im Wesentlichen als ein Touren- und Umlaufplanungsproblem (eng.: routing and scheduling problem). Die Flugzeuge sollen hierbei von der Landebahn zur Abstellposition bzw. von der Abstellposition zur Startbahn zeitlich exakt geführt werden. Ziel der Optimierung ist eine Reduktion der Gesamtrollzeit, sowie die Einhaltung von Vorgaben aus der allgemeinen 4D-Trajektorie. Die gerechneten Bodentrajektorien müssen konfliktfrei sein. Darüberhinaus ist eine Einbindung der weiteren, stark verknüpften Operationen wie Starten, Landen und Abstellpositionsfreigabe in der Berechnung sehr sinnvoll.

Die iterative Lösung des Touren- und Umlaufplanungsproblem für die Rollroutenplanung wird in [HP98] ausführlich erklärt. In Abbildung 12 wird der Lösungsprozess des Tourenproblems dargestellt. Es wird für jeden Intersektions-, Start- und Ankunfts-knoten eine Kostenvariable definiert. Die Kostenvariable des Startknotens wird auf Null initialisiert während alle anderen Kostenvariablen kleiner oder gleich der Summe der Kostenvariable des benachbarten Knotens und der Länge der entsprechenden Kante gesetzt sind (a.). Damit sind alle Kostenvariablen kleiner oder gleich des kürzesten Wegs zum Startpunkt. Die resultierenden Wertebereiche werden in Abbildung 12a) dargestellt. Setzt man den Wert des Ankunfts-knotens auf das Maximum des Wertebereichs erhält man wie in Abbildung 12b) dargestellt den kürzesten Weg zwischen Start- und Ankunfts-knoten mit allen Knoten mit festen Kostenvariablen.

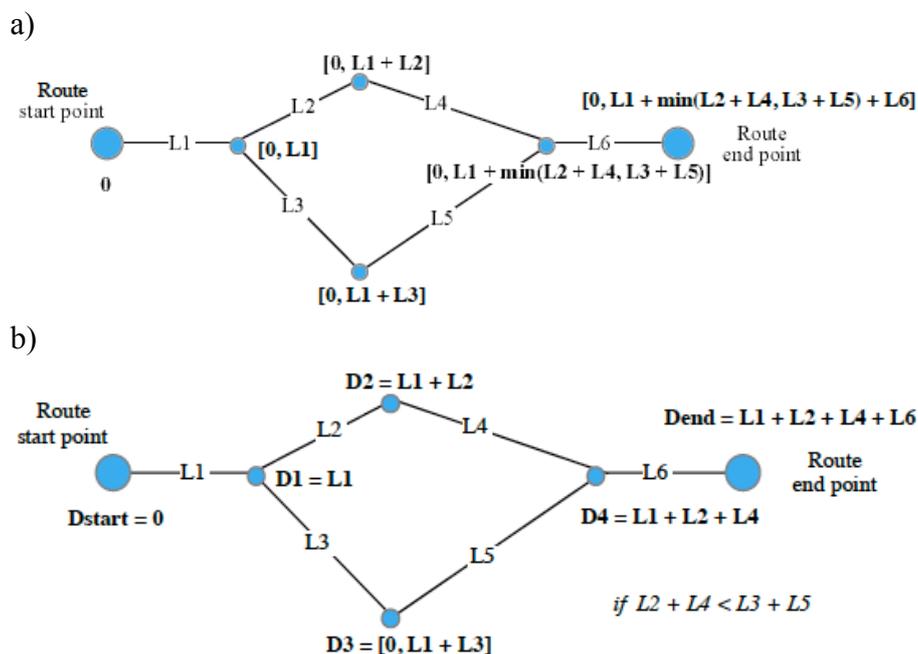
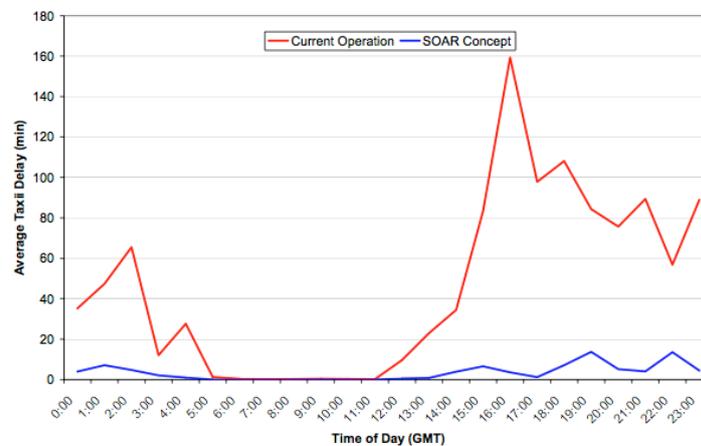


Abbildung 12: Lösung des Tourenproblems [HP98]

Es sind in der Literatur viele verschiedene Methoden dargestellt, dieses Problem optimal für die Rollroutenplanung zu lösen. Diese unterscheiden sich stark in der Formulierung des Ausgangsproblems, sowie in der Ausprägung der Einbindung anderer Flughafenoperationen. Diese Methoden sind in [ABR10] ausführlich zusammengefasst. Im Wesentlichen wurden zwei Ansätze benutzt: genetische Algorithmen (GA) und gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (eng.: MILP, Mixed Integer Linear Programming).

In [CR09] wurde anhand einer iterativen gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung, sowie über den Einsatz eines zurückweichenden Horizonts (eng.: receding horizon) eine Verringerung der gesamten Rollzeit um 56% im Vergleich zum jetzigen Windhund Prinzip erreicht. Der Bahn-Durchsatz wurde um 9% erhöht.

In [CYD04] werden die Vorteile der Einführung von 4D-Trajektorien am Boden am Beispiel vom Dallas Fort Worth Flughafen analysiert. Hierbei wurde das Surface Operation Automation Research (SOAR) Konzept in einer Schnellzeitsimulation evaluiert. Basis für die Untersuchung waren sowohl das heutige Verkehrsszenario als auch ein zukünftiges Verkehrsszenario. Wie in Abbildung 13 dargestellt, ist die Verringerung der durchschnittlichen Verspätung in der Rollphase durch die Einführung des Systems erheblich. Wie der Algorithmus zur Optimierung des Rollflusses genau implementiert wurde, ist leider nicht deutlich.



**Abbildung 13: Taxi Verspätung Vergleich zwischen heutiger Operationen und SOAR Konzept im Dallas Flughafen für einen zukünftigen Verkehrsszenario [CYD04]**

Einen weiteren Vorteil der Rollflussoptimierung ist die mögliche positive Auswirkung auf die Umwelt. Wie in [MJG08] beschrieben ist, hat die Rollphase und insbesondere Stopp Phasen und der daraus resultierende Neustart einen großen Einfluss auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch eines Flugs. In dieser Studie wurde die Auswirkung einer Vermeidung von Stopp Phasen vor Start- und Landebahnen für ankommende Flüge im Dallas Fort Worth Flughafen für die Umwelt untersucht. Eine Reduzierung von jeweils 30% und 28% der Emissionen, sowie des verbrauchten Kraftstoffes wurden errechnet. Die Anzahl der Stopp Phasen kann als Kostenfaktor in das Rollfluss Optimierungsproblem einfließen und somit die negativen Einflüsse auf die Umwelt für diese Flugphase minimieren.

### Vollautomatischer Prozess

Um die Verkehrsteilnehmer entlang der hochgenauen räumlichen und zeitlichen Trajektorien am Boden zu führen, können zwei Ansätze benutzt werden. Der erste Ansatz ist eine vollautomatische Führung der Luftfahrzeuge, der zweite Ansatz ist die gezielte Unterstützung der Flugbesatzung, um diese erweiterte Rollaufgabe zu ermöglichen.

In der dritten Ausbaustufe von SESAR wird die Erweiterung des Autopiloten um die Funktionen „Auto-Taxi“ und „Auto-Brake“ vorgesehen, wie beschrieben in [EC08b] Service Level 3, Line of Change #10: „Improved Surface Navigation“.

In einem ähnlichen Ansatz entwickeln amerikanische Wissenschaftler der NASA im Rahmen von Forschungsarbeiten zum NextGen Vorhaben ein „auto-taxi guidance and control system“ [Che07]. In diesem vollautomatischem Modus der Flight-Deck Automation, Teil des Surface Operation Automation Research (SOAR) Konzepts (s. Abbildung 14), wird die Führung des Luftfahrzeugs entlang der Sollroute vom Autopiloten getätigt. Die Cockpitbesatzung erhält eine reine Überwachungsaufgabe.

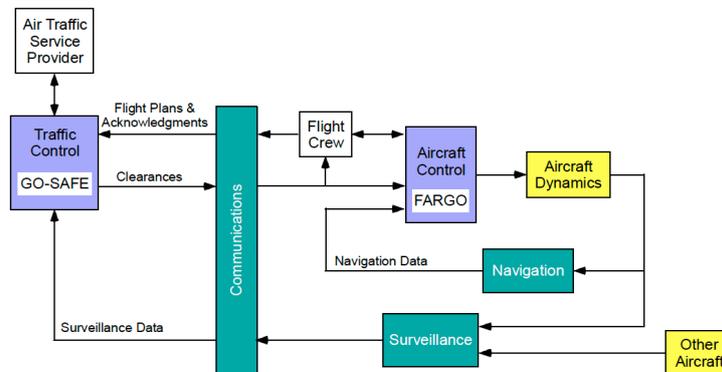


Abbildung 14: Block Diagramm des SOAR Konzepts [CYF03]

Um dies zu ermöglichen, ist eine Darstellung der relevanten Soll- und Ist-Informationen unabdingbar. Die dafür entworfene Schnittstelle aus dem Bereich der erweiterten Realität (Augmented Reality – AR) ist auf dem Head-Up Display (HUD) in Abbildung 15 dargestellt. Hier sind die geforderte Geschwindigkeit und die tatsächliche Geschwindigkeit, sowie die geschätzte Ankunftszeit (ETA) und die geforderte Ankunftszeit (RTA) abzulesen. Eine graphische Darstellung der Positionsfehler wird ebenfalls gegeben. Die Informationen bezüglich der Steuergrößen wurden von den Piloten als nicht wünschenswert bewertet, da diese bereits im Flight Deck vorhanden sind [CAF09].

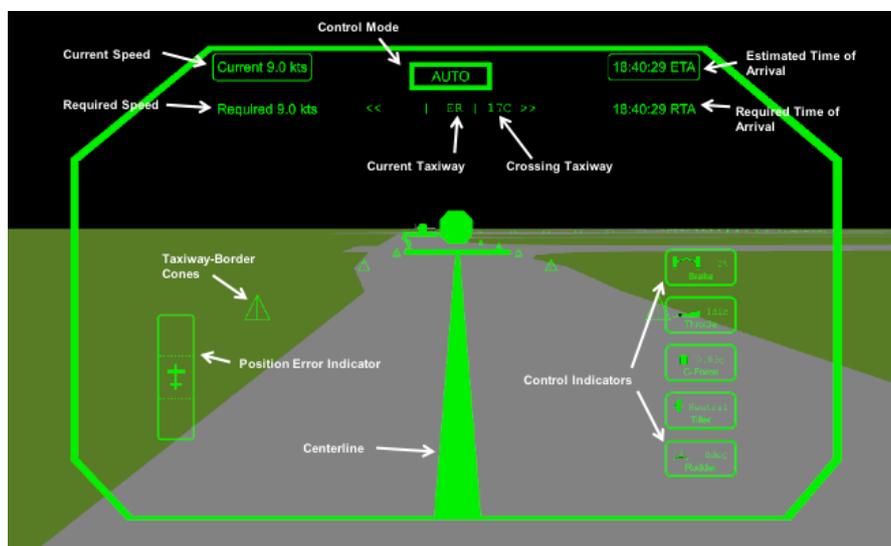


Abbildung 15: Flight-Deck Automation for Reliable Ground Operations (FARGO) HUD Pilotenschnittstelle für den vollautomatischen Modus [CAF09]

Um diesen vollautomatischen Ansatz zu ermöglichen, sind tiefgreifende Umstellungen in den Flugzeugen erforderlich, insbesondere mit einer Erweiterung des Autopiloten um die Regelung der Bremsen und des Bugrads, sowie des Flight Management Systems (FMS) um eine Boden-Solltrajektorie. Die Steuerung des Flugzeugs erfolgt dann über einen nicht-linearen Regler mit Rückkopplung basierend auf einem Modell des jeweiligen Flugzeugtyps [Che07].

### **Pilot in the Loop**

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze beschrieben, die den menschlichen Faktor des Piloten im Regelvorgang zur Erreichung der 4D-Solltrajektorie berücksichtigen. Hierbei wird die tatsächliche Führung des Luftfahrzeugs manuell von der Cockpitbesatzung durchgeführt.

### **Taxi-out Time Prediction**

Ein erster Ansatz, um die manuelle Steuerung durch den Pilot zu ermöglichen, besteht darin, die stochastische Taxi-out Zeit in der Planung einfließen zu lassen. Diese Zeit wird anhand mehrerer messbarer Parameter sowie erlernter Heuristiken prognostiziert [GS07]. Diese Prädiktion wird dann im Planungsmodul eingesetzt.

Ein weiterer Ansatz eine genauere Prognose zu ermöglichen, stellt ein kinematisches Modell der Boden-Trajektorien dar, insbesondere mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen nach der Geometrie der Rollwege: Kurven oder Geraden wie in [Gon09] beschrieben. Lern-Algorithmen können zu diesem Zweck ebenfalls eingesetzt werden, wie in [BG09] dargestellt.

In diesen Ansätzen wird also dem Piloten keine zusätzliche Information im Vergleich zur heutigen Zeit gegeben, sondern sein Verhalten wird abgeschätzt und fließt so in die Planung für die 4D-Trajektorie ein. Ein optimierter Verkehrsfluss am Boden wird dadurch nicht möglich, jedoch können Ansätze mit Zeitfenstern, wie beispielsweise das Airport CDM, verbessert werden.

### **Entscheidungsunterstützungssysteme**

Um die vollen Möglichkeiten der 4D-Boden-Trajektorie auszuschöpfen, kann eine gezielte Unterstützung der Flugbesatzung angestrebt werden, um diese entlang der hochgenauen räumlichen und zeitlichen Trajektorien am Boden zu führen. Die entworfenen Entscheidungsunterstützungssysteme werden entweder im Head-Down Bereich des Flight-Decks angebracht ([MS94], [FHK09]) oder im Head-Up Bereich anhand von Head-Up Displays ([WHF06], [Che04], [CAF09]). In Abbildung 16 ist das Cockpit einer Boeing 787, mit den gewöhnlichen Head-Down Displays, sowie jeweils einem Head-Up Display für jeden Pilot, abgebildet.

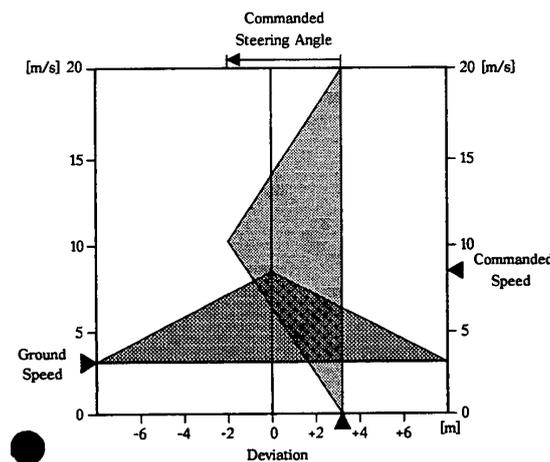


**Abbildung 16: Boeing 787 Cockpit mit Head-Up Displays [Bra07]**

## Head-Down Displays

Das originellste Entscheidungsunterstützungssystem für das Abrollen einer zeitgesteuerten Bodentrajektorie stellt der sogenannte „Drive Director“ dar [MS94]. Dieses System setzt auf eine ähnliche Darstellung wie der Flight Director, der zur Einhaltung einer Trajektorie in der Luft die Abweichungen zu den geforderten Nick- und Hängewinkeln (pitch and bank angles) angibt. Anhand des Drive Directors kann der Pilot die Abweichungen zwischen dem geforderten und tatsächlichen Steuerwinkel, sowie der geforderten und tatsächlichen Geschwindigkeit graphisch, wie in Abbildung 17 dargestellt, ablesen. Dazu ist auch eine Darstellung der eigenen Position auf der Flughafenkarte anhand einer Airport Moving Map (AMM) vorhanden. Beide Displays wurden im vorderen Bereich auf dem Electronic Flight Information System (EFIS) vor dem Fahrer angebracht. Das System wurde mit Hilfe eines Vans an der Universität Braunschweig getestet und lieferte laut Angaben der Entwickler gute erste Ergebnisse. Eine Evaluierung in einem Flight Deck wurde jedoch nicht durchgeführt.

Eine weitere Entwicklung im Head-Down Bereich wurde in [FHK09] evaluiert. Hierbei wurden nur einige wenige Veränderungen der verfügbaren EFIS Displays durchgeführt: Das Primary Flight Display (PFD) wurde um die Darstellung der Rollgeschwindigkeit erweitert. Tatsächlich wird die Geschwindigkeit auf dem PFD normalerweise erst ab 30 oder 40 kn dargestellt. Die Rollgeschwindigkeit ist dann nur im obersten linken Teil des Navigation Displays (ND) abzulesen. Die geforderte Rollgeschwindigkeit wird hier ebenfalls auf dem PFD dargestellt, sowie die Required Time of Arrival (RTA). Dazu wird die komplette Taxiroute auf einer AMM dargestellt (Abbildung 18). Das Ziel des Systems ist jedoch nur auf die Einhaltung der RTA gerichtet: in dem Advanced Modus steuert ein Algorithmus die geforderte Geschwindigkeit, um die Abweichung zwischen der geforderten Ankunftszeit (RTA) und der geschätzten Ankunftszeit (ETA) zu minimieren. Hierbei wurde jedoch keine kontinuierliche 4D-Boden-Trajektorie angestrebt.



**Abbildung 17: Drive-Director im Ground Information and Navigation System [MS94]**

Die Ergebnisse im Advanced Modus zeigen eine deutlich bessere Einhaltung der RTA, mit Abweichungen der Ankunftszeit, die hier zwischen + 10 und – 10 s liegen. Dem gegenüber weisen die Ergebnisse mit dem begrenzten System, in dem keine Anpassung der geforderten Geschwindigkeit abhängig der Abweichung zwischen der ETA und RTA durchgeführt wurde, eine Abweichung der Ankunftszeit zwischen + 55 und – 25 s auf.

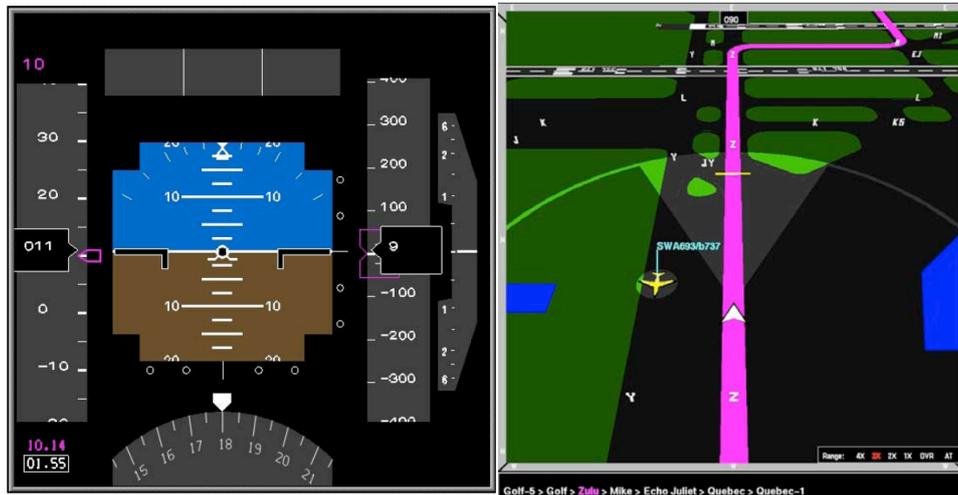


Abbildung 18: Advanced NextGen PFD und Taxi ND [FHK09]

### Head-Up Displays

In [WHF06] werden die gleichen Informationen wie im Advanced NextGen PFD (Primary Flight Display) und Taxi ND (Navigation Display) [FHK09] auf dem Head-Up Display (HUD) in Abbildung 19 eingeblendet. Die Navigationsunterstützung erfolgt hier über eine Erweiterung der Rollwegmittellinie mit virtuellen grünen Punkten entlang der geforderten Taxiroute, einer Beschriftung des jetzigen Rollwegs, sowie der kreuzenden Rollwege. Dazu gibt es auch eine elektronische Karte des Flughafens (AMM) mit einer Darstellung der kompletten Taxiroute.

In dieser Studie wurde die Darstellung der Geschwindigkeiten allein, der Ankunftszeiten allein, sowie die Kombination beider Darstellungen untersucht. Die besten Ergebnisse wurden mit der kombinierten Darstellung von Geschwindigkeit und Zeit erzielt. Hierbei wurde keine kontinuierliche 4D-Boden-Trajektorie angestrebt.

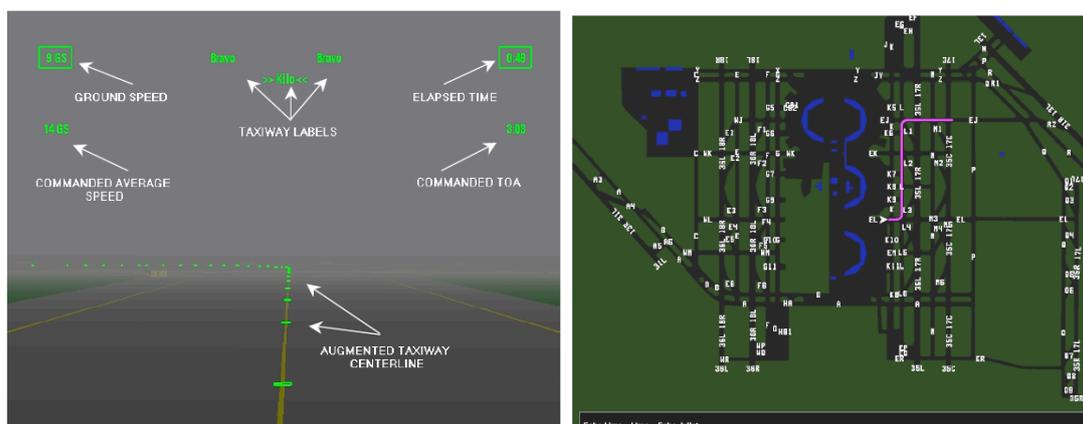


Abbildung 19: 4D-Taxi Clearances Displays [WHF06]

In [CAF09] wurde auch die manuelle Steuerung des Flugzeugs entlang der Solltrajektorie anhand einer ähnlichen HUD Darstellung wie für die Überwachung des vollautomatischen Modus untersucht. Die verfügbaren Informationen sind sowohl die tatsächlichen und geforderten Geschwindigkeiten als auch die geschätzten und geforderten Ankunftszeiten, wie für die zuvor beschriebenen Advanced NextGen PFD und ND. Hinzu kommen graphische Darstellungen der Positions- und Zeitfehler und Warnschilder für Hold Short Anweisungen (Abbildung 21).

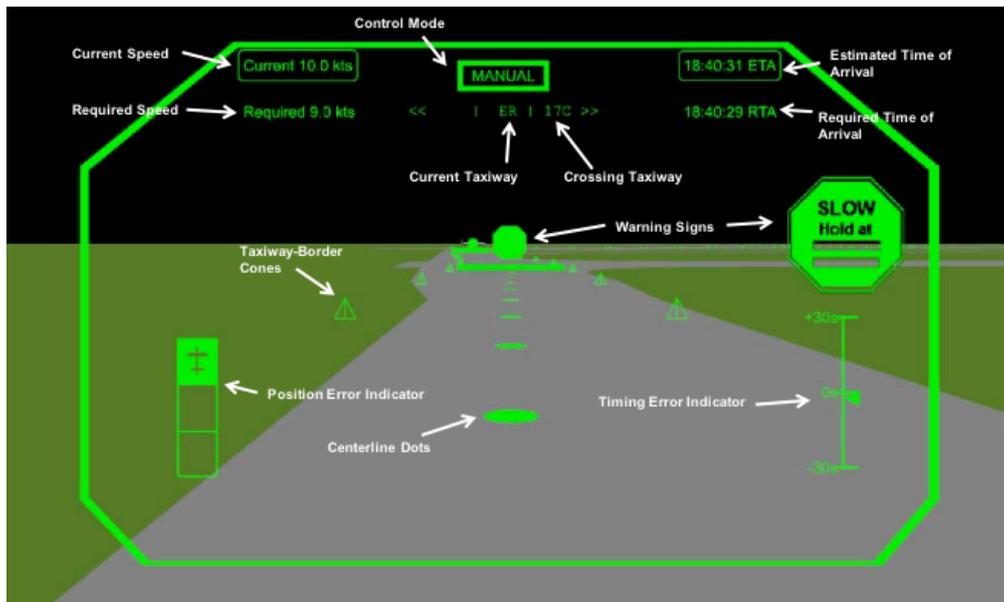


Abbildung 20: FARGO HUD Pilotenschnittstelle [CAF09]

Ziel der Untersuchung war hierbei die Anforderungen für ein solches Unterstützungssystem zu analysieren. Es wurden keine quantitativen Auswertungen der erfolgten Rollbewegungen durchgeführt, sondern nur subjektive Fragebögen durch die Piloten ausgefüllt. Hieraus ergab sich, dass die wichtigsten Elemente die textuellen Angaben der tatsächlichen und geforderten Geschwindigkeiten, sowie der tatsächlichen und geforderten Ankunftszeiten darstellten.

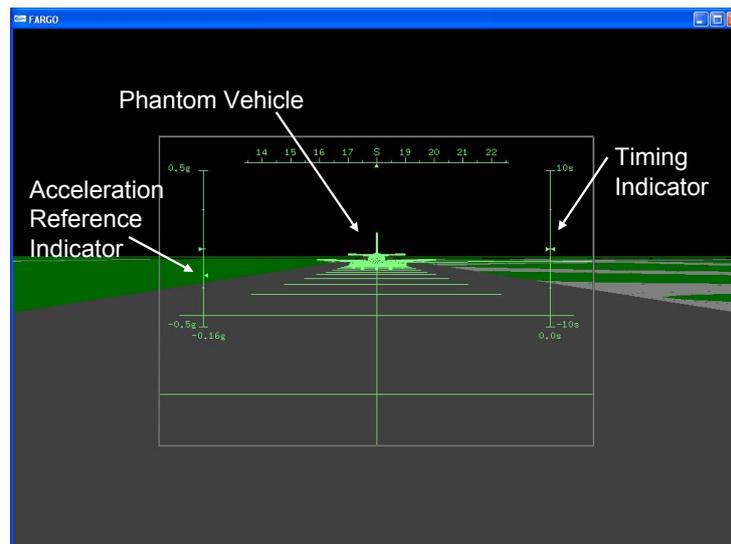


Abbildung 21: Experimentelle FARGO HUD Pilotenschnittstelle [Che04]

Ein weiteres Entscheidungsunterstützungssystem für das zeitlich geführte Rollen stellt das „Phantom Vehicle“ aus der SOAR Entwicklung dar [Che04]. Hierbei wird auf dem HUD in Abbildung 21 ein virtuelles Flugzeug, das „Phantom Vehicle“ vor dem Ownship – die eigene Position – entlang der geforderten Taxiroute dargestellt. Die Entfernung zwischen Ownship und Phantom Vehicle wird an eine konstante Zeit ( $t_0$ ) gebunden, die in experimentellen Untersuchungen ermittelt wurde, wie in [Che03] beschrieben. Entsprechend wird das Phantom Vehicle an der Position entlang der Solltrajektorie zum Zeitpunkt  $t + t_0$  dargestellt.

Dieses System stellt eine vorübergehende Lösung für das Flight-deck Automation for Reliable Ground Operation (FARGO) Teilsystem von SOAR dar, bevor die angestrebten volle Auto-Rollen Funktionalitäten in den Flugzeugen verfügbar sind.

### Zusammenfassung 4D-Rollprozesse

Zur Ermöglichung von hochgenauem 4D-Rollen wurden bereits mehrere Ansätze erforscht. Zum einen wird die stark intrusive Lösung einer kompletten Automatisierung der Rollaufgabe in beiden Flugverkehrsmanagementvorhaben SESAR und NextGen angestrebt. Die Grenzen einer solchen Vollautomatisierung der Rollphase werden im folgenden Kapitel (2.2) erläutert. Zum anderen wird die komplett non-intrusive Lösung einer Berücksichtigung von präzidierten Rollzeiten in der Planung der 4D-Trajektorien untersucht. Diese ermöglicht jedoch nur bedingt genaues 4D-Rollen, da die Piloten nicht über Abweichungen informiert werden und somit nicht aktiv an der Einhaltung einer Solltrajektorie beteiligt werden.

**Tabelle 1: Zusammenfassung 4D-Rollführungsunterstützungssysteme**

<b>Schnittstelle</b>	<b>Ansatz</b>	<b>Zeitliche Führung</b>
<b>HDD</b>	Drive Director	Graphisch
	Advanced NextGen PFD und Taxi ND	Textbasiert
<b>HUD</b>	4D-Taxi Clearances Displays	Textbasiert
	NextGen: FARGO HUD Phantom Vehicle Darstellung (manueller Modus)	Graphisch
	NextGen: FARGO HUD Pilotenschnittstelle (manueller Modus)	Kombiniert

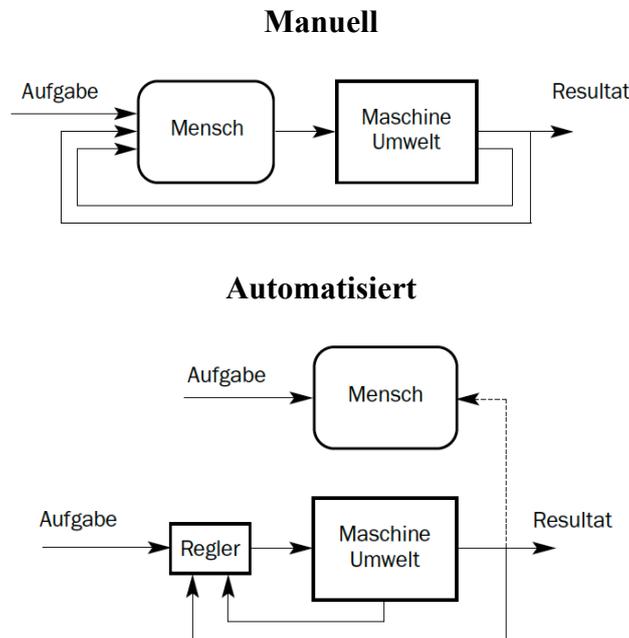
Den dritten Ansatz stellen die Entscheidungsunterstützungssysteme aus Tabelle 1 dar. Hierbei wird die Cockpitbesatzung anhand einer Schnittstelle im Head-Down oder im Head-Up Bereich entlang der 4D-Solltrajektorie visuell geführt. Die räumliche Führung wurde stets graphisch abgebildet – meistens auf einer beweglichen Flughafen Karte auf dem ND – während die zeitliche Führung textbasiert – Geschwindigkeit- und/oder Zeitansage – oder graphisch erfolgte. Nur im Fall der experimentellen Phantom Vehicle Darstellung des FARGO Programms wurden räumliche und zeitliche Führungen integriert dargestellt. Jedoch ist die Verwendung einer zeitlichen Konstante zur Steuerung der Position des Phantom Vehicle auf der Solltrajektorie fraglich. Die Entwicklung wurde später eingestellt mit der getrennten FARGO HUD Darstellung in Abbildung 20. Des Weiteren stellen beide FARGO HUD Darstellungen lediglich eine vorübergehende Lösung eines manuellen Modus dar, bevor der angestrebte vollautomatisierte Ansatz, bei dem die Flugzeuge selbständig die geforderten Routen abrollen werden, technisch möglich ist.

## 2.2. Grenzen der Automatisierung

Die Automatisierung wurde schon Ende der 70er Jahren als mögliche nächste Gefahr in der Luftfahrt wahrgenommen [Edw77]. Im Laufe der Jahre haben sich Anzeichen für verschiedene Probleme gezeigt, die mit wachsender Automatisierung auftreten. Eine ausführliche Zusammenfassung und Analyse dieser Thematik ist in [PR97] gegeben. Es werden hier nur die Problembereiche einer Automatisierung aufgeführt, die für die Rollaufgabe an Flughäfen relevant sind.

### 2.2.1. Definition der Automatisierung

Definition der Automation nach [WMM97]: „Vorrichtung oder System, das eine Funktion (teilweise oder völlig) erfüllt, die zuvor (teilweise oder völlig) von einem menschlichen Bediener durchgeführt wurde“. Eine Darstellung der Automatisierung ist in Abbildung 22 zu sehen.



**Abbildung 22: Blockschaltbild eines manuellen und eines automatisierten Systems nach [HT02]**

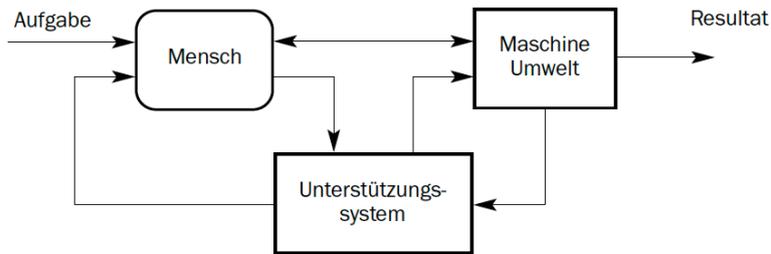
Das grundlegende Problem bei der Automatisierung eines bestehenden Systems ist die Frage welche Funktionen automatisiert werden sollen. Schon 1951 hat Fitts die erste MABA-MABA (Men are better at – Machines are better at) Liste erstellt mit einer Zuweisung von Grundfunktionen, jeweils zum Menschen und zur Maschine [Fit51]. Zwar ist der technische Fortschritt in den letzten Jahren so weit fortgeschritten, dass die meisten Einträge der Liste nicht mehr zutreffen, jedoch bleibt die Funktionsallokation ein zentrales Problem bei der Auslegung einer Automatisierung. Diese Festlegung der Funktionsteilung erfolgt nach wie vor nach dem selben Prinzip: „die Aufgaben den Menschen zuweisen, für die er am besten geeignet ist, und die Aufgaben der Maschine zuweisen, für die sie am besten geeignet ist“ [She95].

Die MABA-MABA Liste in Tabelle 2 zeigt eine aktualisierte Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass viele Funktionen, die den Menschen zugewiesen sind, sowohl auf seine Fähigkeit unerwartete Ereignisse zu erfassen (Punkte 1, 5, 6, 7), als auch auf diese zu reagieren (Punkte 2, 3, 10, 11), hindeuten. Diese Fähigkeit ist in der Luftfahrt und insbesondere für die Phasen am Boden von großer Bedeutung.

**Tabelle 2: Beispiel einer aktuellen MABA-MABA Liste aus [Hoy90] nach dem Prinzip aus [Fit51]**

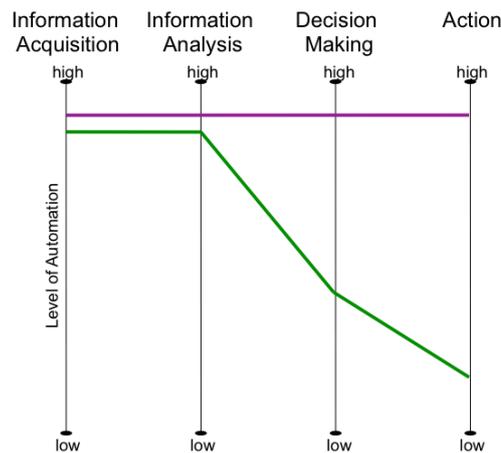
FUNKTIONEN, DIE DER MENSCH BESSER BEWÄLTIGT ALS DIE MASCHINE	FUNKTIONEN, DIE EINE MASCHINE BESSER BEWÄLTIGEN KANN ALS EIN MENSCH
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Detektion energetisch sehr schwacher Signale und deren Verstärkung;</li> <li>2. Flexibilität und Improvisation (schnelles Finden einer Alternativlösung);</li> <li>3. Wechsel von einer bestimmten Strategie zu einer anderen (Übergang zu einer anderen Lösung);</li> <li>4. Langfristiges Behalten von großen Informationsmengen (<math>2,8 \times 10^{20}</math> bit, nach Neumann) und schnellerer Suchvorgang;</li> <li>5. Räumliche Wahrnehmung (Wahrnehmung von Raumtiefe und Formen);</li> <li>6. Interpolation (Bestimmung der Werte zwischen fixen Punkten bzw. Werten);</li> <li>7. Prädiktion und Antizipation (Vorhersage weiterer Entwicklung in logisch schwer definierbaren Bedingungen);</li> <li>8. Induktive Urteilsprozesse (Verallgemeinerung) bzw. Bildung einer Ansicht;</li> <li>9. Realisierung homöostatischer Prozesse (Beibehalten einer stabilen Lage bei Änderung der äußeren Bedingungen);</li> <li>10. Adaptation und Lernen;</li> <li>11. Durchführung komplexer Entscheidungen; Lösung komplizierter unvollkommen definierter Situationen bzw. unvorhergesehener Situationen;</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lösung einfacher arithmetischer Aufgaben mit großer Geschwindigkeit, Fähigkeit zu sehr schnellen Reaktionen (<math>10^{-6} - 10^{-7}</math> s);</li> <li>2. Differenzierung, d.h. Durchführung der mathematischen Operation <math>d/dt</math>;</li> <li>3. Integrierung, d. h. Durchführung des Integrals einer Funktion;</li> <li>4. Einsatz großer Kraft oder Leistung bei großer Präzision und genau definiertem Ablauf (bei der Maschine ist die Leistung im Praxisbezug unbeschränkt);</li> <li>5. Exakte Wiederholung bestimmter Prozesse nach einem vorgegebenen Programm über einen beliebigen Zeitraum;</li> <li>6. Langfristige Wachsamkeit, keine Ermüdungserscheinungen;</li> <li>7. Kurzzeitiges Behalten einer Information, kurzzeitige Speicherung;</li> <li>8. Durchführung von komplexen simultanen Funktionen mit großer Geschwindigkeit bzw. nach genauer zeitlicher Abfolge;</li> <li>9. Deduktive Urteilsprozesse;</li> <li>10. Einfache Entscheidungen vom Typ ja-nein mit großer Geschwindigkeit (allerdings mit weniger Möglichkeit, die Ergebnisse zu korrigieren);</li> <li>11. Detektion von Signalen, deren Qualität mit den menschlichen Sinnesorganen nicht wahrgenommen werden kann, mit wesentlich größerer Genauigkeit, als dies der Mensch in seinem Bereich kann.</li> </ol>

Es gibt jedoch zwischen der kompletten Zuweisung einer Aufgabe, entweder zum Menschen oder zur Maschine, eine dritte Möglichkeit: ein Unterstützungssystem (s. Abbildung 23). Dieses wird definiert als „ein informationsverarbeitendes technisches Gebilde, das die Aufgabenerfüllung eines Operateurs in einem Mensch-Maschine-System dadurch fördert, dass es bestimmte, für seine Zielerreichung notwendige, Teilaufgaben innerhalb seiner Gesamtaufgabe übernimmt und/oder ausführt“ [HT02].



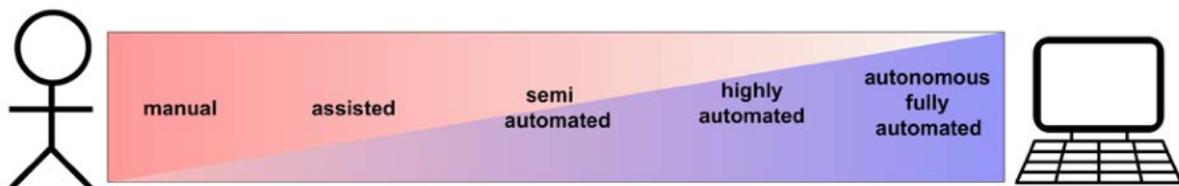
**Abbildung 23: Blockschaltbild eines unterstütztes Systems [HT02]**

Zur Klassifizierung solcher Unterstützungssysteme wurde, basierend auf einem einfachen vierstufigen Modell der menschlichen Informationsverarbeitung, die Informationsaufnahme, die Informationsanalyse, die Entscheidungsfindung, und die Ausführung der Handlung, in [PSW00] das in Abbildung 24 dargestellte Modell definiert. Die vier Stufen der Informationsverarbeitung entsprechen demnach vier Funktionsklassen der Automatisierung.



**Abbildung 24: Klassifizierung von Automatisierung nach [PSW00]**

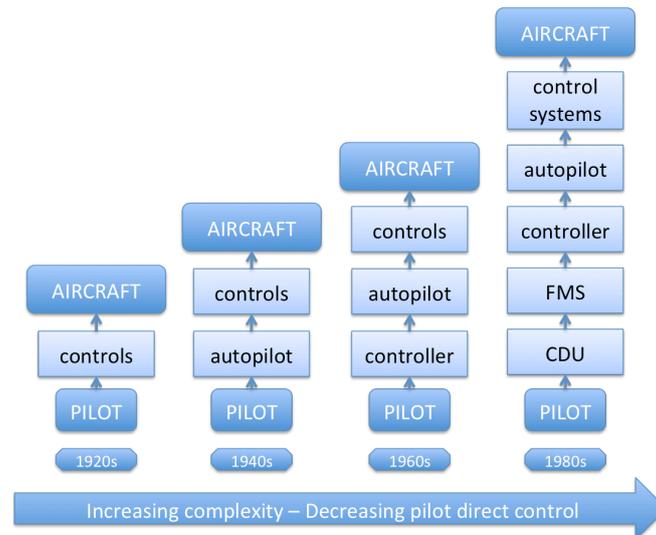
In jeder dieser Funktionsklassen kommen unterschiedliche Automatisierungsgrade zum Tragen. Diese Automatisierungsgrade stützen sich auf Taxonomien der Automatisierung, wie in [SV78] vorgestellt mit zehn Graden (sog. „levels of automation – LOAs“). Auf Stufe Eins bietet der Computer keinerlei Hilfe an, der Mensch muss die ganze Arbeit alleine verrichten, während auf der letzten Stufe der Computer selbstständig die Methode auswählt, die Aufgabe ausführt und den Menschen dabei ignoriert. Der jeweilige Automatisierungsgrad lässt sich auch vereinfacht nach dem in [FKL07] vorgestellten Spektrum anordnen (s. Abbildung 25).



**Abbildung 25: Automatisierungsspektrum nach [FKL07]**

Die Auswahl des Automatisierungsgrads der jeweiligen Funktionsklassen wird entsprechend der Aufgabenart und Bedingungen vorgenommen. Eine adaptive Automatisierung kann durch dieses Modell ebenfalls beschrieben werden: mit einer dynamischen Anpassung des Verlaufs der Automatisierungsgrade nach verschiedenen Bedingungen.

Die rasche Entwicklung der Automatisierung in der Luftfahrt in den letzten Jahrzehnten war bisher stark Technologiegetrieben. Primärer Grund für die Automatisierung einer Aufgabe war stets die „Verfügbarkeit der Technologie“ [Wie88]. Diese Entwicklung und die daraus resultierende, zunehmende Entfernung des Piloten zum zu bedienenden System wurde in [Bil96] ausführlich beschrieben und ist in Abbildung 26 deutlich zu erkennen.



**Abbildung 26: Entwicklung der Flugzeug Automatisierung nach [Bil96]**

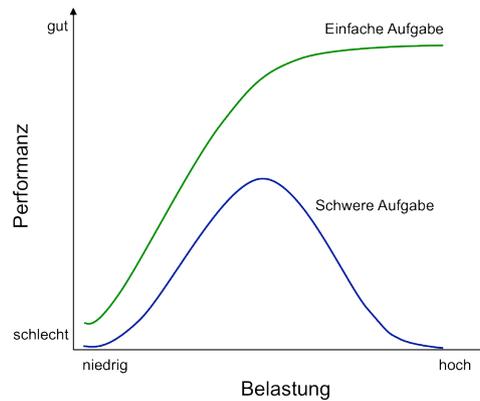
Der Pilot wird nach und nach aus dem direkten Regelkreis herausgenommen und bekommt eine neue Rolle: er wird zum Beobachter der Automatisierung. Die Rolle dieses „Supervisors“ wird ausführlich von Sheridan beschrieben [She70]. Die dadurch entstandene und immer grösser werdende „Peripherisierung des Piloten“ oder „out-of-the-loop“ Problematik wurde von Satchell identifiziert und analysiert [Sat93]. Die Konsequenzen reichen von einer abnehmender Vigilanz bis hin zu einem Verlust von Flugfertigkeiten. Insbesondere sind sog. „Überraschungen der Automatisierung“ entstanden, bei denen der menschliche Bediener einen Unterschied zwischen erwartetem und aktuellem Ergebnis seiner Eingaben erfahren hat. Dies hatten 80% der befragten Linien-Piloten in [Sar94] schon erfahren.

Im Folgenden werden einzelne Problembereiche der Automatisierung, die speziell für eine Automatisierung der Rollaufgabe relevant sind, erläutert.

### 2.2.2. Beanspruchung

Gemäß dem Yerkes-Dodson Gesetz [YD08] ist die Leistungsfähigkeiten eines Menschen durch seinen eigenen Erregungsgrad/Motivation, sowie dem Anforderungsgrad seiner Aufgabe bestimmt. Für leichte Aufgaben wächst die Leistung mit dem Erregungsgrad, für eine schwere Aufgabe wächst die Leistung bis zu einem mittleren Grad der Erregung, um dann wieder zu sinken (s. Abbildung 27).

Die aus der steigenden Automatisierung im Cockpit resultierende Verschiebung der Rolle des Piloten von einem aktiven Operator zu einem Beobachter führt zu einer Minderung seines Erregungsgrads, wobei der Anforderungsgrad der Aufgabe gleich bleibt. Laut Yerkes-Dodson entspricht das einer Minderung der Performanz des Piloten.



**Abbildung 27: Yerkes-Dodson Gesetz**

In der Tat zeigen Studien, dass der Pilot ein besserer Operator als Überwachender sein kann: In einer Expertenbefragung zu den Gefahren der Automatisierung im Flugzeugcockpit [LNL97] fanden 87% der Befragten, dass, durch die bereits in der En-Route Phase vorhandene Automatisierung, der Pilot für längere Zeit nur damit beschäftigt ist die Maschine zu überwachen, wofür er „auf Grund seiner Wahrnehmung und Kognition schlecht geeignet“ ist.

Studien zeigten bereits in den fünfziger Jahren, dass der Mensch als reiner Überwacher eines Systems schlecht geeignet ist. In [Mac50] wurde beispielsweise ermittelt, dass der Mensch, egal wie motiviert, unfähig ist mehr als 30 Minuten lang eine effektive visuelle Aufmerksamkeit auf eine Informationsquelle, in der wenig geschieht, zu behalten.

Die resultierenden Gefahren von Langeweile und complacency (deutsch: Gleichgültigkeit) wurden von der U.S. Air Transport Association (ATA) in [ATA98] hervorgehoben. Durch das sehr seltene Auftreten von Fehlern im automatisierten Cockpit nehmen die Piloten eine perfekte Zuverlässigkeit deren Arbeitsgegenstände wahr und entwickeln ein entsprechend hohes Vertrauen in diese Systeme. Ein Beispiel einer solchen automatisierungsinduzierten complacency im Cockpit wurde in [ASRS05] beschrieben: „ATC instructed us to descend from FL350 to FL340. The pilot flying set FL340 in the auto-pilot altitude window. The pilot not flying verified it and saw the pilot flying enter the new altitude in the FMS Cruise Altitude page and then push the VNAV button. We both became distracted for a couple of minutes and then ATC radioed a repeat of our clearance. We realized that the aircraft had not begun to descend as programmed... We re-learned a lesson – it’s easy to become complacent with the automation.“

### 2.2.3. Situationsbewusstsein

Die gängigste Definition von Situationsbewusstsein stammt von Mica Endsley und lautet: „die Wahrnehmung der Elemente in der Umwelt innerhalb einer bestimmten Zeit und eines bestimmten Raums, das Verstehen der Bedeutung, und die Antizipation des Status in der nahen Zukunft“ [End95]. Die verschiedenen, systembedingten sowie individuellen Einflussfaktoren auf diese drei Stufen des Situationsbewusstseins werden in Abbildung 28 dargestellt.

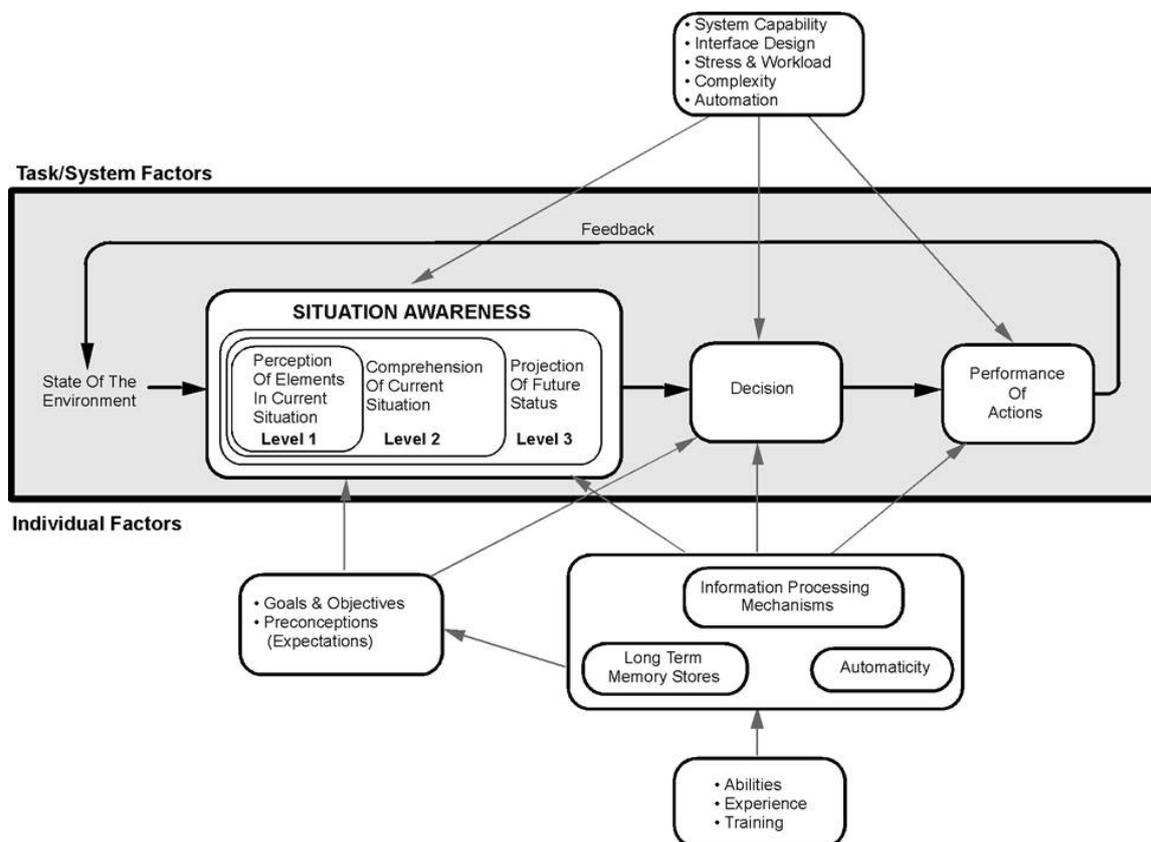


Abbildung 28: Endsleys Situationsbewusstseinsmodell [End95]

Automatisierung ist einer dieser systembedingten Einflussfaktoren und kann zu einer Verminderung des Situationsbewusstseins führen, wie von Endsley und Kiris gezeigt [EK95]. In dieser Studie wurde auch der Einfluss des Grads der Automatisierung auf die Verminderung des Situationsbewusstseins festgestellt. Den stärkeren Effekt bei der Vollautomatisierung kann insbesondere durch die resultierende komplette Verschiebung der Pilotenaufgabe vom Operator zum Beobachter erklärt werden [End99].

#### 2.2.4. Fertigkeitsverlust

Außerdem birgt der Einsatz einer Vollautomatisierung insbesondere im Ausführungsprozess die Gefahr des Fertigkeitsverlusts ("deskilling") für den bis dahin als Operator tätigen Mensch. Dieses Phänomen wird in der Luftfahrt bereits beobachtet: durch den Einsatz der Vollautomatisierung in der En-Route Phase verlieren die Piloten die Fähigkeit des manuellen Fliegens [FAA96].

Die Gefahr eines Verlusts von manuellen Flugfertigkeiten durch die Einführung von Automatisierung wurde schon 1989 von Piloten wahrgenommen [Wie89]. Eine weitere Studie zehn Jahre später zeigte ein sehr ähnliches Bild mit über 60% der Piloten, die diese Wahrnehmung teilten [HHH99], trotz der längeren Erfahrung der Probanden mit Automatisierung und die Einführung von entsprechenden Training, um deren manuellen Fähigkeiten zu bewahren. Dies verdeutlicht, dass diese Gefahr in den Entwicklungsprozess von neuen Automatisierungen betrachtet werden muss.

Dieser Verlust manueller fliegerischer Fähigkeiten wurde systematisch von 2009 an weiter untersucht. Ausschlaggebend für den Grad der Flugfertigkeit war hier die Zeit seit dem letzten manuellen Flug [Ebb09].

Der Fertigungsverlust kann insbesondere dann zu einem Problem werden, wenn der Pilot in einem Extremfall die sonst automatisierte Aufgabe manuell ausführen soll.

### 2.2.5. Dilemma der Automatisierung

Das Dilemma der Automatisierung, zuerst von Bainbridge erkannt [Bai87], liegt in der Diskrepanz zwischen der Belastung bzw. Beanspruchung des menschlichen Operators und der Unterstützung, die vom automatisierten System gewährleistet wird. In sehr vielen Fällen wird der menschliche Operator solange durch die Automatik unterstützt, bis ein unerwartetes Ereignis eintritt. Das heißt, solange seine Belastung niedrig bleibt, wird der Operator unterstützt. Die Unterstützung fällt aber genau dann weg, wenn die Belastung steigt. Die Beschreibung der derzeitigen Tätigkeit im Cockpit: „hours of boredom punctuated by moments of terror“ in [Han97] ist dafür symptomatisch.

Gepaart mit der möglichen Abnahme an Situationsbewusstsein, sowie der Gefahr des Verlusts von manuellen Fähigkeiten, kann dieses Dilemma zu einer starken Gefährdung der Sicherheit in der Luftfahrt führen. In der Tat werden so Piloten mit einem geminderten Bewusstsein für die jeweilige Lage, sowie geminderten Fähigkeiten die Flugaufgabe manuell durchzuführen, an einem kritischen Zeitpunkt gezwungen diese Aufgabe doch wieder zu übernehmen.

### 2.2.6. Verlagerung der Fehlerquelle

Durch eine Automatisierung erhofft man sich eine Verringerung des Faktors „Mensch“ als Fehlerquelle. Durch die Automatisierung von Funktionen im gesamten System wird das Risiko menschlichen Versagens jedoch nur verlagert: Operative Fehler durch den Piloten werden minimiert, während die Fehler des Systementwicklers an Bedeutung gewinnen [PR97]. Zwar können Entwicklungsfehler durch ausführliches Testen minimiert werden, jedoch sind grundlegende Designfehlern meist erst im Betrieb zu erkennen, wie das Beispiel des ersten Absturzes eines Fly-by-Wire Flugzeugs, des Air France Flug 296 in Mülhausen, eindrucksvoll zeigt. Zwar waren die wahrscheinlichen Ursachen für den Unfall Designfehler, die bereits bekannt und veröffentlicht waren (OEB 19/1 und OEB 06/2), die Piloten waren leider darüber nicht informiert worden [Rog98].

Darüberhinaus gewinnt die Qualität der Eingangsdaten, je nach Grad der Automatisierung, stark an Bedeutung. Eine komplette Automatisierung ist nur möglich in einem Kontext, in dem alle beeinflussenden Faktoren ausführlich und sicher erfasst werden können. Aus diesem Grund ist die Redundanz der Sensoren in Flugzeugen Pflicht, jedoch können hier auch auf Grund von falschen Eingangsdaten Automatisierungsfehler entstehen. Der Absturz einer Boeing 737 mit fehlerhaftem Altimeter am 25. Februar 2009 in Amsterdam war dafür ein dramatisches Beispiel [DSB10].

Für die Automatisierung der Rollaufgabe auf Flughäfen ist diese inhärente Abhängigkeit der Automatisierung an die Güte der Eingangsdaten von Bedeutung. Die wichtigsten Daten für eine solche Automatisierung sind die Ortungs- und Überwachungsdaten. Diese sind Typ-, Positions- und Geschwindigkeitsinformationen für alle Flug- und Fahrzeuge auf dem Vorfeld.

**Tabelle 3: Ortungs- und Überwachungsquellen nach DO-242A [RTCA02]**

	<i>Unabhängig</i>	<i>Kooperativ</i>
Primary Surveillance Radar (PSR)	Ja	Nein
Secondary Surveillance Radar (SSR)	Ja	Ja
Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B)	Nein	Ja

Ortungs- und Überwachungsdaten haben zwei hauptsächliche Charakteristiken: Unabhängigkeit und Kooperation. Das erste Kriterium gibt die Quelle der Daten an: Wenn das System die Daten selbstständig erfasst, wird es unabhängig genannt. Wenn das System bereits erfasste Daten, beispielsweise von dem zu überwachenden Objekt anhand von GPS Ortungssystemen, nur empfängt, wird es abhängig genannt. Das zweite Kriterium gibt an, ob das System die Daten komplett selbstständig erfasst (nicht kooperativ) oder die Anwesenheit einer besonderen Technik an Bord des zu erfassenden Objektes benötigt (kooperativ). Ein Überblick der verfügbaren Daten und deren Charakteristiken wird in Tabelle 3 gegeben.

Teil der Ortungs- und Überwachungsdaten an Flughäfen wird in der Zukunft auf abhängigen, kooperativen Daten, wie die des ADS-B Systems, basieren [RTCA02]. Die Automatisierung wäre dann ebenso auf Daten angewiesen, die eine ausführliche Erfassung des Rollverkehrs nicht gewährleisten können. Objekte, die fehlerhafte Ortungsdaten an das System übertragen, werden falsch erfasst und alle Flug- und Fahrzeuge, die nicht die notwendige Ausrüstung ausweisen, werden gar nicht vom System erkannt.

Darüberhinaus hängt das Rollen auf dem Flughafen auch von Daten ab, die nie von einem Überwachungssystem erfasst werden können, z.B. freiliegende Gepäckstücke, Plastiktüten, die nicht in die Turbinen gelangen dürfen, usw.

### 2.3. Rollführung mit Rollwegbefeuerungselementen

Rollwegbefeuerungselemente sind auf allen Abrollwegen, Enteisungsanlagen und Rollwegen, die unter einer Runway Visual Range (RVR, dt. „Sichtweite über der Landebahn“) niedriger als 350m betrieben werden, laut [ICAO04a] § 5.3.15.1, Vorschrift. Der longitudinale Abstand zwischen den Elementen ist ebenfalls reglementiert (§ 5.3.15.11) auf maximal 30m auf einer geraden Strecke und gemäß Tabelle 4 in Kurven. Die Rollbahnmittellinienfeuer strahlen die Farbe Grün, während die Rollbahnrandfeuer Blau abstrahlen. Die resultierende Rollbahnbeleuchtung ist in Abbildung 29 dargestellt.

**Tabelle 4: Abstand zwischen Rollwegbefeuerungselementen nach [ICAO04a]**

<b>Kurvenradius</b>	<b>Abstand zwischen zwei Elementen</b>
Bis zu 400 m	7,5 m
401 m bis 899 m	15 m
900 m oder größer	30 m

Diese grünen Mittellinienfeuer können auch zum Zweck der Rollführung eingesetzt werden, um den Piloten die Taxiroute visuell darzustellen. Dieses System, genannt nach der dazu gängigen Lotsenanweisung „Follow the Greens“, ist bereits in mehreren Flughäfen vorhanden. Erweiterungen im Rahmen vom Advanced-Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) wurden ebenfalls untersucht.

#### 2.3.1. „Follow the Greens“

Das „Follow the Greens“ System ist ein Rollfeld-Befeuerungssystem auf Flughäfen, das den Luftfahrzeugen anhand grüner Rollwegbefeuerungselemente den korrekten und geforderten Rollweg signalisiert [MHV98]. Das System ist als Teil des allgemeinen Surface Movement Guidance and Control Systems (SMGCS) eines Flughafens implementiert und nutzt hierzu die von der ICAO geforderten Rollbahnbeleuchtungselemente, die in Abbildung 29 veranschaulicht sind.

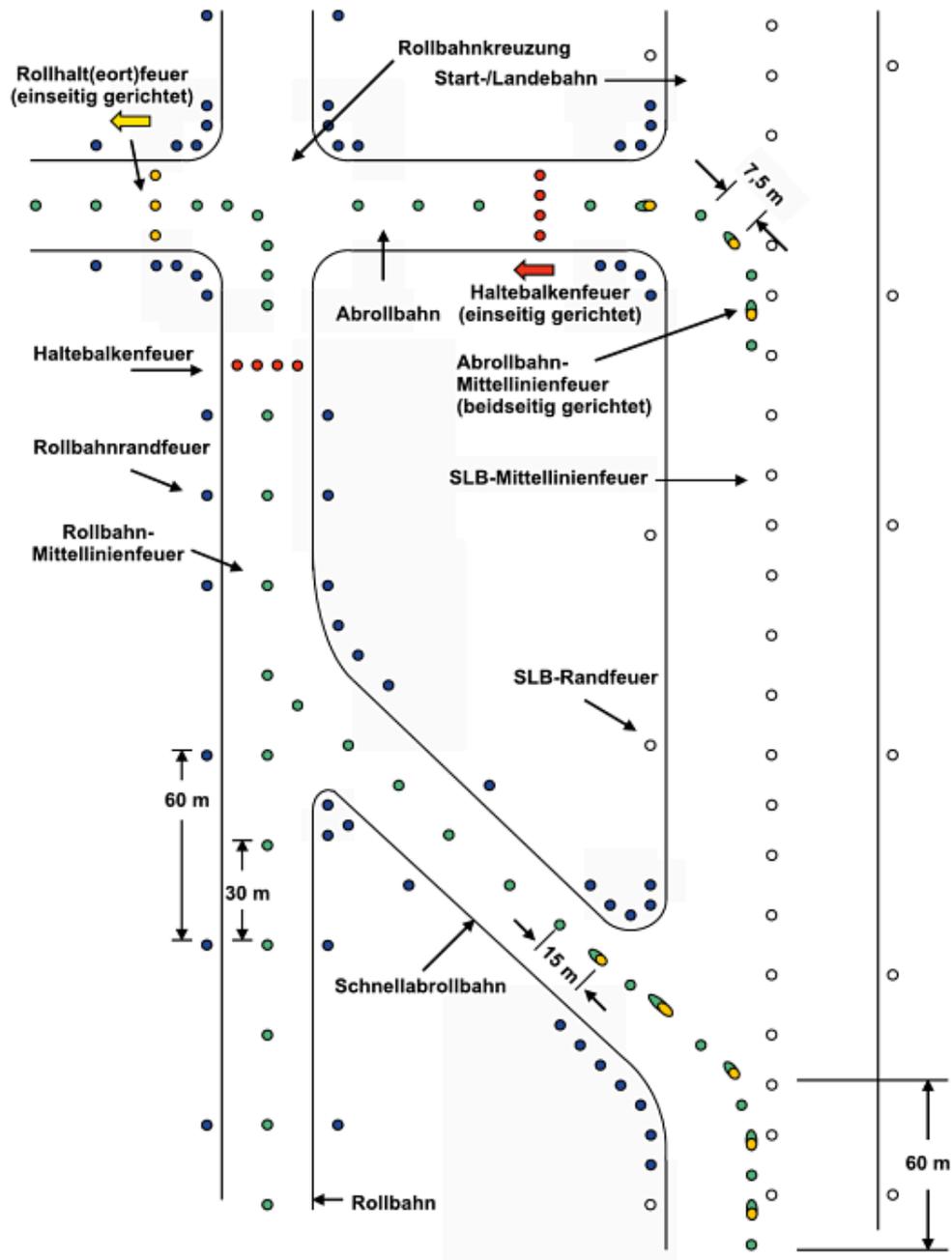


Abbildung 29: Rollbahnbeleuchtung [Men07]

Eine erste Implementierung des Systems gibt es am Flughafen Heathrow in London. Hierbei werden bei Schlechtwetterverfahren (eng.: Low Visibility Procedures - LVP) sowie nachts die grünen Rollwegbefeuerungselementen zur Führung der Luftfahrzeuge benutzt. Die Lampen werden segmentweise bis zu einem roten Stopbar quer zum Rollweg angeschaltet. Die grüne Linie zwischen Ownship und dem nächsten roten Stopbar stellt die jeweilige freigegebene Route dar [CJV05]. Eine Lotsenanweisung wird dann nur am Anfang mit der Angabe des Ziels und „Follow the Greens“ gegeben. Im Falle einer Lotsen Halteanweisung soll die Cockpitbesatzung diese Anweisung trotz weiterführenden grünen Lampen befolgen [NATS10].

In den Unterlagen zum Heathrow Flughafen werden die Crew Mitglieder darauf hingewiesen, dass der Pilot weiterhin selbstständig sicherstellen muss, dass genügend Freiraum für die gesamte Breite des Flugzeugs während des gesamten Rollverfahrens besteht – „wing tip

clearance“. Das Rollwegbefeuerungssystem stellt lediglich eine Hilfe für die Piloten auf dem Rollfeld während Nacht oder LVP Bedingungen dar. Die extreme Wichtigkeit während des Rollens sorgfältig Ausschau zu halten, wird entsprechend hervorgehoben [UA09].

Ein ähnliches System ist ebenfalls am Flughafen Gatwick zu finden [UA10].

Am Flughafen Singapur Changi wird das Rollbahnbefeuerungssystem „Taxiway Control System“ seit 1984 betrieben. Dieses ermöglicht eine „direktionelle Führung“ der rollenden Flugzeuge entlang des Rollweg-Systems. Die Piloten werden hierbei ausdrücklich darauf hingewiesen, das Flugzeug weiterhin anhand von Markierungen und Taxischilddern zu führen [CAAS05]. Dieser Hinweis ist möglicherweise eine Reaktion auf den Unfall, untersucht in [MTS04], der während des Einsatzes dieses Beleuchtungssystems geschehen ist.

### 2.3.2. Einsatz von Rollwegbefeuerungselementen zur Optimierung der Rollphase

Eine erste Entwicklung zur Optimierung der Rollphase stellt das Advanced-Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) dar. Dieses System sieht eine systematische Erweiterung von automatisierten Unterstützungen der wichtigsten Teilnehmer der Rollphase, d.h. Lotsen, Cockpit- und Fahrzeugbesatzung, in den folgenden vier Basisaufgaben vor:

- Verkehrslageerfassung (Surveillance),
- Kontrolle (Control),
- Routenplanung (Route Planning) und
- Rollführung (Guidance)

wie in Abbildung 30 dargestellt.

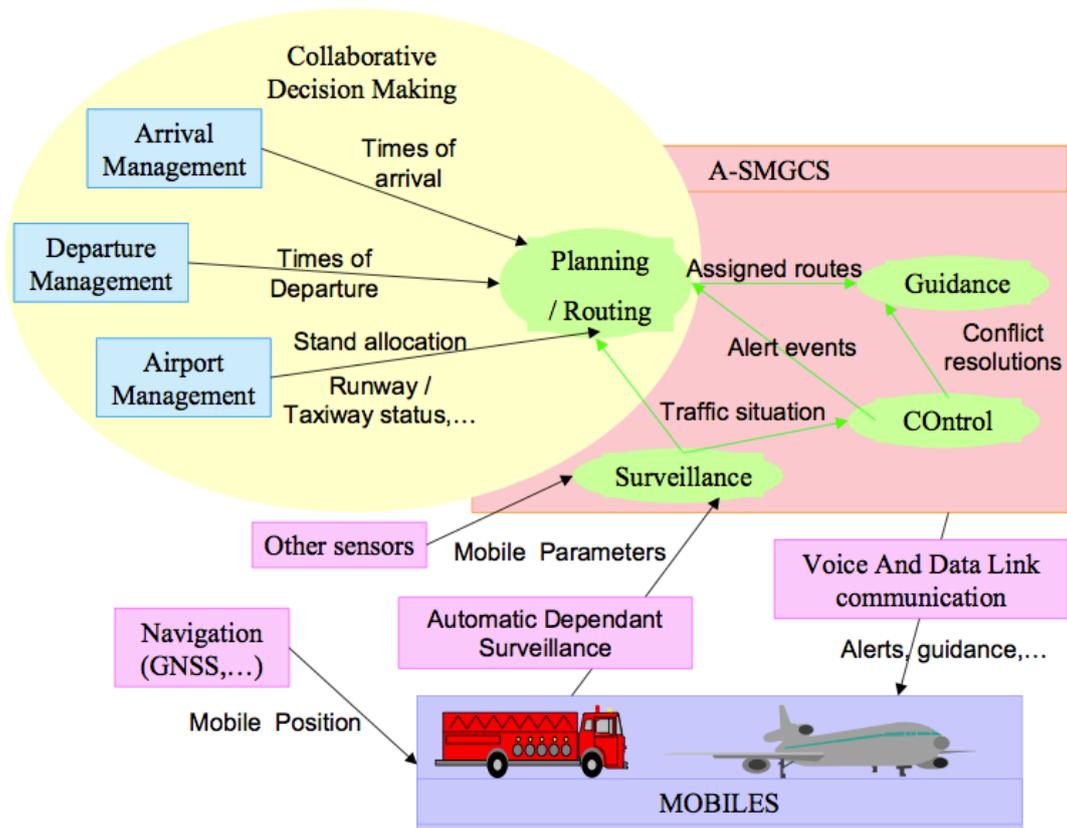


Abbildung 30: Komponenten von A-SMGCS [EC03]

In der letzten Ausbaustufe des A-SMGCS Systems ist eine Automatisierung in der Routenplanung und eine Unterstützung in der Rollführung anhand von Bodensignalen, wie beispielsweise die Stopbars, geplant [EC05]. Der Einsatz von Rollwegbefeuerungselementen in dem A-SMGCS wurde erforscht im deutschen Vorhaben wettbewerbsfähiger Flughafen (WFF), im amerikanischen Advanced Taxiway Guidance System (ATGS), sowie im europäischen Projekt Demonstration Facilities for Airport Movement Management System (DEFAMM).

#### Projekt WFF – Wettbewerbsfähiger Flughafen

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundvorhabens „Wettbewerbsfähiger Flughafen“ (WFF) wurden im Cluster 2, Rollverkehr Management- und Optimierungssysteme, in drei Teilprojekten bord- und bodenseitige Systeme zur Rollführungsunterstützung (weiter-) entwickelt, integriert, verknüpft und optimiert. Ziel des Verbundvorhabens war es, durch eine Optimierung der Prozesse an deutschen Flughäfen den Anforderungen zu begegnen, die sich aus dem künftig erwarteten Wachstum des Flugverkehrs ergeben.



**Abbildung 31: Versuche am Frankfurter Flughafen mit dem WFF System [Oeh10]**

Hierbei wurde insbesondere die Anwendbarkeit dynamisch geschalteter Rollfeldbefeuerung zur räumlichen Führung der Luftfahrzeuge geprüft. Eine konstante, zum Flugzeugtyp angepasste, Länge von Rollwegbefeuerungselementen wurde vor dem Flugzeug entlang der von Lotsen festgelegten Taxiroute angeschaltet.

Dies wurde, zusammen mit der Darstellung der gesamten Taxiroute auf eine Airport Moving Map (AMM), im Rahmen von Feldtests am Frankfurter Flughafen evaluiert. Die vorhandenen Befeuerungselemente auf den ausgewählten Rollwegen wurden anhand der Airfield Ground Lighting Automation System (AGLAS) Technologie (s. Kapitel 0) so ergänzt, dass eine Steuerung der einzelnen Elemente möglich war. Das gesamte WFF System wurde zunächst durch Piloten in Navigationsbussen evaluiert, um anschließend Versuche an Bord eines A320 Testflugzeugs durchzuführen. Hierbei wurde die Unterstützung durch die Befeuerungselemente als ideal für die Aufnahme von taktischen Informationen eingeschätzt,



### **2.3.3. Grenzen bisheriger Ansätze**

Alle Ansätze dienen ausschließlich der räumlichen Führung der Luftfahrzeuge während der Rollphase und zielen somit hauptsächlich auf eine Verbesserung dieser Phase im Hinblick auf die momentan verwendeten Prozesse. Eine Reduzierung der Beanspruchung der Piloten, eine Verbesserung des Situationsbewusstseins, sowie ein etwas schnelleres Rollen wurden dabei festgestellt.

Die Einbindung zukünftiger Rollprozesse, insbesondere mit Einbeziehung der zeitlichen Komponente, sei es diskret, an bestimmten Punkten entlang der Taxiroute, oder kontinuierlich, in der Rollführung anhand von Rollwegbefeuerungselementen, wurde bisher nicht untersucht. Eine zeitliche Optimierung des Rollflusses wurde ebenfalls nicht erzielt.



### 3. Konzeption eines 4D-Rollführungssystems

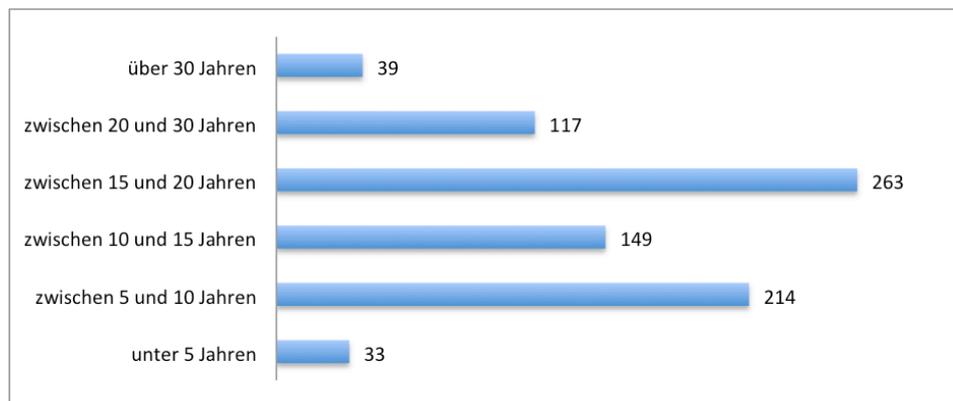
Die in Kapitel 2.1 dargestellten Systeme zur Umsetzung von 4D-Trajektorien am Boden setzen auf die Vollautomatisierung der Rollphase. Um die in Kapitel 2.2 beschriebenen Gefahren einer solchen Vollautomatisierung zu vermeiden, wird in diesem Kapitel ein Konzept aufgezeigt, das die Umsetzung von 4D-Trajektorien auf dem Rollfeld ohne Vollautomatisierung ermöglicht.

#### 3.1. Anforderungen

Im folgenden Abschnitt werden die Anforderungen an ein 4D-Rollführungssystem bezüglich dem Ausrüstungsgrad, dem Automatisierungsgrad, der Vermittlungsart, dem Vermittlungsort und der Gebrauchstauglichkeit erläutert.

##### 3.1.1. Ausrüstungsgrad

Die Optimierung des Verkehrsflusses am Flughafen anhand von 4D-Trajektorien kann nur erreicht werden, wenn möglichst alle Teilnehmer die Trajektorien einhalten [ABY08]. Darüberhinaus ist ein solches System erst ab einer gewissen Komplexität des Flughafens und Verkehrsaufkommen notwendig. Insofern sind vor allem große internationale Hub-Flughäfen die wahrscheinlichsten Benutzer eines optimierenden 4D-Rollführungssystems. Auf solche Flughäfen ist die Heterogenität der Flugzeuge sehr groß mit einer großen Bandbreite an Ausrüstungsgraden, wie die Verteilung der Flugzeugflotte von Delta Air Lines nach dem Durchschnittsalter der Maschinen in Abbildung 33 zeigt.



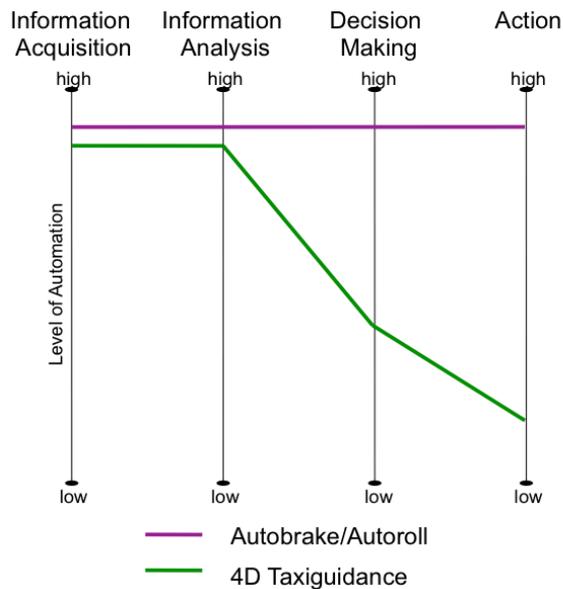
**Abbildung 33: Flugzeugflotte von Delta Air Lines nach Durchschnittsalter der Maschinen nach [DA10]**

Folglich ist die, für die Optimierung notwendige, Einbindung aller Rollverkehrsteilnehmer nur anhand eines ausrüstungsgradunabhängigen Systems, das die erforderliche Rückwärtskompatibilität gewährleistet, zu erreichen.

##### 3.1.2. Automatisierungsgrad

Die Einhaltung der berechneten optimalen 4D-Trajektorien aller Flugzeuge wurde bis jetzt hauptsächlich anhand von vollautomatisierten Systemen untersucht. Die Grenzen solcher Ansätze wurden in Kapitel 2.2 ausführlich untersucht. Gemäß der Taxonomie der Automatisierung von Parasuraman (s. Kapitel 2.2.1: Informationsaufnahme, Informationsanalyse, Entscheidungsfindung und Ausführung der Handlung), können diese Grenzen durch die gezielte Einschränkung der Automatisierung auf die drei ersten Ebenen stark reduziert werden. Das heißt, das System soll den Pilot durch die Darstellung der für die

Ausführung der 4D-Rollanweisungen notwendigen Informationen in der Phasen der Informationsaufnahme, der Informationsanalyse und der Entscheidungsfindung unterstützen. Ein solches Unterstützungssystem überlässt die tatsächliche Ausführung der Handlung, das tatsächliche Rollen auf dem Flughafen, dem Piloten (s. Abbildung 34).



**Abbildung 34: Automatisierungsstufen für die Vollautomatisierung und für das vorgestellte Konzept. Darstellung nach [PSW00]**

Somit behält der Pilot eine aktive Rolle, die eine etwaige Langeweile, Selbstgefälligkeit und Fertigsverlustr verhindert. Darüberhinaus ist der Pilot durch diese aktive Rolle in der Lage auf unerwartete oder vom System nicht erfasste Ereignisse zu reagieren.

Aufgrund der herrschenden hohen Heterogenität an Verkehrsteilnehmern (Verkehrsflugzeuge, Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt, Fahrzeuge der Flugsicherung, Feuerwehrrfahrzeuge, Gepäckträger, ...) und der entsprechenden Heterogenität der Ausrüstung für die Erfassung der jeweiligen Positionen, ist eine komplette Erfassung des Bodenverkehrs nicht zu gewährleisten. Mit einem Entscheidungsunterstützungssystem, in dem der Pilot als ausführende Agent dient, können etwaige, resultierende Gefahren aus der lückenhaften Verkehrserfassung vermieden werden.

#### 3.1.3. Vermittlungsart

Um die Anforderungen an die Art der Vermittlung der benötigten Information zur 4D-Rollführung zu ermitteln, werden zunächst einige Grundlagen der menschlichen Informationsverarbeitung erläutert. Hierbei handelt es sich um die mentalen Prozesse, die zwischen der Informationsaufnahme und der Reaktion des Menschen stattfinden. Diese Prozesse wurden in unterschiedlichen Modellarten repräsentiert:

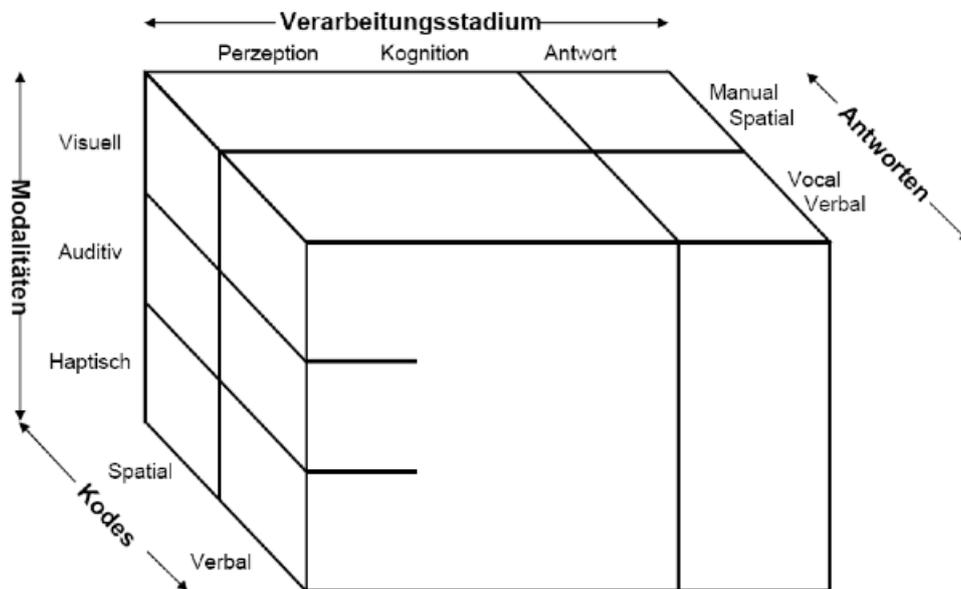
- Stufenmodelle – serieller Durchlauf von Verarbeitungsstufen,
- Ressourcenmodelle – hier wird eine oder mehrere beschränkte Kapazitäten, die für die mentalen Prozesse zur Verfügung stehen, angenommen – und
- kombinierte Stufen- und Ressourcenmodelle.

Eine ausführliche Beschreibung aller Modelle wird in [SBL10] Kapitel 3.3.1 gegeben.

Zur Auswahl der geeigneten Vermittlungsart eines 4D-Rollführungssystem ist das in Abbildung 35 dargestellte Modell von multiplen Ressourcen nach [Wic84] besonders aufschlussreich. Demnach stehen mehrere Ressourcen für die Informationsverarbeitung zur

Verfügung. Diese Ressourcen können nach drei Dimensionen der Wahrnehmungsmodalität (visuell, auditiv, haptisch), Art der Kodierung (räumlich, verbal) und Verarbeitungsstadium (Perzeption, Kognition, Antwort) unterschieden werden. Eine gleichzeitige Nutzung der jeweiligen Ressourcen ohne gegenseitige Beeinflussung wird dabei angenommen.

Im Folgenden werden die Anforderungen an die Art der Kodierung der Information, sowie an die Wahrnehmungsmodalität dargestellt.



**Abbildung 35: Struktur der Verarbeitungsressourcen nach [Wic84] erweitert in [Ger09]**

### Wahrnehmungsmodalität

Die nötige Information für genaues 4D-Rollen am Flughafen beinhaltet sowohl die räumliche Führung entlang der Rollwege, als auch die zeitliche Führung. Beide Informationen müssen den Piloten ständig dargestellt werden.

Für die räumliche Führung ist eine ständige Darstellung teilweise bereits in der Infrastruktur des Flughafens vorhanden, insbesondere mit der Rollwegmittellinie. Somit ist eine punktuelle Mitteilung der jeweiligen Ereignisse – Rollwegwechsel oder Halteanweisungen – entlang der Route ausreichend. Dagegen muss die zeitliche Führung dem Piloten kontinuierlich dargestellt werden.

Im Cockpit werden grundsätzlich drei Wahrnehmungskanäle benutzt, um Informationen an den Piloten weiterzugeben:

- der optische bzw. visuelle Kanal,
- der taktile bzw. haptische Kanal und
- der akustische bzw. auditive Kanal.

Hierbei wird der akustische Kanal gezielt nur für sporadische Ereignisse wie beispielsweise Warnungen eingesetzt. Dieses folgt dem in der Luftfahrt gängigen Flight Deck Gestaltungsprinzip: „dark and quiet cockpit“. Solange alle Systeme gut funktionieren und keine besonderen Ereignisse erkannt worden sind, werden keine Lichter angeschaltet und keine akustischen Meldungen gegeben. Der taktile Kanal wird zur Rückmeldung über die Kräfte, die während des Fluges auf das Flugzeug wirken, benutzt, beispielsweise über das Steuerhorn, den Seitenknüppel (engl: Sidesticks) oder den Schubhebel mit Krafrückkopplung (engl.: Force Feedback). Die meisten Informationen werden jedoch über den vorherrschenden Kanal – die visuelle Wahrnehmung [PNK76] vermittelt. Dies gilt sowohl für Warnungen als

auch für Status und Lage Informationen. Eine Zusammenfassung der eingesetzten Wahrnehmungskanäle nach Informationsart im Cockpit wird in Tabelle 5 gegeben.

**Tabelle 5: Wahrnehmungskanäle nach Informationsart im Cockpit**

<i>Kommunikationskanal</i>	<i>Informationsart</i>		
	Ereignis	Zustand	Ständige Aktion
Optischer Kanal	✓	✓	✓
Taktischer Kanal		✓	✓
Akustischer Kanal	✓		

Für die Vermittlung der zeitlichen Führungsinformation, die eine ständige Rückmeldung an den Piloten benötigt, kommen demnach entweder der optische oder der taktische Kanal in Frage. Gemäß des Proximity Compatibility Principle (PCP – Kompatibilitätsprinzip der Nähe) [WC95] wird der taktische Kanal jedoch stets für die Handlungsrelevanten Steuereinheiten eingesetzt. Zur Steuerung der Geschwindigkeit beim Rollen können jedoch zwei Steuereinheiten benutzt werden: den Schubhebel und die Bremsen. Folglich wird hier eine optische Vermittlungsart für die zeitliche Führung gewählt.

Für die Vermittlung der räumlichen Führungsinformation können entweder der optische Kanal benutzt werden – Ereignis basierte Führung (textuelle Darstellung der Taxiroute) oder ganzheitliche Führung (graphische Darstellung der Taxiroute) – oder der akustische Kanal – ausschließlich Ereignis basierte Führung, wie in dem heutigen Verfahren mit den Funk Anweisungen, gestützt mit der visuellen Führung durch die Mittellinien.

Die Übermittlung von Lenkinformationen anhand des taktischen Kanals, beispielsweise über die Handräder, wäre ebenso eine denkbare Übermittlung von Lenkinformationen [Ger09]. Um eine integrierte Darstellung der gesamten 4D-Rollführungsinformation zu ermöglichen, muss hier jedoch die räumliche Führung als ständige Aktion über den optischen Kanal übermittelt werden.

### **Kodierung**

Die interne Verarbeitung von Information kann in zwei unterschiedlichen Kodierungen stattfinden: räumliche oder verbale Kodierung. Die Trennung zwischen den zwei Kodierungen basiert auf der funktionalen Spezialisierung der Hirnhemisphäre [SBL10]. Diese Trennung zieht mit sich eine entsprechende Trennung der Antwort nach motorisch aus eine räumliche Verarbeitungsressource oder sprachlich aus einer verbale Verarbeitungsressource (s. Abbildung 35).

Die integrierte Darstellung von räumlicher und zeitlicher Führung entlang der festgelegten Trajektorie am Flughafen zielt auf eine motorische Antwort durch den Piloten. Diese manuelle Reaktion basiert auf eine räumlich kodierte Ressource [Wic84]. Entsprechend des Modells, dargestellt in Abbildung 35, ist eine räumliche Kodierung der Information am effizientesten.

Darüberhinaus wurde speziell für die Rollführung die Überlegenheit einer räumlichen Darstellung der Taxiroute in mehreren Studien bereits bestätigt, sei es an Hand von Head Down Displays in [FHK09] und [VUK08], Head Up Displays in [CAF09] oder Rollwegbefeuerungselementen in [UOD10].

Die Integration der zusätzlichen zeitlichen Dimension in einer räumlichen Darstellung ist demnach ebenfalls notwendig.

### 3.1.4. Vermittlungsort

Es gibt drei Hauptmöglichkeiten, dem Piloten in einem Cockpit visuelle Information zu übermitteln.

- **Option A:** die Information wird auf einem Head Down Display (HDD), d.h. einem Anzeigesystem im Instrumentenbrett eines Cockpits, dargestellt.
- **Option B:** die Information wird auf einem sogenannten Head Up Display (HUD) oder Head Mounted Display (HMD), d.h. einem Anzeigesystem, bei dem die Informationen in das Sichtfeld des Piloten projiziert werden, dargestellt.
- **Option C:** die Information ist direkt im Außenbereich, d.h. auf dem Vorfeld des Flughafens angebracht.

Diese drei Möglichkeiten werden in Abbildung 36 am Beispiel des Cockpits von NASAs Gulfstream GV veranschaulicht.

#### Head Down Display (Option A)

Das Rollen auf einem Flughafen ist im Wesentlichen eine „eyes-out“ Aufgabe: Das genaue Navigieren des Luftfahrzeugs entlang der freigegebenen Route, nach potentiellen Incursions Ausschau halten, sowie einen sicheren Abstand zu anderen Luftfahrzeugen, Fahrzeugen und Hindernissen einhalten. Dies ist am besten anhand der visuellen Hinweise und Signale aus der Außenwelt zu vollbringen.

Während der Rollphase ist demnach die Aufmerksamkeit der Piloten zum großen Teil nach außen gerichtet. Dies entspricht den Vorgaben für Piloten durch die International Civil Aviation Organization (ICAO): „Head down situation during taxi should be limited to the minimum amount of time possible“ [ICAO06]. Dies wurde auch in Untersuchungen zum Einsatz von Head-Down Displays zur Unterstützung von Piloten während der Rollphase festgestellt: „in etwa 80% der Rollzeit wird das Head-Up Bereich benutzt“ [BUO10].

Zur Einhaltung einer zeitlichen und räumlichen Trajektorie am Boden ist jedoch eine „primäre Navigationshilfe“ notwendig. Die notwendige Information muss hierbei kontinuierlich aktualisiert werden.



Abbildung 36: Möglichkeiten zur Anbringung von optischen Informationen im Cockpit.  
Grundbild: [NASA04]

Außerdem ist die Art der dargestellten Information entscheidend für ihre Position. Die Rollaufgabe kann in zwei Unteraufgaben aufgeteilt werden: lokale Führung und globales Situationsbewusstsein [LW95]. Die lokale Führung basiert dabei fast ausschließlich auf „Out-the-Window“ (OTW) Information, während das globale Bewusstsein auf Flughafenkarten oder Displays gestützt wird.

Aus diesem Grund werden Unterstützungssysteme für die reine Wegführung in der Rollphase im Head-Down Bereich so konzipiert, dass sie dieses wichtige „eyes-out“ Verhalten der Piloten nicht beeinträchtigen und nur eine „sekundäre Navigationshilfe“ darstellen [GA99]. Die 4D-Führung als Erweiterung der lokalen Führung soll folglich in der Blickrichtung des Piloten durchgeführt werden. Dementsprechend ist das Anbringen insbesondere von taktischen Informationen zur lokalen Führung im Head Down Bereich (Option A) ungünstig.

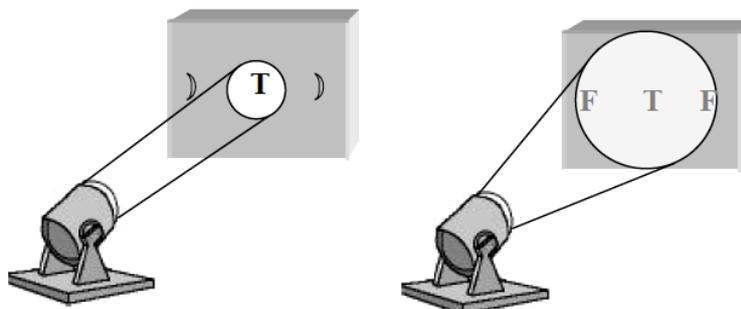
Die in [WE92] untersuchten räumlichen Anbringung von Informationen im Cockpit zeigen ebenfalls, dass die notwendige Information für eine 4D-Rollführung nicht im Head Down Bereich dargestellt werden sollten. Demnach ermöglicht eine räumliche Nähe von Informationen, die für dieselbe Aufgabe relevant sind, eine bessere Verarbeitung der Informationen. Dies entspricht dem klassischen Spotlight-Modell der Aufmerksamkeit nach Lotze [Bak99], das im nächsten Abschnitt näher erläutert wird.

#### Head Up Display (Option B)

Eine Darstellung der nötigen Information im Blickfeld der Piloten kann entweder anhand einer Projektion von geeigneten Daten auf eine transparente Fläche (Option B) oder anhand einer direkten Darstellung im Außenbereich (Option C) umgesetzt werden. Die Head Up Technologie (Option B) wurde in den letzten Jahren für verschieden Anwendungen im Cockpit untersucht, insbesondere um die Head Down Zeit zu verringern. Ziel war es, anhand dieser erweiterten Realität (eng.: Augmented Reality), dem Piloten Informationen, die sonst nur auf Instrumenten innerhalb des Cockpits abzulesen waren, direkt im Blickfeld zu vermitteln.

Zusammenfassungen dieser Untersuchungen werden in [New95], [PR04] sowie in [CN06] gegeben. Hierbei sind zwei Problemfelder im Zusammenhang mit dem Einsatz von HUDs identifiziert worden: die gleichzeitige visuelle Wahrnehmung der HUD Information und der externen Welt, sowie die Aufteilung der Aufmerksamkeit der Cockpitbesatzung auf beide Informationsquellen.

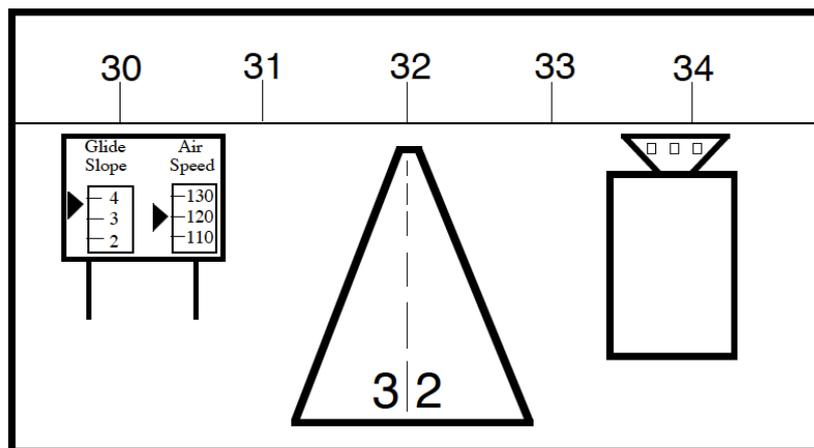
Die scharfe visuelle Wahrnehmung von Objekten benötigt eine sogenannte Akkommodation der Augen. Dies stellt die dynamische Anpassung der Brechkraft der Augen an die Entfernung des fokussierten Objektes dar. Durch diese Anpassung der Augen auf die HUD Information im Nahbereich werden die Größe und Entfernung der Elemente außerhalb des Cockpits falsch wahrgenommen [WE92].



**Abbildung 37: Attention Capture dargestellt mittels des Spotlight-Modells von Lotze [Bak99]**

Die Aufteilung der Aufmerksamkeit auf verschiedene Objekte oder Reize ist nicht immer gleichmäßig. Nach dem psychologischen Modell des Aufmerksamkeitsselektors nach Lotze [Bak99] kann sich der Fokus unserer Aufmerksamkeit je nach Aufgabe auf ein Gebiet verengen, wodurch eine schnellere Verarbeitung der Reize in diesem Gebiet möglich ist. Diese variable Breite der räumlichen Aufmerksamkeit ist in Abbildung 37 dargestellt.

Das sogenannte „Attention Capture (AC)“ oder „cognitive tunneling“ (dt: Aufmerksamkeitseinengung), das bereits 1980 in [FHP80] in der Luftfahrt im Zusammenhang mit der Benutzung von HUDs beobachtet wurde, stellt eine solche Verengung der räumlichen Aufmerksamkeit dar. Es wurde von den beteiligten Piloten so beschrieben: „they caught themselves totally fixating on the symbology [on the Head Up Display], oblivious of everything else“. Wickens definiert das Attention Capture als „the allocation of attention to a particular channel of information, diagnostic hypothesis or task goal, for a duration that is longer than optimal, given the expected cost of neglecting events on other channels, failing to consider other hypotheses or failing to perform other tasks“ [Wic05].



**Abbildung 38: Beispielhafte Darstellung von umweltgebundener Information. Der Kontrollturm und die Landebahn kommen direkt aus dem Außenblick, während das Billboard mit den instrumentellen Daten sowie die Kompassdaten auf dem Horizont virtuelle Informationen darstellen. [FKJ92]**

Ein Lösungsansatz, um die falsche Akkommodation sowie das Phänomen der „Attention Capture“ zu verringern, ist die Verwendung von kontaktanaloger Information (eng.: conformal symbology) [Wic97] oder umweltgebundener Information (eng.: scene-linked) [FKJ92]. Die Darstellung einer grünen Linie auf dem HUD entlang der Taxilinie bzw. eines Phantom-Flugzeugs oder Phantom „Follow Me“ Fahrzeugs (s. Kapitel 0: Entscheidungsunterstützungssysteme, Abbildung 19 und Abbildung 20) würde dieser Art von Information entsprechen. Ziel hierbei ist es, die Zusatzinformation so anzubringen, dass beim Wechsel von der HUD Informationsquelle zur Umwelt weder eine Wahrnehmungs- noch eine kognitive Anpassung notwendig ist. Eine Wahrnehmungsanpassung, wenn auch geringer, scheint jedoch weiterhin notwendig zu sein [CN06]. Die problematische Aufmerksamkeitseinengung wird durch die Verwendung von kontaktanaloger Information teilweise verbessert, mit einer geringeren Anpassungszeit zwischen HUD und Umwelt [VW00], sowie einer geringeren Ablenkung durch das HUD [BB96].

Dennoch bleibt die Erkennung von unerwarteten Ereignissen, wie beispielsweise ein zur Ziellandebahn rollendes Flugzeug (runway incursion), durch das AC Phänomen, auch unter Verwendung von kontaktanaloger Information [SMM05], stark erschwert [FHP80]. Die schlechte Erkennung von unerwarteten Ereignissen im Zusammenhang mit einem HUD steigt

mit steigender Arbeitsbelastung: der Unterschied in der Latenzzeit bis zur Erkennung solcher Ereignissen, mit und ohne Verwendung von HUD, nimmt mit dem Maß an Arbeitsbelastung zu [LW91]. Dies ist besonders während der Rollphase sehr problematisch durch die hohe Arbeitsbeanspruchung in dieser Phase (s. Kapitel 2.1.2), sowie die relativ hohe Anzahl an unerwarteten Ereignissen im Vergleich zu anderen Flugphasen.

In erster Linie stellen Bodenfahrzeuge eine Quelle solcher unerwarteten und potentiell gefährlichen Ereignisse dar, die durch den Einsatz eines HUDs spät oder nicht erkannt werden könnten. Genau solche unerwarteten Ereignisse können nicht alle durch Bodenüberwachungssysteme erfasst werden (s. Kapitel 2.2.6) und sind dementsprechend dem 4D-Rollführungssystem nicht bekannt. Die Rolle des Piloten als letztem Operator in solchen Fällen wäre also stark gefährdet durch die Anbringung der relevanten Information im Head Up Bereich (Option B).

#### **Auf dem Vorfeld (Option C)**

Eine direkte Anbringung der notwendigen taktischen Zusatzführungsinformation zum Abrollen einer 4D-Rolltrajektorie auf dem Vorfeld ermöglicht eine geringe Head-Down Zeit ohne mögliche Distraction durch eine Aufmerksamkeitsverengung auf digitale Information auf einem HUD. Darüberhinaus ermöglicht dieser Ansatz die Einbindung aller Flugzeuge in das System, unabhängig von deren Ausrüstungsgrad.

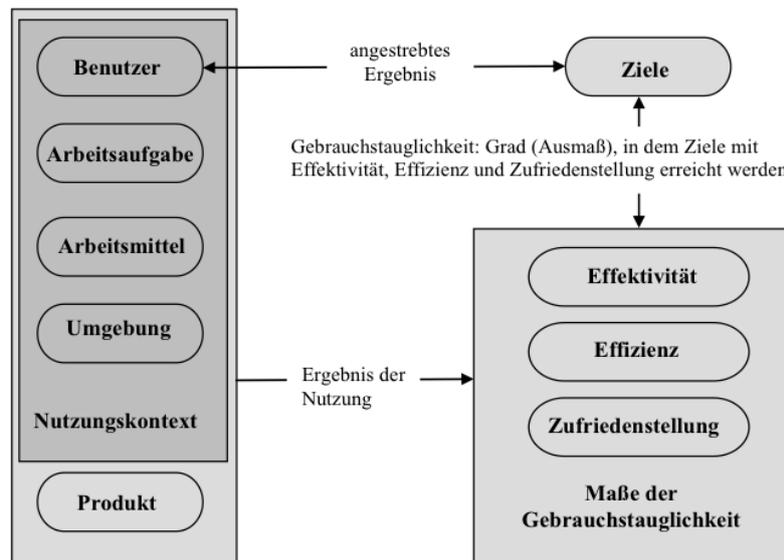
Wie im Kapitel 0 erläutert, wäre eine räumliche Nähe dieser Zusatzinformation zu den notwendigen Informationsquellen zur Navigation vorteilhaft für eine schnellere Verarbeitung durch den Piloten [WE92]. Die in Kapitel 2.3 vorgestellten Rollwegbefeuerungselemente bzw. die darunter liegenden Taxilinien werden schon heute von den Piloten während der Rollphase benutzt, um die Position des Flugzeugs auf dem Rollfeld sicherzustellen.

Demnach erfüllt die Anbringung der notwendigen zeitlichen Zusatzinformationen auf diesen Elementen alle Anforderungen für einen geeigneten Vermittlungsort dieser taktischen Information.

#### **3.1.5. Gebrauchstauglichkeit**

Eine weitere Anforderung an einem solchen System besteht im hohen Maß der Gebrauchstauglichkeit. In der Tat, um die in 3.1.1 beschriebene notwendige Teilnahme aller Verkehrsteilnehmer an den berechneten optimalen Fluss zu erreichen, sind die Zufriedenheit der Benutzer sowie die erreichte Effektivität und Effizienz durch den Einsatz des Systems von großer Bedeutung.

Nach der Normenreihe DIN EN ISO 9241 Teil 11 ist die Gebrauchstauglichkeit „das Ausmaß, in dem ein Produkt durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufrieden stellend zu erreichen“ [EN99]. Hierbei wird die Effektivität als „die Genauigkeit und Vollständigkeit, mit der Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“ definiert. Die Effizienz steht für den „im Verhältnis zur Genauigkeit und Vollständigkeit eingesetzte Aufwand, mit dem Benutzer ein bestimmtes Ziel erreichen“. Die Zufriedenheit umfasst die subjektive Wahrnehmung der Gebrauchstauglichkeit des Systems durch den Benutzer. Diese setzt sich aus „Beeinträchtigungsfreiheit und Akzeptanz der Nutzung“ zusammen. Die Gebrauchstauglichkeit ist dabei nur im Betracht einer bestimmten Benutzergruppe, Aufgabe, Ausrüstung und Umgebung, sowie angestrebter Ziele zu beurteilen (s. Abbildung 39).



**Abbildung 39: Anwendungsrahmen für Gebrauchstauglichkeit nach [EN99]**

In diesem Fall ist die gezielte Benutzergruppe klein und homogen, mit einem hohen Maß an Expertenwissen und Erfahrung für die allgemeine Aufgabe der Rollführung. Jedoch wird die erhöhte Anforderung an diese Aufgabe und das entsprechenden Ziel um eine Dimension, die Zeit, zunächst neu und ungewohnt sein. Da der Nutzen der 4D-Rollführung vorrangig für große Hubflughäfen besteht, kann eine Vertrautheit aller Teilnehmer mit dem System nicht angenommen werden.

Aus diesem Grund ist hier eine weitere Dimension der Gebrauchstauglichkeit gezielt zu untersuchen: die Intuitivität. Nach [MHI06] ist „ein technisches System (...) intuitiv benutzbar, wenn es durch nicht bewusste Anwendung von Vorwissen durch den Benutzer zu effektiver Interaktion führt.“ Hierbei gibt es je nach Benutzergruppe verschiedene Ebenen von Vorwissen: Angeboren, Sinneserfahrung, Kultur, Expertise sowie Werkzeuggebrauch wie in Abbildung 40 dargestellt.



**Abbildung 40: Ebenen des Vorwissens nach [MHI06]**

Die Benutzergruppe eines 4D-Rollführungssystems kann kulturell unterschiedlich sein, jedoch kann hier bei den Piloten die Expertise als Ebene des Vorwissens angenommen werden. Um zu gewährleisten, dass auch gelegentliche Nutzer des Systems am optimierten Verkehrsfluss teilnehmen, soll ein möglichst geringer Anteil an speziellem Gebrauchswissen für eine effektive Bedienung des Systems notwendig sein.

### 3.1.6. Zusammenfassung der Anforderungen

Aus der notwendigen Einbindung möglichst aller Verkehrsteilnehmer im gesamten System, um die Vorteile des Verkehrsflussoptimierungsalgorithmus auszuschöpfen, ist ein hohes Maß an Gebrauchstauglichkeit für das Führungssystem erforderlich. Zugleich soll das System rückwärtskompatibel gestaltet werden.

Aufgrund dieser Rückwärtskompatibilität, sowie der Grenzen einer Vollautomatisierung für die Rollphase, ist die Begrenzung der Automatisierung auf ein Entscheidungsunterstützungssystem notwendig. Die resultierende, kontinuierliche Vermittlung von taktischen Informationen soll über den visuellen Kanal erfolgen. Gepaart mit der Rückwärtskompatibilität ergibt sich eine Darstellung der nötigen Information direkt im Außenbereich auf dem Flughafengelände.

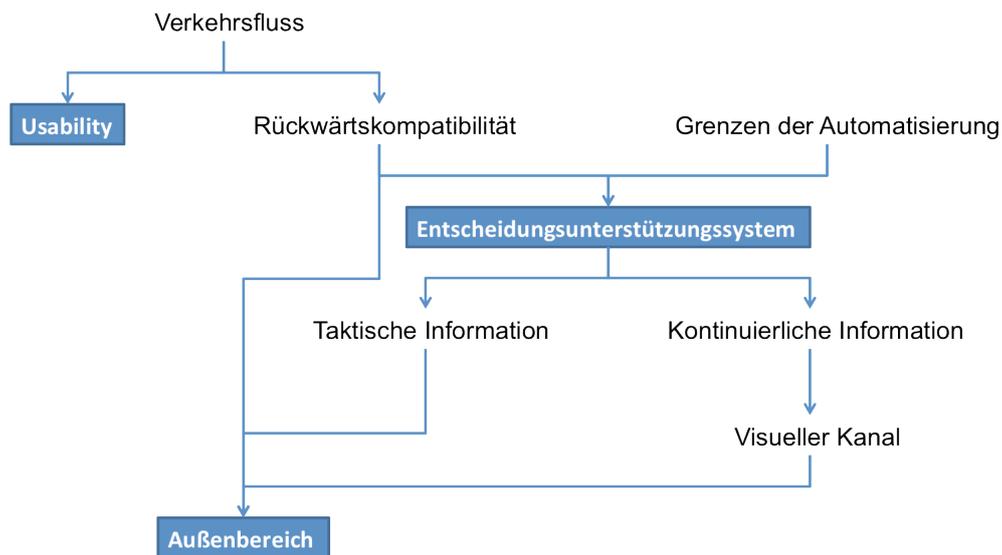


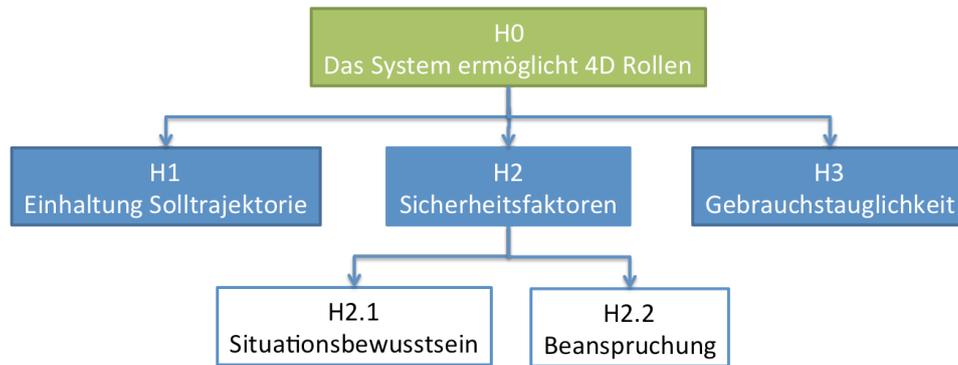
Abbildung 41: Zusammenfassung der Anforderungen

Folglich soll das Führungssystem ein hohes Maß an *Gebrauchstauglichkeit* besitzen, den Piloten in deren *Entscheidungsfindung* unterstützen und mithilfe von Elementen aus dem *Außenbereich* gestaltet werden (s. Abbildung 41).

### 3.2. Hypothesen

Die durchgeführten Untersuchungen im Flugsimulator zielen auf eine konzeptionelle Validierung des entworfenen Systems. Es wird nämlich untersucht, inwieweit hier das „richtige System“ gebaut wurde [Boe84]. Um eine solche Fragestellung zu beantworten, muss zunächst das Problem, zu dessen Lösung das System eingesetzt werden soll, genau definiert werden. In unserem Fall soll das System eine möglichst genaue Einhaltung einer vordefinierten, kontinuierlichen 4D-Trajektorie durch die Cockpitbesatzung eines Linienflugzeugs während der Rollphase ermöglichen. Wie für jedes luftfahrtbezogene System, kommen dazu die Fragestellung zu Sicherheits- sowie Beanspruchungsfaktoren, sowie die Benutzbarkeit der Mensch-Maschine Schnittstelle.

Eine Zusammenfassung der Hypothesen wird in Abbildung 42 gegeben.



**Abbildung 42: Zusammenfassung der Hypothesen**

### 3.2.1. Einhaltung der Solltrajektorie

Die Kernanforderung eines solchen Systems ist die Erfüllung der Aufgabe durch die Benutzer, in diesem Fall bedeutet es die Einhaltung der 4D-Solltrajektorie durch die Cockpitbesatzung. Hierzu ergibt sich folgende Hypothese:

**H1:** Die zeitliche und räumliche Einhaltung der Solltrajektorie ist durch die dynamische Länge der Befeuerung gewährleistet.

### 3.2.2. Sicherheitsfaktoren

Zu den wichtigsten Sicherheitsfaktoren in der Luftfahrt gehört das Situationsbewusstsein der Piloten. Probleme diesbezüglich könnten verantwortlich sein für bis zu 88% aller Unfälle, die auf ein Fehler des Menschen zurückzuführen sind [End95]. Diese umfassen rund drei Viertel aller Luftfahrtunfälle [Mjo01].

Ein wesentlicher Einfluss von zunehmender Automatisierung im Cockpit für die Sicherheit stellt die mögliche Abnahme des Situationsbewusstseins dar, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben. Aus diesem Grund wird die folgende Hypothese formuliert:

**H2.1:** Das Situationsbewusstsein der Piloten bleibt durch den Einsatz der jeweiligen Systeme im ähnlichen Wertebereich wie bei der heutigen Rollaufgabe.

Darüber hinaus ist die Sicherstellung einer ausreichender Beanspruchung der Piloten im Cockpit ebenfalls sicherheitsrelevant. Da die Rollphase eine hohe Beanspruchungsphase darstellt (s. Kapitel 2.1.2) und der Pilot weiterhin aktiv an der Aufgabe beteiligt ist, wird hier vor allem auf die Gefahr einer übermäßigen Zunahme dieser Beanspruchung geachtet. Hieraus ergibt sich die folgende Hypothese:

**H2.2:** Die Beanspruchung der Piloten bleibt durch den Einsatz der jeweiligen Systeme im selben Wertebereich wie bei der heutigen Rollaufgabe.

### 3.2.3. Gebrauchstauglichkeit

Da das System von möglichst vielen Verkehrsteilnehmern ohne Anlernphase benutzt werden soll, ist ein hohes Maß an Gebrauchstauglichkeit unabdingbar. Hierzu ergibt sich folgende Hypothese:

**H3:** Die Gebrauchstauglichkeit der Befeuerungselemente zur Rollführung ist mit dem Einsatz einer dynamischen Länge gewährleistet.

### 3.2.4. Zentrale Hypothese

Die zentrale Hypothese dieser Arbeit lautet zusammenfassend:

**H0:** Die Piloten sind anhand dieses Systems in der Lage ein ausreichend genaues Rollen entlang einer vorgegebenen 4D-Solltrajektorie zu absolvieren, um alle Möglichkeiten einer Rollfluss-Optimierung auszuschöpfen.

## 3.3. Geometrische Einschränkungen und technologische Annahmen

Die Optimierung des Bodenverkehrs von Luftfahrzeugen anhand einer Führung entlang von räumlichen und zeitlichen Trajektorien setzt mehrere technologische Gegebenheiten voraus. Insbesondere die Verfügbarkeit von verschiedenen Daten, die dynamische Berechnung der entsprechenden Trajektorien, sowie die notwendige Umrüstung der Rollwegbefeuerungselemente, sind unabdingbar. Zunächst werden die geometrischen Einschränkungen dieser Befeuerungselemente dargestellt.

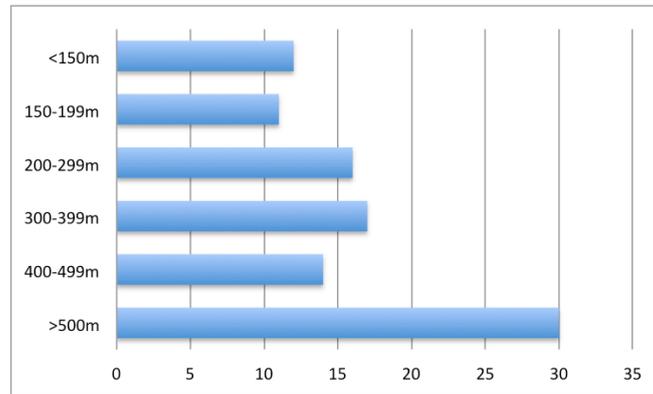
### 3.3.1. Geometrische Einschränkungen der Rollwegbefeuerungselemente

Für den Einsatz von Befeuerungselementen auf den Rollwegen zur Führung von Verkehrsflugzeugen während der Rollphase gibt es geometrische Einschränkungen, sowohl für die maximale, als auch die minimale Länge von angeschalteten Befeuerungselementen. Diese Einschränkungen werden im Entwurf des vorgestellten Systems berücksichtigt.

#### Maximale Länge

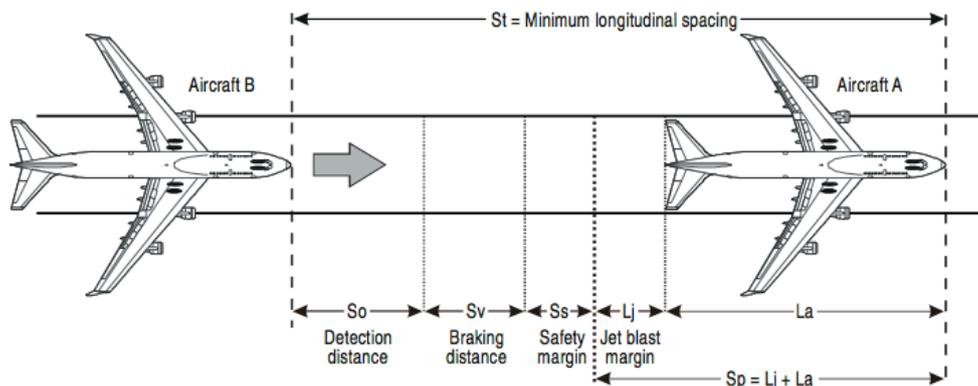
Die erste geometrische Einschränkung zur Nutzung von Befeuerungselementen für die Rollführung ist der normale Abstand zwischen zwei hintereinander rollenden Flugzeugen. Tatsächlich wird die eingesetzte, grüne Linie zur Führung im Fall von einander folgenden Flugzeugen vor dem vorderen Flugzeug aufhören müssen, wie es beispielsweise im Projekt WFF entwickelt wurde [BUO10]. Dies erhöht die Wahrnehmung des vorderen Flugzeugs für das folgende. Eine durchgehende Linie von angeschalteten Lampen könnte hingegen, insbesondere bei schlechten Sichtverhältnissen, sogar das Erkennen des vorderen Flugzeugs verspäten. Um eine zu starke Veränderung der Länge der grünen Lichter in einem solchen Fall zu verhindern, wird die maximale Länge von angeschalteten Befeuerungselementen auf einen durchschnittlichen Abstand zwischen zwei Flugzeugen eingeschränkt.

In [Böt08] wurden die Abstände zwischen Flugzeugpaaren am Flughafen Frankfurt analysiert. Die Studie ergab die Verteilung in Abbildung 43, in der über drei Viertel der aufgenommenen Flugzeugpaare mit einem Abstand von mehr als 200 Metern hintereinander rollten.



**Abbildung 43: Prozentuale Verteilung von Abstandswerten zwischen Flugzeugpaaren am Flughafen Frankfurt. Nach [Böt08]**

Darüber hinaus wurde in [Böt08] das Konzept einer Orientierungssichtweite [LS07] aus dem Straßenwesen an den Rollvorgang am Flughafen angepasst. Diese stellt „die Tiefe des Verkehrsraumes dar, von dem der Fahrer den Eindruck hat, ihn für die Fahraufgabe ausreichend und einwandfrei erfasst zu haben“ [Böt08]. Aus der Anpassung wurde der Kennwert mit 250m als theoretischer Mindestabstand bei befeuerungsbasierter Rollverkehrsführung ermittelt. Dieser Kennwert wird für die maximale Länge der Linie von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen für das hier vorgestellte Rollführungskonzept übernommen.

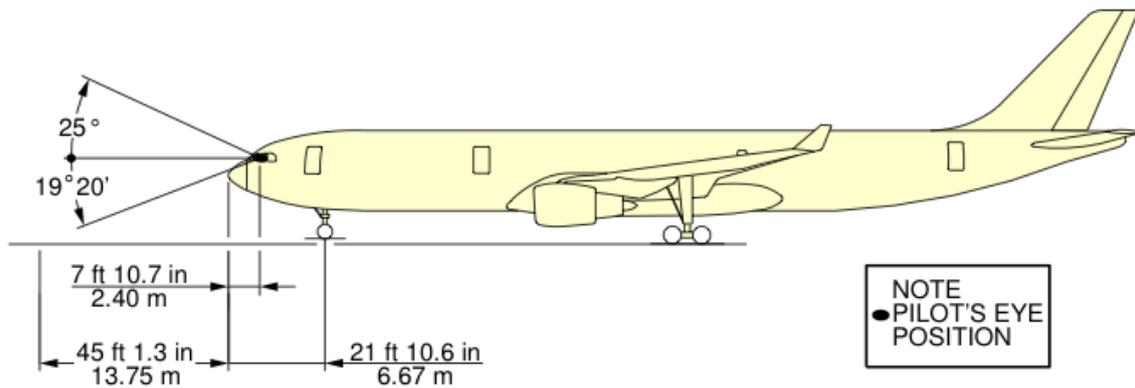


**Abbildung 44: Eckwerte für den Abstand zwischen Flugzeugpaaren in A-SMGCS Systemen [ICAO04b]**

Dieser Wert entspricht auch den Anforderungen für A-SMGCS Systeme aus dem ICAO Manual [ICAO04b]. Hier wird ein minimaler Abstand von etwa 200 Metern zwischen Flugzeugpaaren vorgeschrieben ( $St = \text{Minimum longitudinal spacing}$  in Abbildung 44).

### Minimale Länge

Eine weitere geometrische Einschränkung für den Einsatz von Rollwegbefeuerungselementen zur zeitlichen Führung des Rollverkehrs stellt die Entfernung vor dem Flugzeug dar, ab der die Piloten den Boden sehen können. Diese Entfernung wird zur Ermittlung der minimalen Länge der angeschalteten Rollwegbefeuerungselemente verwendet.



**Abbildung 45: Sichtverhältnisse aus dem Cockpit eines Airbus A330 [Air11a]**

Mit der Annahme der Nutzung der „Design Eye Reference Point (DERP)“ Methode im Cockpit ist diese Entfernung für alle Flugzeugtypen von den Herstellern angegeben und ist hauptsächlich von der Höhe des Flugzeugs abhängig. In Tabelle 6 wird eine Zusammenfassung von typischen Bodensichten – Abstand zwischen der Flugzeugnase und dem ersten sichtbaren Punkt auf dem Rollfeld – für verschiedene Flugzeugtypen angegeben. Die geometrischen Zusammenhänge werden in Abbildung 45 beispielhaft für einen Airbus A330 dargestellt.

**Tabelle 6: Bodensicht in Metern für verschiedene Flugzeugtypen – Daten aus den jeweiligen Airplane Characteristics for Airport Planning (ACAP) Dokumenten**

<i>Flugzeugtyp</i>	<i>Bodensicht in Metern</i>
MD-90-30/-30ER	8,56
A320	12,45
A300	13,75
A310	13,75
A330	13,75
A340-400/-500	14,00
EMB 195	14,58
B777-200/-300	14,80
MD-11	15,30
A380	20,28
B747-100/-200/-300/-SP	26,65

Entsprechend wird eine minimale Länge von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen von 30 Metern vor dem Flugzeug ausgewählt. Damit ist sichergestellt, dass immer mindestens eine Lampe aus dem Cockpit jedes Flugzeugtyps sichtbar ist.

### 3.3.2. Technologische Annahmen

Die Optimierung des Bodenverkehrs von Luftfahrzeugen anhand einer Führung entlang räumlicher und zeitlicher Trajektorien setzt mehrere technologische Gegebenheiten voraus. Insbesondere die Verfügbarkeit von verschiedenen Daten, die dynamische Berechnung der

entsprechenden Trajektorien, sowie die notwendige Umrüstung der Rollwegbefeuerungselemente sind unabdingbar.

### Verfügbare Daten

Die Anforderungen an verfügbare Daten für die Umsetzung von 4D-trajektorienbasierten Optimierungsalgorithmen während der Rollphase wurden in [Urv10] analysiert. Eine Zusammenfassung wird in Tabelle 7 gegeben. Ausschlaggebend sind die, im Vergleich zu rein räumlich basierten Prozessen, höheren Anforderungen an Daten zur Verkehrslage sowie zur Infrastruktur und ihr Zustand.

**Tabelle 7: Anforderungen an verfügbaren Daten aus [Urv10]**

<i>Datentyp</i>	<i>Quelle</i>	<i>Güte</i>
Fremdverkehrs-Information	Mindestens eine unabhängige nicht kooperative Quelle	Hohe Genauigkeit Niedrige Latenz Hohe Aktualisierungsrate
Ownship Information	Bord Systeme	Hohe Genauigkeit
NOTAM		Gleiche Version Bord-Boden
NOTAM Veränderungen	Boden Systeme	Gleiche Version Bord-Boden
Flughafen Infrastruktur	AIRAC	Gleiche Version Bord-Boden
Solltrajektorie	Boden Systeme	
Weitere Freigaben	Boden Systeme	

### Verkehrslage

Insbesondere für die Planungsfunktion zur Erstellung von geeigneten 4D-Trajektorien für alle Verkehrsteilnehmer sind akkurate und zuverlässige Verkehrslagedaten unabdingbar.

Die beste Qualität von Ortungsdaten wird anhand einer Fusionierung der verschiedenen Datenquellen sowie Multilaterationstechniken erzielt [HPR99]. Hierbei ist die Anwesenheit einer unabhängigen und nicht kooperativen Datenquelle, wie beispielsweise der Primary Surveillance Radar (PSR), unabdingbar (s. Kapitel 2.2.6). Nur so kann gewährleistet werden, dass auch im Fall eines technischen Problems an Bord des zu erfassenden Objektes oder gar einer feindlichen Übernahme, dieses Objekt weiterhin vom System erkannt wird.

Die Gütekriterien für Verkehrslagedaten sind die Genauigkeit der Information, die Latenzzeiten, sowie die Aktualisierungsrate. Der Informationsinhalt wird durch die Anforderungen zukünftiger Prozesse erweitert, insbesondere durch „Intent Information“ [EC08b], Damit die Systeme vorausschauend planen können:

- Identifikation (Callsign),
- Flugzeugtyp,
- Position,
- Kompasskurs (Heading),
- und Intent Information.

Aufgrund der diskreten Position der Rollwegbefeuerungselemente entlang der Rollwege mit einem Abstand zwischen 7,5 und 30 Metern (s. Kapitel 2.3, Tabelle 4) ist eine Genauigkeit der Positionsdaten von mindestens 10 Metern notwendig. Mit einer maximalen Geschwindigkeit von etwa 25 Knoten (entspricht 12,86 m/s) in Geraden am Boden resultiert dies in einer maximalen zeitlichen Abweichung von  $30 \text{ m} / 12,86 \text{ m/s} = 2,33 \text{ Sekunden}$  und

### 3. Konzeption eines 4D-Rollführungssystems

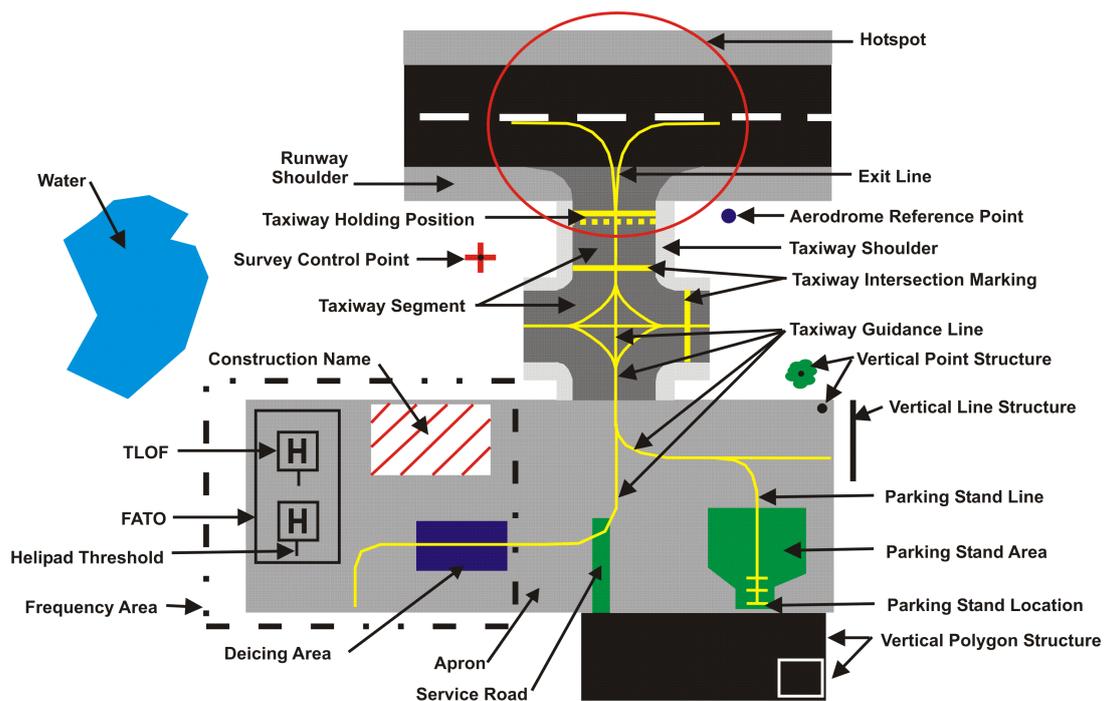
entsprechend einer Latenzzeit von maximal 1,5 Sekunden und eine Aktualisierungsrate von 2 Hz.

Diese Anforderungen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

**Tabelle 8: Anforderungen an Positionsdaten für die 4D-Rollführung**

Eigenschaft	Güte
Genauigkeit	$\leq 10$ m
Latenzzeit	$\leq 1,5$ s
Aktualisierungsrate	$\geq 2$ Hz

### Infrastruktur



**Abbildung 46: Infrastrukturelemente einer AMDB [AIS08]**

Die benötigten Informationen zur Infrastruktur beinhalten die geometrische Lage aller relevanten Elemente des Flughafens, sowie etwaigen Begrenzungen für manche Flugzeugtypen – nach dem „Aerodrome Mapping Database (AMDB)“ Standard (s. Abbildung 46).

Hinzu kommen Informationen zum aktuellen Zustand der Elemente, insbesondere Rollwege, sowie Start- und Landebahnen. Dieses wird teilweise durch „Notice To Airmen (NOTAM)“ Information abgedeckt, jedoch ist für eine taktische Kontrollfunktion eine schnellere Aktualisierungsmöglichkeit notwendig. Beispielsweise kann anhand eines NOTAMs eine Startbahn für mehrere Tage abgesperrt werden, die Lotsen könnten aber informiert worden sein, dass die Arbeiten früher fertig geworden sind und somit die Startbahn doch frei ist. Diese Information muss dann entsprechend für alle Systeme verfügbar sein.

## Solltrajektorie

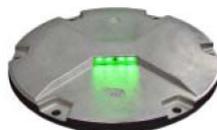
Die optimale Trajektorie um einen effizienten Verkehrsfluss zu ermöglichen, wird für jeden Verkehrsteilnehmer berechnet. Dieses geschieht mittels eines Optimierungsalgorithmus, wie beispielsweise in [CR09] oder [LZZ09] beschrieben (s. Kapitel 0). Die berechneten Trajektorien sollen die folgenden Eigenschaften besitzen:

- Die erste und wichtigste Eigenschaft der berechneten Solltrajektorien ist ihre notwendige Konfliktfreiheit. Das Planungssystem muss so gewährleisten, dass, wenn alle Luftfahrzeuge die zugewiesene 4D-Trajektorie abrollen, keine Konflikte zwischen allen vom System erfassten Flug- und Fahrzeugen entstehen dürfen. Dieser konfliktfreie Charakter setzt eine weitere Eigenschaft der Trajektorien-Berechnung voraus: sie soll dynamisch erfolgen. Diese notwendige Dynamik erfolgt in zwei Stufen:
  - *Lokale Dynamik*: Wenn sich ein Verkehrsteilnehmer von seiner zugewiesenen Solltrajektorie so weit entfernt, dass eine weitere Einhaltung nicht möglich ist, wird für diesen Teilnehmer eine neue Solltrajektorie berechnet und zugewiesen.
  - *Globale Dynamik*: Wenn diese neue Trajektorie andere Teilnehmer beeinflusst, werden für diese auch neue Solltrajektorien berechnet und zugewiesen.
- Eine weitere notwendige Eigenschaft der Solltrajektorien ist ihre Abrollbarkeit. Die geforderten Geschwindigkeiten sollen sich im normalen Bereich eines Rollvorgangs befinden, sowie gesonderte Geschwindigkeitsanforderungen je nach Flugzeugtyp und insbesondere den Kurvenradius mit einbeziehen. Die geforderten Geschwindigkeitsveränderungen sollen auch die Trägheit der Luftfahrzeuge berücksichtigen und dementsprechend nicht zu ausgeprägt sein.
- Darüberhinaus soll ein wichtiger Faktor im Flussoptimierungsalgorithmus die Minimierung der Haltephasen sein. Dieses wird die Akzeptanz der Piloten für das System stark erhöhen, sowie Emissionen und Treibstoffverbrauch reduzieren.

Die dynamische Berechnung solcher konfliktfreien und abrollbaren Trajektorien für jeden Verkehrsteilnehmer wäre im Falle einer Optimierung des Bodenverkehrs durch eine Vollautomatisierung (s. Kapitel 0) auch notwendig und wird deswegen hier als vorhanden angenommen.

## Befeuerungselemente

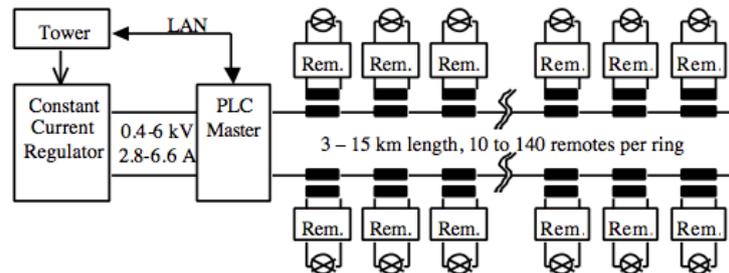
Für einen Einsatz von Rollwegbefeuerungselementen für die räumliche und zeitliche Führung entlang des Rollnetzes ist eine Umrüstung der bestehenden Elemente notwendig. In den heutigen Einsätzen werden die Rollwegmittellinienlichter (s. Abbildung 47) entweder für den gesamten Flughafen alle gleichzeitig an- beziehungsweise ausgeschaltet oder in den Flughäfen mit einer A-SMGCS Implementierung segmentweise betrieben (s. Kapitel 2.3.1). Jedoch setzt die Vermittlung von Geschwindigkeitsinformationen durch die dynamische Länge von angeschalteten Lichtern die Einzelschaltbarkeit der Lichter voraus.



**Abbildung 47: Rollwegbefeuerungselement L852 LED Basiert (ADB)**

Eine solche Umrüstung, um einzelschaltbare Rollwegbefeuerungselemente aus den vorhandenen Lichtelementen zu bekommen, wurde bereits im WFF Projekt [UOD10] erprobt und umgesetzt. Anhand einer Architektur mit einem Gesamtmaster und jeweils einem Remote

für jedes Befeuerungselement und einer Kommunikation mittels Powerline Technologie waren alle Rollwegbefeuerungselementen einzeln an- und abschaltbar [Böt10]. Die Architektur dieses Airfield Ground Lighting Automation System (AGLAS) der Firma ADB wird in [BP03] erläutert (s. Abbildung 48).



**Abbildung 48: Architektur des Airfield Ground Lighting Automation Systems (AGLAS) [BP03]**

## 3.4. Konzept

Das 4D-Rollführungskonzept soll die Einhaltung der 4D-Trajektorie durch eine Kooperation von Pilot und Gesamtsystem gewährleisten. Die Piloten bleiben hierbei als ausführende Operatoren im Rollprozess erhalten, während das Rollführungssystem sie in den Informationsaufnahme-, -analyse- und Entscheidungsphasen unterstützt. Diese Unterstützung erfolgt im Sichtbereich der Piloten durch den Einsatz von Elementen direkt im Außenbereich auf dem Flughafengelände.

Im folgenden Abschnitt wird die grundlegende Idee für das 4D-Rollführungskonzept aufgezeigt, dabei die zwei gewählten Ansätze dargestellt und die resultierende Gesamtarchitektur erläutert. Anschließend werden die Reglerauslegung sowie die Vorversuche beschrieben.

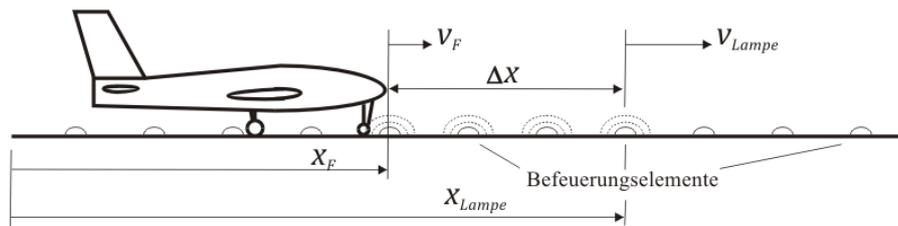
### 3.4.1. Follow the Greens

Nach dem „Proximity Compatibility Principle“ (PCP – dt. Kompatibilitätsprinzip der Nähe), eingeführt in [WC95], scheinen Rollwegbefeuerungselemente entlang der Rollwegmittellinie bestens geeignet für die Darstellung der 4D-Rollführungsinformationen. In der Tat postuliert dieses Prinzip, dass die Darstellung von Informationen zur Unterstützung von inhaltlich ähnlichen Aufgaben örtlich nah beieinander dargestellt sein soll, wobei eine Integration von Einzelinformationen zu einem grafischen Objekt vorzuziehen ist [GL08]. Während dem Abrollen einer 4D-Rollanweisung bleiben die heutigen Aufgaben der Rollphase für den Pilot erhalten. Insbesondere ist die Einhaltung der Rollwegmittellinie weiterhin notwendig. Die zusätzliche Aufgabe der zeitlichen Einhaltung der Trajektorie soll folglich nach dem PCP am besten anhand Elemente, die örtlich nah zu dieser Mittellinie zu finden sind, erfolgen. Insofern entspricht der Einsatz der Befeuerungselemente entlang dieser Mittellinie den Vorgaben des PCP.

Diese Elemente werden zudem bereits erfolgreich für die räumliche Führung am Flughafen eingesetzt (s. Kapitel 2.3). Eine Integration der zusätzlichen zeitlichen Führung in denselben grafischen Elementen entspricht ebenso den Vorgaben des PCP.

Die Grundidee für die gleichzeitige räumliche und zeitliche Führung der Cockpitbesatzung entlang einer vorberechneten Solltrajektorie am Flughafen anhand der Rollwegbefeuerungselementen ist, dass der rollende Pilot der letzten Lampe ( $x_{Lampe}$ ) einer vor dem Flugzeug vorauslaufenden Linie von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen

folgen soll (s. Abbildung 49). Dieses letzte Element stellt so eine Art „Follow Me“ Bodenfahrzeug (dt. Folge-mir-Auto) dar.

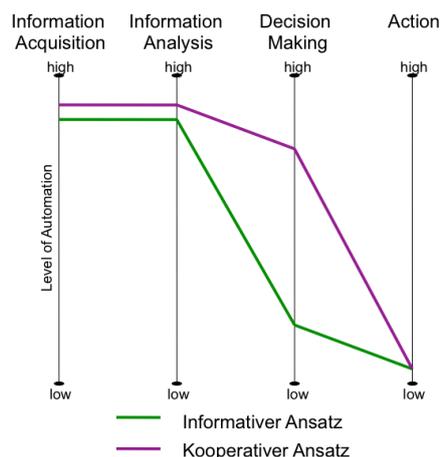


**Abbildung 49: Geometrische Darstellung von Flugzeug und Befeuerungselementen [HSU10]**

Somit werden alle zuvor erfassten Anforderungen (s. Kapitel 3.1) erfüllt. Das System nutzt Elemente, die direkt im Außenbereich liegen, um den Piloten in seiner Entscheidungsfindung zu unterstützen. Die Anweisung ist denkbar einfach und stellt eine für die Piloten bekannte Aufgabe nach: dem Folgen eines Bodenfahrzeugs. Somit sind sowohl ein hohes Maß an Gebrauchstauglichkeit, der richtige Vermittlungsort und der geeignete Grad der Automatisierung sichergestellt.

### 3.4.2. Entscheidungsunterstützungssystem: Zwei Ansätze

Es wurden zwei Ansätze eines solchen Entscheidungsunterstützungssystems entworfen: ein informativer Ansatz und ein kooperativer Ansatz. Im ersten informativen Ansatz wird die Cockpitbesatzung vorrangig in ihrer Informationsaufnahme und Informationsanalyse unterstützt. Im zweiten kooperativen Ansatz werden die Piloten zusätzlich in deren Entscheidungsfindung stark unterstützt. Diese unterschiedlichen Grade der Automatisierung werden in Abbildung 50 veranschaulicht.



**Abbildung 50: Automatisierungsstufen der zwei Ansätze – bereits veröffentlicht in [UDK10]**

Für beide Ansätze bleibt die Aufgabe für die Piloten die gleiche: der letzten angeschalteten Lampe folgen.

#### Informativer Ansatz

Der informative Ansatz entspricht einer reinen Steuerung der Flugzeugposition entlang der Solltrajektorie. Dem Pilot wird hier einfach eine Darstellung der Solltrajektorie angeboten. Es erfolgt keine Anpassung der Länge der angeschalteten Elemente an das Verhalten des Piloten.

Dabei ist die Position des letzten angeschalteten Rollwegbefeuerungselements vor dem Flugzeug ( $X_{Lampe}$ , s. Abbildung 49) in einer konstanten Entfernung ( $K$ ) von der Sollposition ( $S$ ) an jedem gegebenen Zeitpunkt ( $t$ ). Dies entspricht der Formel:

$$X_{Lampe}(t) = S(t) + K$$

Die konstante Länge  $K$  wird so gewählt, dass eine angemessene Anzahl an angeschalteten Lampen vor dem Flugzeug vorläuft, wenn der Pilot der Trajektorie folgt. Diese Länge wird an der, für die rein räumliche Führung in WFF benutzten, konstanten Länge angelegt und soll entsprechend der Ergebnisse dieses Projekts, abhängig vom Flugzeugtyp, insbesondere von der Cockpithöhe, gewählt werden [BUO10]. Darüberhinaus soll diese Länge auch den geometrischen Einschränkungen aus Kapitel 3.3 genügen.

Somit ist die Länge der angeschalteten Lampen  $\Delta X$  an jedem gegebenen Zeitpunkt ( $t$ ), mit  $X_F$  die Flugzeugposition, in der folgenden Formel gegeben:

$$\Delta X(t) = S(t) + K - X_F(t)$$

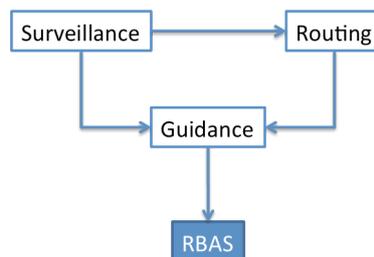
#### Kooperativer Ansatz

Der kooperative Ansatz entspricht hingegen einer Regelung mit Rückkopplung der Flugzeugposition entlang der Solltrajektorie. In diesem Fall wird die Länge der angeschalteten Elemente an das Verhalten des Piloten und an die Abweichung zur Solltrajektorie dynamisch und kontinuierlich angepasst.

Anhand eines Pilotenmodells für das anhand angeschalteter Lampen, geführte Rollen auf dem Rollfeld wird die optimale Position für das letzte Befeuerungselement ermittelt, um das Einhalten der bekannten und erwünschten Solltrajektorie durch den Piloten zu erreichen. Die dynamische Berechnung der Position der vorauslaufenden Befeuerungselemente erfolgt basierend auf den Methoden der Regelungstechnik und wird in Kapitel 3.4.4 erläutert.

#### 3.4.3. Architektur

Die allgemeine Architektur der 4D-Rollführungsfunktion wird in Abbildung 51 dargestellt. Hierbei werden die Daten aus den A-SMGCS Komponenten „Surveillance“ und „Routing“ von der Führungsfunktion analysiert, um einen entsprechenden Befehl an die Rollwegbefeuerungselemente mittels eines Rollwegbefeuerungsautomatisierungssystems (RBAS) zu übermitteln.



**Abbildung 51: Allgemeine Architektur der 4D-Rollführungsfunktion**

Hierbei beschränkt sich die Führungsfunktion im informativen Ansatz auf die Darstellung der Solltrajektorie anhand der Formel in Kapitel 0, während für den kooperativen Ansatz ein Regler, basierend auf einem Pilotenmodell, sowie auf der Abweichung zwischen der Ist- und der Solltrajektorie in dieser Führungsfunktion, zum Einsatz kommt.

Die 4D-Führung wird getrennt in eine räumliche und eine zeitliche Komponente. Die räumliche Komponente entspricht der in heutigen Verfahren benutzten Taxiroute: die geforderte Strecke auf dem Rollfeld. Somit wird das Problem für die zeitliche Komponente auf die Ermittlung der geeigneten Länge von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen zu jedem gegebenen Zeitpunkt reduziert.

### 3.4.4. Reglerauslegung

Zur Reglerauslegung wird ein Modell des rollenden Flugzeugs, sowie des Piloten beim Folgen eines vorausfahrenden Fahr- bzw. Flugzeugs erstellt; in Anlehnung an das „Driver Car-Following Behaviour“, beschrieben in [MMP05]. Ziel ist die Ermittlung der optimalen Position des letzten Befeuerungselements zur Einhaltung der vorgegebenen konfliktfreien 4D-Trajektorie. Hierzu wird eine Modellierung des Prozesses eines hinter einer Linie von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen rollenden Flugzeuges als mathematisches Modell aus der Sicht des Piloten beschrieben. An dieser Stelle wurden Experten des Instituts aus dem Bereich der Regelungstechnik zur Unterstützung hinzugezogen. Die hier zusammengefassten Untersuchungen haben in zwei gemeinsamen Veröffentlichungen [HSU10] und [HSU11] gemündet.

Die 4D-Trajektorie der Flugzeugposition auf dem Rollfeld wird im Rahmen der Reglerauslegung als 2D-Trajektorie (Weg als Funktion der Zeit) angenähert. Die 2D-Trajektorie stellt die Sollposition für das Flugzeug dar. Effekte erhöhter Rollreibung des Flugzeugs in Kurven usw. werden in dieser Untersuchung vernachlässigt.

#### Pilotenmodell

Das Verhalten des Piloten während der Rollphase kann grundsätzlich als ein menschlicher Regler definiert werden: „the ground motion of commercial aircraft is still achieved by manual control of rudder deflection, engines running speed, wheels brakes and nose-wheel steering system“ [BMJ06].

Das hier verwendete Pilotenmodell setzt sich zusammen aus einem PI-Übertragungsverhalten (proportional-integral controller), das die Reaktion auf einen äußeren Reiz modelliert und einem Totzeit-Glied, das die verzögerte Umsetzung des resultierenden Bremswunsches modelliert (s. Abbildung 52). Dies stellt eine in der Regelungstechnik gängige Modellierung der menschlichen Umsetzung eines Reaktionswunsches dar [MK74].

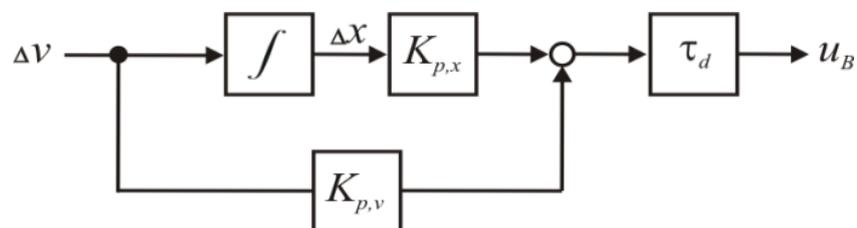


Abbildung 52: Blockschaltbild des Pilotenmodells [HSU11]

#### Flugzeugmodell

Unter der Annahme, dass der Schub während der gesamten Rollphase auf „Ground Idle“ (dt. Bodenleerlauf) steht und die Geschwindigkeit vom Piloten über Bremsengriffe geregelt wird, wie in [CS09] beschrieben, lässt sich das physikalische Verhalten des Flugzeugs als PT<sub>1</sub>-System (Proportionalglied mit Verzögerung 1. Ordnung) beschreiben.

Die Parametrierung des Flugzeugmodells wurde anhand von Messungen am institutseigenen Forschungsflugsimulator, der die flugmechanischen Prozesse eines Airbus A300 genau

simuliert, durchgeführt. Das Blockschaltbild des Flugzeugmodells sowie die relevanten Parameter sind in Abbildung 53 gezeigt.

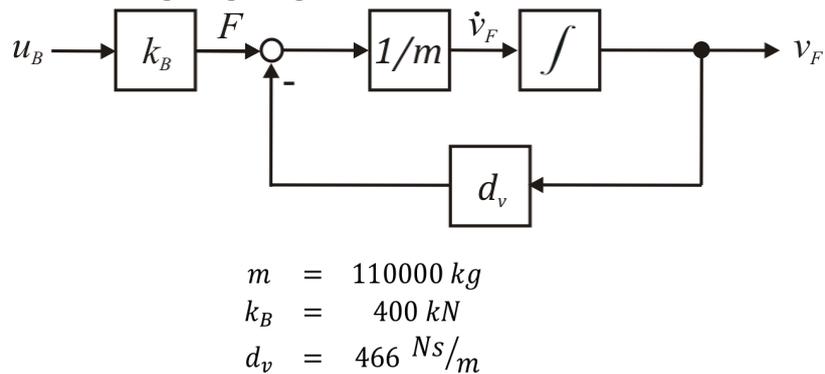


Abbildung 53: Blockschaltbild des Flugzeugmodells [HSU11]

### Regler

Die Aufgabe des Reglers ist es dafür zu sorgen, dass sich das Flugzeug auf dem Rollfeld zur vorgegebenen Zeit am, durch eine Solltrajektorie vorgegebenen Ort, befindet.

Der Regler zur Erzeugung der optimalen Befeuerung des Rollfeldes erhält als Eingangsgröße die Differenz  $e$  zwischen der Solltrajektorie  $x_d$  und der Flugzeugposition  $x_{AC}$ . Diese Differenz entspricht der Abweichung der Flugzeugposition von der optimalen 4D-Trajektorie. Um eine optimale Integration der ermittelten Werte des Reglers in dem Flugsimulator zu ermöglichen, berechnet der Regler die Position der letzten angeschalteten Lampe  $x_{lamp}$  (s. Abbildung 49). Dies ändert somit die Eingangsgröße in das Gesamtsystem aus dem modellierten Pilot und dem Flugzeug von der Geschwindigkeitsdifferenz zur Positionsdifferenz.

Die Regelstrecke setzt sich aus dem Pilotenmodell und dem Flugzeugmodell zusammen. Der Eingang in dem Pilotenmodell ist die Positionsdifferenz  $\Delta x$  zwischen der letzten befeuerten Lampe  $L_f$  und dem Flugzeug, die Ausgangsgröße des Flugzeugmodells ist die Position des Flugzeuges. Die Flugzeugposition wird zurückgeführt und mit der Position der Lampe verglichen. Hierzu wird das  $PI$ -Übertragungsverhalten des Piloten mit der Geschwindigkeitsdifferenz als Eingangsgröße verändert zu einem  $PD$ -Übertragungsverhalten mit der Positionsdifferenz als Eingangsgröße. Die Parameter bleiben hierbei unverändert:  $K_{p,x}$  für den P-Anteil und  $K_{p,v}$  für den D-Anteil. Der Ausgang des Flugzeugmodells wird mit einem Integrator Element ergänzt um die Flugzeugposition zurückführen zu können.

Der gesamte Regelkreis mit dem Regler und der zuvor beschriebenen Regelstrecke wird in Abbildung 54 dargestellt. Die Regelgröße ist die Flugzeugposition  $x_{AC}$ .

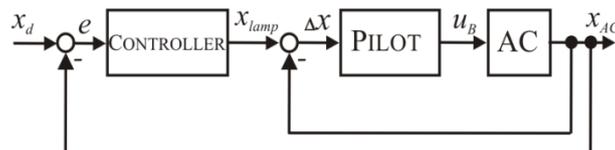


Abbildung 54: Blockschaltbild des gesamten Regelkreises [HSU11]

Die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises, bestehend aus dem Piloten und dem Flugzeug lautet:

$$F_{offen} = \frac{x_{AC}}{\Delta x} = \frac{K_{p,v}s + K_{p,x}}{s} \cdot e^{-s\tau_d} \cdot \frac{k_B}{m} \frac{1}{s + d_v/m}$$

Das Gesamtsystem  $F_{ges}$  mit dem Eingang  $x_{lamp}$  und dem Ausgang  $x_{AC}$  wird nach folgender Vorschrift bestimmt:

$$F_{ges} = \frac{x_{AC}}{x_{lamp}} = \frac{F_{offen}}{1 + F_{offen}}$$

Das Gesamtsystem  $F_{ges}$  hat globales  $P$ -Verhalten, ein konstanter Wert von  $x_{lamp}$  resultiert in einer konstanten Position des Flugzeugs  $x_{AC}$ . Die geforderte Position  $x_d$  hat einen Rampenförmigen Verlauf mit variierenden Steigungen. Damit keine bleibende Regeldifferenz entsteht, ist die minimale Regler Struktur ein  $I_2$ -Regler. Um die Performanz zu steigern, wurden ein  $P$ -Regler und ein Integrator Element  $I_1$  hinzugefügt [HSU11].

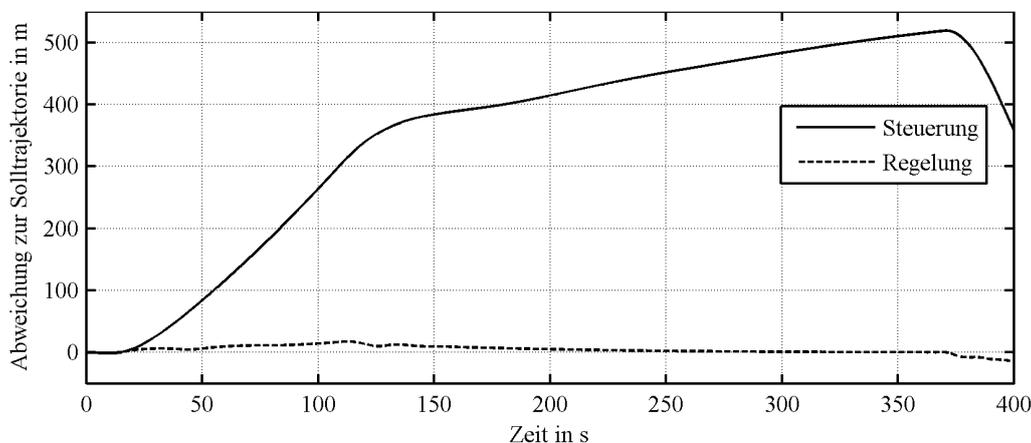
Der resultierende  $PI_2$ -Regler (proportional–integral–integral controller) wird für die Mittelwerte der Parameter aller Piloten so ausgelegt, dass die Abweichung  $x_{AC}$  und die Beschleunigung des Flugzeuges in Längsrichtung gering ist und der gesamte Regelkreis für alle Piloten stabil bleibt. Der resultierende Regler ist in Abbildung 59 dargestellt. Zusätzlich sind Begrenzungen in den Regler eingebaut, die die Länge der angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen vor dem Flugzeug entsprechend der Vorgaben aus Kapitel 3.3 beschränken.

### Simulation

Das Pilotenmodell und der entsprechend ausgelegte Regler wurden zunächst anhand einer Simulation untersucht. Hierfür wurden zehn fiktive Piloten anhand einer Anpassung der Parameter der zehn Autofahrer in [MMP05] erstellt. Die Ergebnisse dieser Simulation sind umfassend in [HSU10] beschrieben.

In Abbildung 55 wird die Grundmotivation für den Einsatz eines Reglers deutlich: mit einer reinen Steuerung kann die Abweichung zwischen der Ist- und der Solltrajektorie über 500 Meter erreichen, während mit der Regelung diese Abweichung stets unter 20 Meter bleibt. Hierbei wurden die dargestellten Verläufe für die gemittelten Pilotenparameter erzeugt.

Eine dynamische Anpassung der Lampenposition an die Zustandsgrößen des Flugzeuges erfolgt bei der reinen Steuerung nicht, es wurde lediglich die vorgegebene Soll-Flugzeuggeschwindigkeit  $v_{soll}$  als  $v_{lamp}$  genutzt.



**Abbildung 55: Vergleich der Abweichung von der Solltrajektorie bei einer Steuerung und einer Regelung [HSU10]**

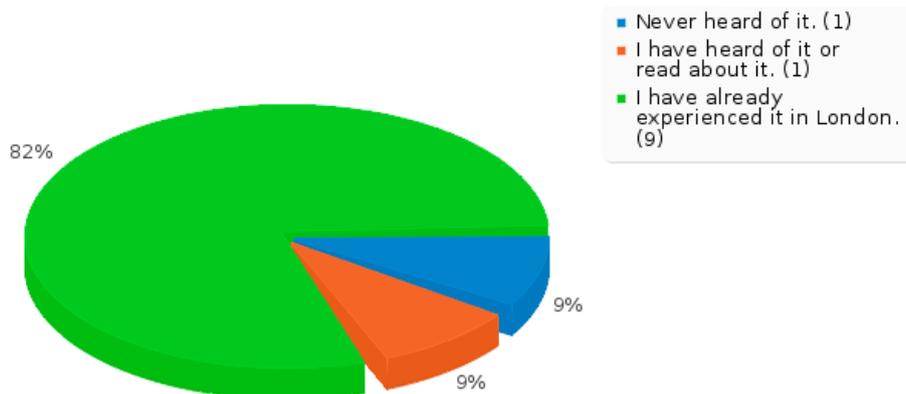
### 3.4.5. Vorversuche

Im Rahmen von Vorversuchen mit Ersten Offizieren (FO) wurden die Parameter des Pilotenmodells identifiziert. In diesen Versuchen wurde das System ausschließlich im Steuerungsmodus (informativer Ansatz) ohne konstante Länge ( $K=0$ ) betrieben. Dabei wurde bereits die komplette Simulationsarchitektur, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, umgesetzt.

Ziel der Vorversuche war ebenfalls die Identifizierung eines geeigneten Werts für die konstante Länge im informativen Ansatz bei den Hauptversuchen. Ebenfalls sollten generelle Empfehlungen der Piloten in die Entwicklung beider Ansätze einfließen.

#### Stichprobe

Die Probanden waren elf männliche Linienpiloten. Sechs davon waren Erste Offizier (FO), fünf waren Senior Erst Offizier (SFO). Zwei Piloten waren Ausbilder. Das Durchschnittsalter betrug 33 Jahre. Der jüngste Pilot war 30 Jahre alt, der älteste 38 Jahre. Die Piloten wiesen durchschnittlich 4346 Flugstunden auf. Der Pilot mit der geringsten Flugerfahrung hatte 1300 Flugstunden geleistet, der mit der meisten Flugerfahrung hatte 9000 Flugstunden geleistet.



**Abbildung 56: Erfahrung mit dem „Follow the Greens“ System in London Heathrow**

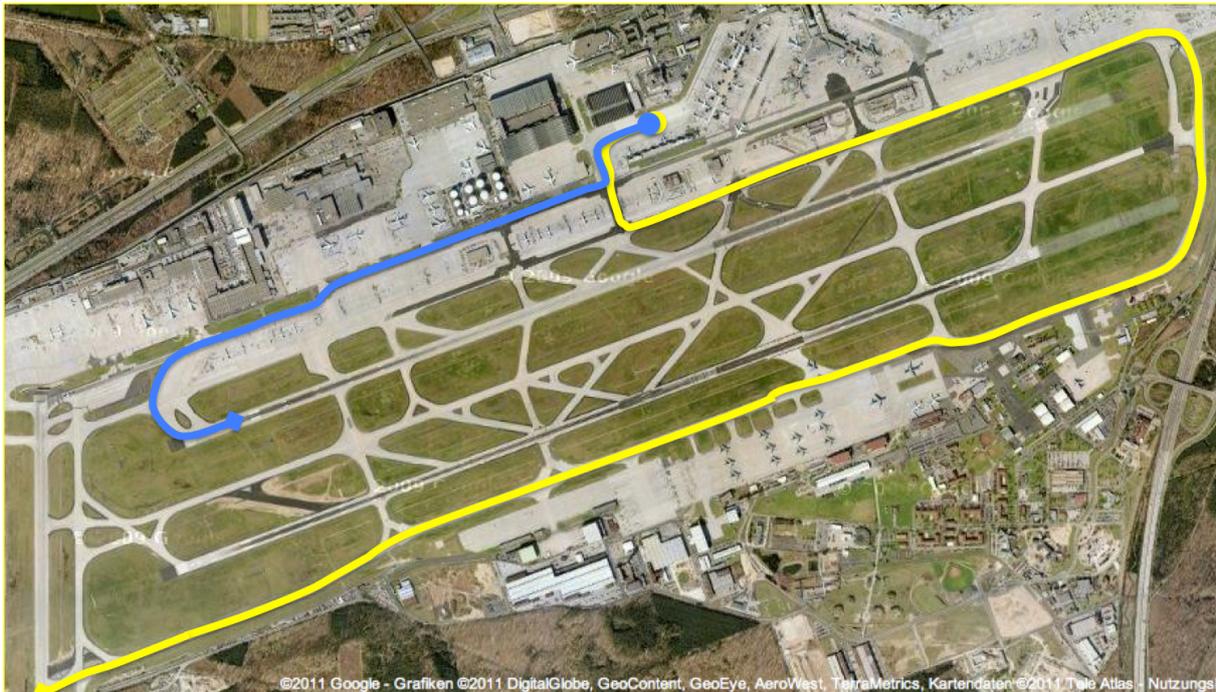
Sechs Piloten flogen zur Zeit der Versuche eine Airbus Maschine, vier Piloten flogen eine Boeing Maschine. Ein Pilot flog den Bombardier CL300.

Eine große Mehrheit der Piloten (neun) waren schon mit dem „Follow the Greens“ System am London Heathrow Flughafen vertraut. Nur ein Pilot hatte noch nie von dem System gehört (s. Abbildung 56).

Eine große Mehrheit der Piloten (neun) kannte den Frankfurter Flughafen als Heimatflughafen und war somit sehr vertraut mit dem vorhandenen Rollwegsystem. Die anderen zwei Piloten waren schon mehrmals auf dem Frankfurter Flughafen gelandet.

#### Versuchsplanung

Es wurden für die Vorversuche zwei Szenarien erstellt. Das erste Szenario diente als Eingewöhnung an das System (Eingewöhnungsszenario ES). Das zweite Szenario war das tatsächliche Versuchsszenario (VS). In beiden Szenarien war kein rollender Fremdverkehr vorhanden.



**Abbildung 57: Darstellung der Szenarien für die Vorversuche – ES: blau, VS: gelb – Flughafenkarte aus Google Maps**

Die Szenarien sind in Abbildung 57 auf einer Karte des Frankfurter Flughafens veranschaulicht. Die Zeitvorgabe wurde gewählt, um ein möglichst breites Spektrum an Geschwindigkeitsveränderungen abzubilden. Eine Zusammenfassung der Szenarien wird in Tabelle 9 gegeben.

**Tabelle 9: Szenarien für die Vorversuche**

	<i>Szenario ES</i>	<i>Szenario VS</i>
Betriebsrichtung	07	25
Start Position	Rollweg M	Rollweg M
Startbahn	07L	18
Taxiroute	N, L, 07L	M, N, B, BEast, S, 18
Geschwindigkeitsvorgabe	Min	15 kn
	Max	30 kn
Taxizeit	ca. 10 min.	ca. 20 min.

Nach einer kurzen Begrüßung füllten die Piloten den Eingangsfragebogen (Anhang A) aus. Die Piloten wurden dann im Simulator mit Hilfe zweier einfacher Rollszenarien mit ausgeschalteten Rollwegbefeuerungselementen mit der Simulationsumgebung vertraut gemacht.

Es wurde zur Vorbereitung ein Eingewöhnungsszenario (ES) mit angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen entlang einer gegebenen Route durchgeführt. Die Piloten führten dann den tatsächlichen Versuch (Versuchsszenario, VS) zwei Mal durch. Abschliessend wurden die Piloten nach deren Eindrücke mit dem System und nach eventuellen Verbesserungsmöglichkeiten in einem Debriefing befragt.

Der Ablauf eines Versuchstages sowie die ungefähre Dauer der Untersuchungen wird in Tabelle 10 zusammengefasst. Zusammen mit einer Pause dauerte ein Versuchsdurchlauf etwa zwei einhalb Stunden.

**Tabelle 10: Ablauf der Vorversuche**

Begrüßung und Eingangsfragebogen	15 min
Briefing	15 min
Eingewöhnung an den Simulator	15 min
Eingewöhnung an das System (Szenario ES)	10 min
Versuch 1 (Szenario VS)	20 min
Versuch 2 (Szenario VS)	20 min
Debriefing	30 min

### Ergebnisse

Die Vorversuche ermöglichten die Ermittlung einer geeigneten konstanten Länge von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen für den informativen Ansatz, sowie die Identifizierung der Parameter für das im kooperativen Ansatz eingesetzte Pilotenmodell zur Auslegung des Reglers.

Dazu wurden auch realistische Szenarien für die späteren Versuche zusammen mit den Piloten festgelegt (s. Kapitel 4.3.1), sowie Verbesserungsvorschläge für das System gesammelt.

### Informativer Ansatz

Die konstante Länge von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen sollte abhängig von der Höhe des jeweiligen Cockpits gewählt werden [BUO10]. Hierbei sind jedoch auch die geometrischen Einschränkungen in der Benutzung der Rollwegbefeuerungselementen zur Rollführung, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, zu beachten. Eine maximale Länge der angeschalteten Elemente von 250 Metern und eine minimale Länge von 30 Metern wurden hier festgelegt.

**Tabelle 11: Konstante Länge nach Cockpithöhe**

<i>Fahrzeugtyp</i>	<i>Cockpithöhe (in Metern)</i>	<i>Konstante Länge (in Metern)</i>
VW Bus	1,77	60
A320	4,56	150
A300	5,50	100

In Tabelle 11 werden die verwendeten konstanten Längen von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen für die räumliche Führung im WFF Projekt für Navigationsbusse, sowie den Airbus A320 zusammengefasst. Der Flugzeugsimulator am Institut hat eine simulierte Cockpithöhe von 5,50 m (A300, s. Kapitel 4.2.2), demnach ist eine optimale konstante Länge der Rollwegbefeuerungselemente von 100 m zu erwarten.

Um einen genaueren Wert der optimalen Länge zu ermitteln, wurde diese Größe während der Vorversuche im Flugsimulator untersucht. Es wurde hierbei eine Distanz zwischen der

Flugzeugposition und der letzten angeschalteten Lampe zwischen 40 m und 160 m beobachtet, wie beispielhaft für Pilot 2 in Abbildung 58 zu sehen ist. Dementsprechend wurde eine konstante Länge von 100 m für die Hauptversuche gewählt. Dieser Wert liegt zwischen 30 m und 250 m und erfüllt somit die geometrischen Einschränkungen aus Kapitel 3.3.

### Kooperativer Ansatz

Die aus den gewonnenen Daten identifizierten Parameter  $K_{p,v}$  und  $K_{p,x}$ , sowie die Totzeit  $\tau_d$  aus dem Pilotenmodell (s. Abbildung 52) für alle elf Versuchsteilnehmer werden in Tabelle 12 dargestellt.

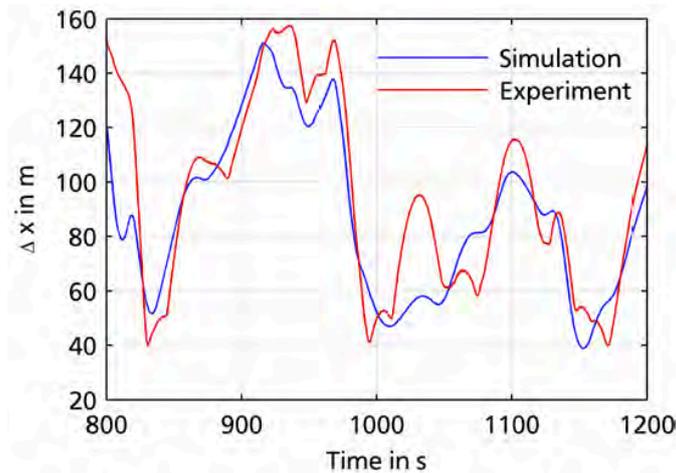
**Tabelle 12: Parameter des Pilotenmodells bei den Vorversuchen**

Pilot	Versuch	$K_{p,v}$	$K_{p,x}$	$\tau_d$
1	1	2.79930e <sup>-2</sup>	1.11744e <sup>-4</sup>	7.98564
	2	2.81531e <sup>-2</sup>	1.46831e <sup>-4</sup>	7.46782
2	1	3.96296e <sup>-2</sup>	7.96278e <sup>-5</sup>	3.70625
	2	3.35014e <sup>-2</sup>	2.15921e <sup>-4</sup>	7.40738
3	1	3.81770e <sup>-2</sup>	3.01855e <sup>-4</sup>	5.92293
	2	1.45740e <sup>-2</sup>	1.78923e <sup>-4</sup>	3.84679
4	1	3.05661e <sup>-2</sup>	9.62123e <sup>-5</sup>	2.07146
	2	2.25086e <sup>-2</sup>	9.60957e <sup>-5</sup>	5.07032
5	1	4.24792e <sup>-2</sup>	1.28748e <sup>-4</sup>	<del>0.53172</del>
	2	3.54592e <sup>-2</sup>	1.45522e <sup>-4</sup>	5.29400
6	1	6.00188e <sup>-2</sup>	<del>9.66296e<sup>-4</sup></del>	7.30643
	2	2.86783e <sup>-2</sup>	1.05482e <sup>-4</sup>	<del>9.87580</del>
7	1	4.81224e <sup>-2</sup>	2.89079e <sup>-4</sup>	5.27080
	2	2.82975e <sup>-2</sup>	8.79252e <sup>-5</sup>	<del>0.61022</del>
8	1	5.18987e <sup>-2</sup>	<del>7.76339e<sup>-4</sup></del>	<del>8.92238</del>
	2	<del>2.75508e<sup>-1</sup></del>	<del>7.23946e<sup>-4</sup></del>	<del>0.82322</del>
9	1	4.39537e <sup>-2</sup>	2.96755e <sup>-4</sup>	5.47392
	2	2.79593e <sup>-2</sup>	2.39138e <sup>-4</sup>	<del>13.53721</del>
10	1	4.60908e <sup>-2</sup>	3.24198e <sup>-4</sup>	<del>8.46394</del>
	2	3.52949e <sup>-2</sup>	1.31537e <sup>-4</sup>	2.76948
11	1	4.01748e <sup>-2</sup>	3.31852e <sup>-4</sup>	6.44977
	2	1.94757e <sup>-2</sup>	<del>4.77466e<sup>-4</sup></del>	<del>0.85623</del>
<b>Mittelwert</b>		<b>0.0337</b>	<b>0.1863e<sup>-3</sup></b>	<b>5.29 s</b>
<b>Standardabweichung</b>		<b>0.0511</b>	<b>2.4e<sup>-4</sup></b>	<b>3.22 s</b>

Die Parameter wurden mittels der Methodik der nichtlinearen kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Es wurden pro Pilot jeweils alle drei Parameter für jeden Lauf ermittelt. Nach Entfernung aller Ausreißer (gestrichen dargestellt: Werte über 0,1 für  $K_{p,v}$ , über 0,0004 für  $K_{p,x}$  und über 8s sowie unter 2s für die Totzeit  $\tau_d$ ) wurden die jeweiligen Werte aller drei Parameter gemittelt.

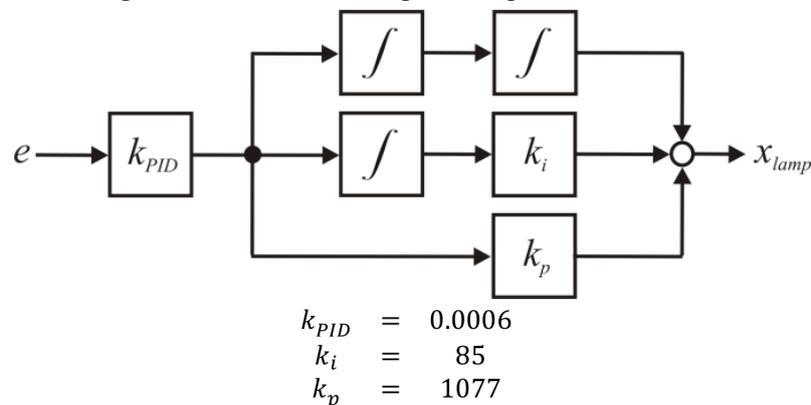
Die so gewonnenen Daten fließen dann in das Pilotenmodell und anschließend in die Reglerauslegung für die Hauptversuche ein. Die Parameteridentifikation und anschließende

Reglerauslegung wird in [HSU11] ausführlich beschrieben. Die Genauigkeit des resultierenden Pilotenmodells ist in Abbildung 58 veranschaulicht. Anhand dieses Graphs sieht man, dass die Reaktionen des modellierten Pilots – in blau – und die des reellen Pilots – in rot – auf die Vorgaben den selben generellen Verlauf haben.



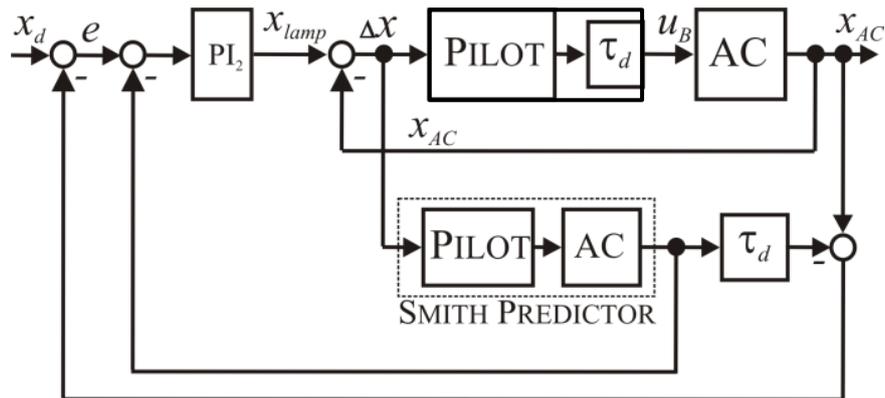
**Abbildung 58: Distanz zwischen Flugzeugposition und letzter angeschalteter Lampe für das Pilotenmodell (Simulation) und Pilot 2 (Experiment) [HSU11]**

Der resultierende  $PI_2$  Regler wird in Abbildung 59 dargestellt.



**Abbildung 59:  $PI_2$  Regler mit Parametern [HSU11]**

Darüberhinaus wurde aus dem Debriefing die Notwendigkeit einer vorausschauenden Komponente für die Regelung deutlich. Da das Pilotenmodell eine hohe Totzeit ausweist wurde hierfür ein Smith-Prädiktor ausgewählt [Smi59]. Der resultierende Regler wird in Abbildung 60 dargestellt.



$$\begin{aligned}
 k_{PID} &= 0.0015 \\
 k_i &= 74 \\
 k_p &= 771 \qquad \tau_d = 5.43s
 \end{aligned}$$

**Abbildung 60: Regler mit Smith-Prädiktor - nach [HSU11]**

Der Vorteil der vorausschauenden Komponente gegenüber einem normalen  $PI_2$ -Regler (proportional–integral–integral controller) wurde auch während der Hauptversuche untersucht und in [HSU11] dargestellt und analysiert.



## 4. Konzeption der experimentellen Untersuchungen

Im folgenden Kapitel wird die Konzeption der experimentellen Untersuchungen dargestellt, die aus einer Beschreibung des experimentellen Designs, der Realisierung des Konzepts, sowie der Versuchsplanung besteht.

### 4.1. Experimentelles Design

Im folgenden Abschnitt wird das experimentelle Forschungsdesign für die Untersuchung der in Kapitel 3.2 vorgestellten Hypothesen beschrieben.

#### 4.1.1. Variablen

Zunächst müssen die relevanten abhängigen und unabhängigen Variablen für die experimentellen Untersuchungen identifiziert werden.

##### Unabhängige Variablen

Die unabhängigen Variablen stellen die Stellgrößen dar, die vom Versuchsleiter gezielt verändert werden, um deren Auswirkung auf die Probanden zu ermitteln. Es wird hier der Einfluss von zwei Stellgrößen untersucht: das Vorwissen über das Ziel des Systems – die zusätzliche zeitliche Führung – und die verschiedenen Stufen des Entscheidungsunterstützenden Systems anhand der Rollwegbefeuerungselemente.

**Tabelle 13: Ausprägung der unabhängigen Variablen**

	<i>Vorwissen</i>	<i>Entscheidung unterstützendes System</i>
Ausprägung	V0: Vorwissen nicht vorhanden V1: Vorwissen vorhanden	A0: Baseline A1: Informativer Ansatz (Steuerung) A2: Kooperativer Ansatz (Regelung)

Die Ausprägung der zwei unabhängigen Variablen wird in Tabelle 13 dargestellt. Die genaue Erläuterung der drei Stufen des Systems ist in Tabelle 14 gegeben mit der jeweiligen Position der letzten angeschalteten Lampe und der Dimension der Vorgabe.

**Tabelle 14: Position der letzten Lampe nach Systemart**

	<i>Baseline (A0)</i>	<i>Steuerung (A1)</i>	<i>Regelung (A2)</i>
Position der letzten Lampe am Zeitpunkt t	Position von Ownship am Zeitpunkt t + 100m	Position der Solltrajektorie am Zeitpunkt t + 100m	Errechnete Position aus Abweichung der Solltrajektorie
Vorgabe	Raum	Raum + Zeit	Raum + Zeit

##### Abhängige Variablen

Die abhängigen Variablen stellen die Messgrößen dar, die zur Bewertung des Einflusses der unabhängigen Variablen benutzt werden. Diese können quantitativ oder qualitativ erfasst werden, sowie objektiv oder subjektiv. Eine Zusammenfassung der hier gemessenen abhängigen Variablen und deren Klassifizierung ist in Tabelle 15 gegeben.

**Tabelle 15: Klassifizierung der abhängigen Variablen**

	QUANTITATIV	QUALITATIV
OBJEKTIV	Ist-Trajektorie Abweichungen	
SUBJEKTIV	Beanspruchung	Benutzbarkeit Lernbarkeit Situationsbewusstsein

#### 4D-Isttrajektorie

Die tatsächlich abgerollte Trajektorie wird, entsprechend der Möglichkeiten des Simulators, mit einer Frequenz von 40Hz aufgezeichnet. Die entsprechende Solltrajektorie, ihre Abweichung, die Länge der angeschalteten Rollwegbefehrsselemente vor dem Ownship, sowie alle Steuertätigkeiten der Piloten (Schub- und Brems-Positionen) werden mit der gleichen Frequenz aufgenommen.

#### Situationsbewusstsein

Für die Messung des Situationsbewusstseins wird die SART (Situation Awareness Rating Technique) Skala verwendet [Tay90]. Diese subjektive Befragungsmethode fragt die erforderliche Aufmerksamkeit für eine Situation über deren Instabilität, Veränderlichkeit und Komplexität ab. Die vorhandene Aufmerksamkeit des Probanden wird über seine Aufgewecktheit, seine verfügbare mentale Kapazität, seine Konzentration und über die Aufteilung seiner Aufmerksamkeit erfasst. Die Informationsmenge und Vertrautheit mit der Situation geben Rückschlüsse auf das Verständnis des Probanden. Eine Zusammenfassung der erfassten Dimensionen anhand der neun Kategorien ist in Tabelle 16 gegeben.

**Tabelle 16: Dimensionen der SART-Skala**

KATEGORIEN	DIMENSIONEN
Instabilität der Situation	Erforderte Aufmerksamkeit
Veränderlichkeit der Situation	
Komplexität der Situation	
Aufgewecktheit	Vorhandene Aufmerksamkeit
Verfügbare mentale Kapazität	
Konzentration	
Aufteilung der Aufmerksamkeit	
Informationsmenge	Verständnis
Vertrautheit der Situation	

Das gesamte Situationsbewusstsein ergibt sich dann aus der Differenz zwischen dem Verständnis und dem Aufmerksamkeitsdefizit, errechnet aus der Differenz zwischen der erforderlichen und der vorhandenen Aufmerksamkeit ( $SB = V - (EA - VA)$ ).

### Arbeitsbeanspruchung

Zur subjektiven Messung der Arbeitsbeanspruchung (eng.: workload) der Piloten wurde die subjektive Beanspruchungsskalierung der National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) [HS88] eingesetzt. Diese Befragung mit standardisierten Fragen und Antworten setzt sich aus sechs Subskalen zusammen. Diese messen jeweils Aufgaben-, Verhaltens- und individuelle Merkmale der Arbeitsbeanspruchung und lassen sich in die zwei Dimensionen Belastung (eng.: stress) und Beanspruchung (eng.: strain) untergliedern (s. Tabelle 17).

Nach [Roh73] gilt als Belastung „die Summe aller auf den Menschen einwirkenden Arbeitsparameter, die überwiegend über das rezeptorische System wahrgenommen und empfunden werden oder Anforderungen an das effektorische System stellen“ während die Beanspruchung „die Summe aller durch unterschiedliche individuelle Eigenschaften bedingten, unterschiedlichen Auswirkungen der Belastung auf Menschen“ zusammenfasst.

**Tabelle 17: Gemessene Merkmale und Dimensionen in NASA-TLX nach [HS88]**

SUBSKALEN	MERKMALE	DIMENSIONEN
geistige Anforderungen	Aufgabenmerkmale	Belastung
körperliche Anforderungen		
zeitliche Anforderungen		
Aufgabenerfüllung	Verhaltensmerkmale	Beanspruchung
Anstrengung		
Frustration	individuelle Merkmale	

Die Einschätzung der Subskalen erfolgt jeweils über eine bipolare (niedrig/hoch), zwanzigstufige Skalierung von 0 (= sehr niedrig) bis 20 (= sehr hoch). Die Bewertungen der einzelnen Subskalen werden dann aufsummiert zu einem ganzen Workload Score. Das hier verwendete Verfahren basiert auf einer Vereinfachung des NASA TLX: dem Raw TLX (RTLX), in dem keine Gewichtung der jeweiligen Subskalen durch die Probanden erfolgt [BBH89] (s. Anhang D).

### Benutzbarkeit und Lernbarkeit

Zur subjektiven Messung der Benutzbarkeit und Angemessenheit des Systems wurden zwei Skalen verwendet: die „System Usability Scale“ (SUS) und eine „modifizierte Cooper Harper Rating Scale“ (MCHS).

Die SUS [Bro96] erfragt eine Reihe verschiedener Benutzbarkeitsaspekte, wie beispielsweise die Systemkomplexität oder den Bedarf an Unterstützung und Training. Mit einer fünfstufigen Likert-Skala wird die Zustimmung oder Ablehnung zu zehn benutzbarkeitsbezogenen Aussagen erhoben, wobei jeweils fünf Aussagen positiv und negativ formuliert sind (s. Tabelle 18). Die Werte werden dann über ein aspektspezifisches Gewichtungsverfahren für jeden Probanden berechnet. Der Gesamtwert für ein System kann zwischen Null und 100 variieren, was eine niedrige (0) bis hohe (100) Benutzbarkeit ausdrückt. Die hier verwendete Skala wurde entsprechend der Empfehlungen aus einer Studie von 2009 leicht modifiziert [LS09], um das Verständnis der Fragen durch die Probanden zu erhöhen. Neben der Benutzbarkeit kann hiermit auch gezielt die Lernbarkeit des Systems gemessen werden [LS09].

**Tabelle 18: Gemessene Dimensionen der SUS-Skala nach [LS09]**

	BENUTZBARKEIT	LERNBARKEIT
Ich denke, dass ich dieses System gerne häufig nutzen würde.	X	
Ich fand das System unnötig komplex.	X	
Ich denke, das System war einfach zu benutzen.	X	
Ich denke, ich würde die Hilfe eines Technikers benötigen, um das System benutzen zu können.		X
Ich halte die verschiedenen Funktionen des Systems für gut integriert.	X	
Ich halte das System für zu inkonsistent.	X	
Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute sehr schnell lernen würden, mit dem System umzugehen.	X	
Ich fand das System sehr mühsam zu benutzen.	X	
Ich fühlte mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher.	X	
Ich musste viele Dinge lernen, bevor ich das System nutzen konnte.		X

Bei der Cooper-Harper Scale [HC86] beantwortet der Proband eine Reihe verbundener, aufeinander aufbauender Fragen, die sich auf die Angemessenheit eines Systems beziehen bzw. auf das Ausmaß der Notwendigkeit für dessen Neugestaltung. Hier wird eine für die Rollführung angepasste Version der Cooper-Harper Rating Scale (Modified Cooper Harper Rating Scale, MCHS) verwendet [UOD10]. Die Werte der MCHS variieren zwischen eins (das System ist exzellent und sehr erwünscht) und zehn (das System hat große Defizite und eine Neugestaltung ist zwingend erforderlich).

#### 4.1.2. Überprüfung der Hypothesen

Um die in Kapitel 3.2 vorgestellten Hypothesen anhand der Versuche zu validieren, müssen diese zunächst operationalisiert werden. Zu diesem Zweck wurden die relevanten Dimensionen für die jeweiligen Hypothesen identifiziert, sowie passende Metriken (Messsysteme) ausgewählt (s. Tabelle 19).

**Tabelle 19: Zu untersuchende Dimensionen und Metriken**

HYPOTHESE	DIMENSION	METRIK
H1: Räumliche und zeitliche Einhaltung der Solltrajektorie	Gesamte räumliche Abweichung	Richtige Route
	Differenz zur Solltrajektorie	Mittelwert Standardabweichung
H2.1: Situationsbewusstsein	Situationsbewusstsein	SART-Skala
H2.2: Beanspruchung	Arbeitsbeanspruchung	RTLX-Skala

H3: Gebrauchstauglichkeit	Angemessenheit des Systems	MCHS-Skala
	Benutzbarkeit	SUS-Skala
	Intuitivität	Versuche mit und ohne Vorwissen

### H1: Räumliche und zeitliche Einhaltung der Solltrajektorie

Die räumliche Einhaltung der Solltrajektorie sollte mit allen Systemarten erfolgen.

Die zeitliche Einhaltung mit den Systemen A1 und A2 sollte besser werden als mit dem Baseline-System A0 und den in Kapitel 3.1 aufgeführten Anforderungen genügen. Dementsprechend wird hierbei eine weit geringere Differenz zur Solltrajektorie mit den Systemarten A1 und A2 als mit der Baseline A0 erwartet.

#### H2.1: Situationsbewusstsein

Das Situationsbewusstsein der Piloten soll mit allen Systemarten ähnlich hoch bleiben mit einem erwarteten höheren Wert an erforderter Aufmerksamkeit für die Systeme A1 und A2 als für das Baseline-System A0.

Das Vorwissen (V1) sollte das Verständnis der Aufgabe positiv beeinflussen. Für Systeme A1 und A2 sollte das Situationsbewusstsein einen Wert auf der SART-Skala von 4 nicht unterschreiten (möglicher Wertebereich: 1 (niedrige SA) bis 14 (hohe SA)).

#### H2.2: Beanspruchung

Die Beanspruchung der Piloten durch die Systemarten A1 und A2 wird, aufgrund der höheren Komplexität der geforderten Aufgabe, höher erwartet als mit dem Baseline-System A0. Jedoch soll das Maß an Beanspruchung nach der Raw TLX-Skala den Wert 80 von 160 möglichen Punkten nicht überschreiten.

### H3: Gebrauchstauglichkeit

Es wird erwartet, dass der Grad an Vorwissen nur einen geringen Einfluss auf die Einhaltung der Solltrajektorie hat. Die Gebrauchstauglichkeit des Systems sollte jedoch mit Vorwissen (V1) höher sein als ohne Vorwissen (V0).

Die Gebrauchstauglichkeit des Systems wird, aufgrund der höheren Komplexität, geringer erwartet für Systemarten A1 und A2 als für die Baseline A0. Jedoch soll die gemessene Angemessenheit des Systems auf der MCHS-Skala den Wert 5 nicht überschreiten (je geringer der Wert desto besser die empfundene Angemessenheit des Systems), sowie die Benutzbarkeit nach der SUS-Skala nicht unter 50% ausfallen.

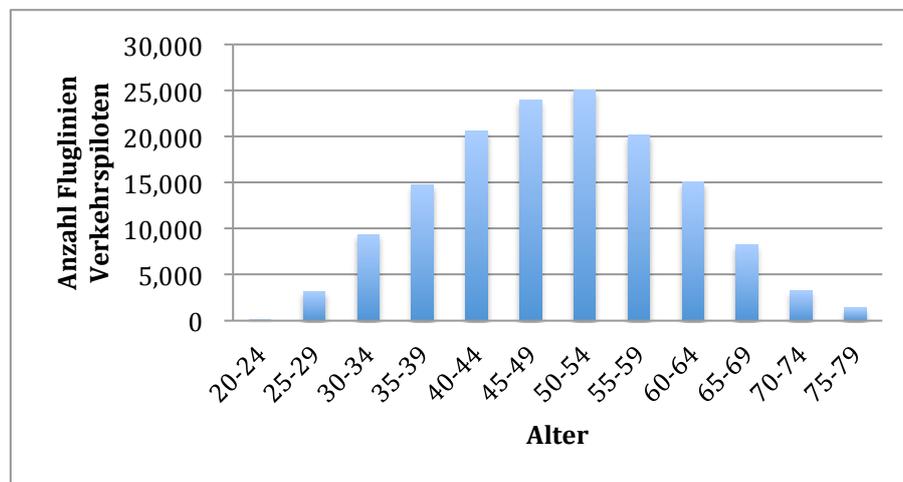
#### 4.1.3. Stichprobenumfang

Auf Grund der geringen Streuung der zu untersuchenden Gruppe, die eine Expertengruppe darstellt, wird eine mittlere bis große Effektgröße erwartet und soll somit abgesichert werden. Dies entspricht für den gewählten zweifaktoriellen Versuchsplan 2x3 (zwei unabhängige Variablen mit einer Ausprägung jeweils von zwei und drei Stufen, s. Kapitel 4.1.1) mit Messwiederholungen einer ausreichenden Anzahl von Versuchspersonen von  $n_{opt} = 14$  laut [BD06] Kapitel 9.2, Tabelle 9.11. Diese Zahl ergibt die optimale Stichprobengröße für ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  und eine Teststärke von  $1 - \beta = 0,8$ .

Aufgrund der hohen Homogenität der zu untersuchenden Zielgruppe wurde eine proportional geschichtete Stichprobe gewählt. Diese Stichprobenart verspricht bessere Schätzwerte als eine Zufallsstichprobe [BD06].

Aus den US Civil Airmen Statistiken [FAA11] geht hervor, dass ein sehr geringer Anteil von Fluglinienpiloten Frauen sind (5597 Frauen aus einer Gesamtanzahl von 145902 Verkehrspiloten, dies entspricht einem Anteil von 3,8%). Dementsprechend wurden für die Versuche ausschließlich männliche Piloten gewählt.

Die Altersverteilung der Fluglinien-Verkehrspiloten im Jahr 2011 in den Vereinigten Staaten wird in Abbildung 61 dargestellt. Entsprechend dieser Verteilung wurden nur Piloten zwischen 35 Jahre und 64 Jahre für die Versuche ausgewählt. Dies entspricht 88% aller Fluglinien-Verkehrspiloten.



**Abbildung 61: Altersverteilung von Fluglinien-Verkehrspiloten in 2011 (Daten aus [FAA11])**

#### 4.1.4. Statistische Tests

Um die verschiedenen Systeme zu untersuchen, wird eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen (eng. Repeated Measures ANOVA) verwendet. Jeder Faktor wird an jeder Versuchsperson untersucht. Dieses ermöglicht eine Untersuchung von intra-individuellen Zusammenhängen. Durch diese einzelfallanalytische Aufbereitung der Daten der vorhandenen Probandenstrichprobe wird die Leistung der anschließenden aggregatstatistischen Auswertung anhand von RM-ANOVA erhöht [Köh08].

Dies ist besonders sinnvoll, wenn das individuelle Empfinden der verschiedenen Versuchspersonen für die grundlegende Aufgabe ausschlaggebend für die Bewertung ist.

### 4.2. Realisierung des Konzepts

Die Simulationsumgebung für die Durchführung der Versuche bestand aus dem Institutseigenen Forschungssimulator mit einer gesonderten Außensicht, gesteuert von einem Surface Manager und dem 4D-Rollführungsmodul.

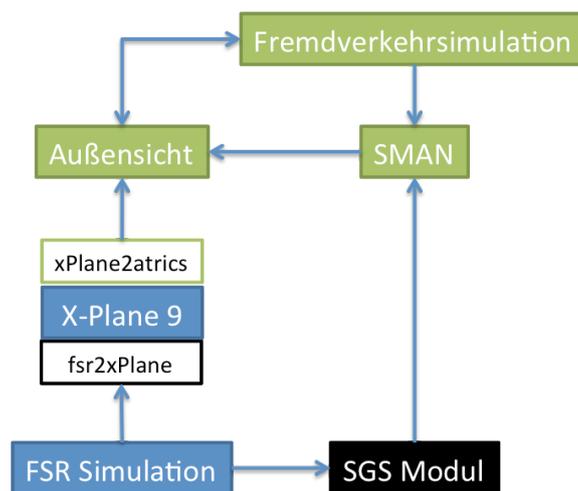
Zunächst wird die generelle Simulationsarchitektur für die Versuche dargestellt.

#### 4.2.1. Simulationsarchitektur

Für die Durchführung der experimentellen Untersuchungen wurde der Forschungssimulator des Instituts mit zwei Software-Modulen der Firma Atrics sowie dem Surface Guidance System (SGS) Modul ergänzt. Die resultierende Gesamtarchitektur wird in Abbildung 62 gezeigt. Die Einbindung der externen Simulation (grün dargestellt) mit einer gesonderten

Außensicht zur Darstellung von einzelschaltbaren Rollwegbefeuerungselementen, einer Fremdverkehrssimulation und dem Surface Manager (SMAN) war Teil der Vorintegration für spätere, verteilte Simulationskampagnen im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundvorhabens iPort (innovative Airport - [Atr12b]), das Nachfolgeprojekt des zuvor erwähnten Verbundvorhabens WFF.

Die Grundkommunikation zu den Atrics Simulationskomponenten erfolgte über die Anbindung der Flugsimulationssoftware X-Plane Version 9. Hierfür wurde ein bereits vorhandenes X-Plane Plug-In (xPlane2atrics) der Firma Atrics verwendet, das die Vermittlung aller notwendigen Ownship Daten an die Atrics Programme ermöglichte, insbesondere über die Standardschnittstelle ASTERIX CAT010 [EC07]. Zur Vermittlung der Ownship Daten an X-Plane Version 9 wurde das fsr2xPlane Plug-In geschrieben. Dieses wurde nach den Versuchen weiter im Simulator verwendet, um die Steuerung der Außensicht mit X-Plane Version 9 zu ermöglichen.



**Abbildung 62: Gesamte Simulationsarchitektur für die Versuche**

Zur Ermittlung der nötigen Informationen für die zeitliche Führung entlang der 4D-Trajektorie durch die dynamisch angeschalteten Rollwegbefeuerungselemente, sowie zur Übermittlung der errechneten Daten an den Surface Manager (SMAN) wurde das Surface Guidance System (SGS) Modul entwickelt. Die Kommunikation zwischen dem SMAN und dem SGS Modul erfolgt anhand von XML Daten über eine TCP-IP Verbindung.

#### 4.2.2. Forschungssimulator

Der Festsitzforschungssimulator des Instituts für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU Darmstadt dient als Entwicklungs- und Untersuchungsplattform für neuartige Avionik und Mensch-Maschine Systeme im Cockpit, sowie neuer Flugverfahren. Die Grundkonzepte beim Entwurf des Forschungscockpits waren eine flexible Konfigurationsmöglichkeit und eine einfache Erweiterungsmöglichkeit. Dies wurde anhand einer modular verteilten Architektur umgesetzt [ARE98].



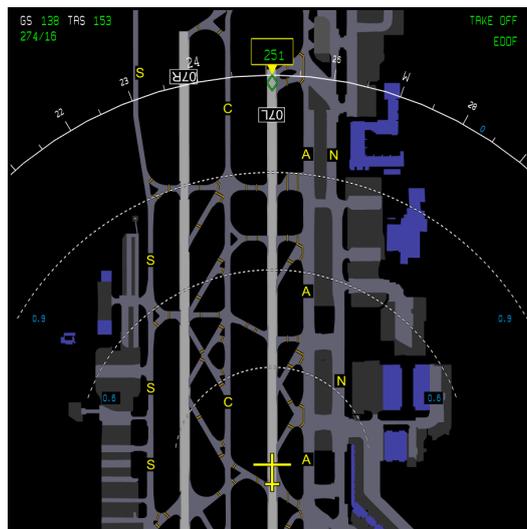
**Abbildung 63: FSR Cockpit Simulator**

Die realitätsgetreue Abbildung der Wirklichkeit wird anhand einer hochwertigen Außensichtanlage ermöglicht. Das zugrundeliegende flugmechanische Modell entspricht dem eines Airbus A300-B2 (s. Abbildung 63).

Das zweisitzige Cockpit ist ausgestattet mit:

- jeweils einem Navigationsdisplay (ND), einem Primary Flight Display (PFD), einem Side Stick und Handrädern für Kapitän und erstem Offizier
- einer Flight Control Unit (FCU) und einem Overhead Display mit Touchscreen Funktionalität zur Steuerung der Mensch-Maschine Systeme
- einem Multipurpose Control Display Unit (MCDU) mit upper und lower Electronic Centralized Aircraft Monitoring (ECAM) Display mit Touchscreen Funktionalität.

Für die Versuche wurde der Primary Flight Display (PFD) in Standard Airbus Konfiguration benutzt. Auf dem Navigationsdisplay wurde eine bewegliche Karte des Flughafens (s. Abbildung 64), entsprechend der Entwicklungen beschrieben in [VUK08], dargestellt. Diese Karte diente als Ersatz für den First Officer (FO).



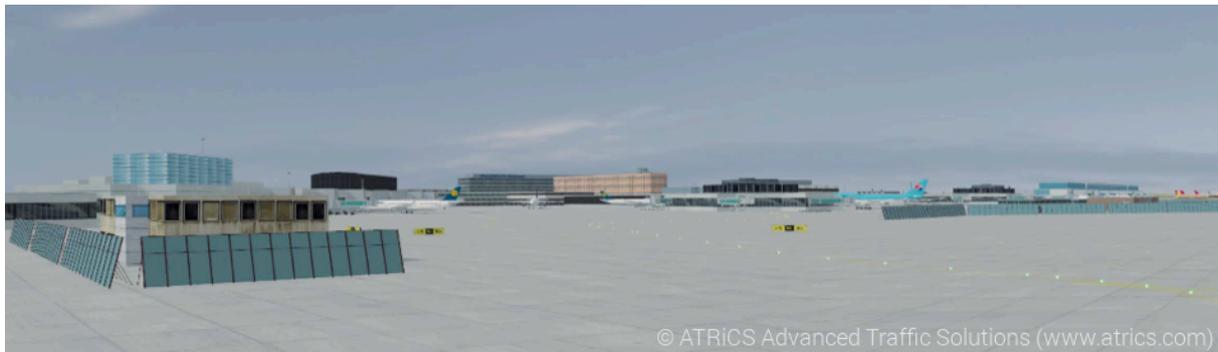
**Abbildung 64: Navigation Display (ND) mit Airport Moving Map (AMM)**

Die Ownship Daten wurden dann über die X-Plane Simulationssoftware anhand von zwei Plug-Ins an die Außensicht der Firma Atrics übermittelt. Die Anbindung an das SGS Modul erfolgte über die für die verteilte Simulation entwickelte Schnittstelle: den Datenpool [Eng01].

### 4.2.3. Außensicht

Der Festsitzforschungssimulator verfügt über eine voll-digitale, kollimierte Außensicht. Durch einen entsprechend gekrümmten Spiegel werden hierbei die Projektionsstrahlen derart parallelgerichtet, dass die Außenwelt in größerer Entfernung erscheint und somit der Eindruck räumlicher Tiefe erzeugt wird. Beim Blickwechsel von der Außensicht in das Cockpit hinein wird eine Umfokussierung ausgelöst, die den in der Realität auftretenden Vorgang nachbildet [Wip05].

Der durch den Spiegel dargestellte Sichtbereich beträgt 180° in der Horizontalen und etwa 40° in der Vertikalen. Das Bild der Außensicht wird in einer Dreikanalprojektion auf einem Zwischenmedium abgebildet und dann über die Spiegel ins Cockpit projiziert [Sin08].

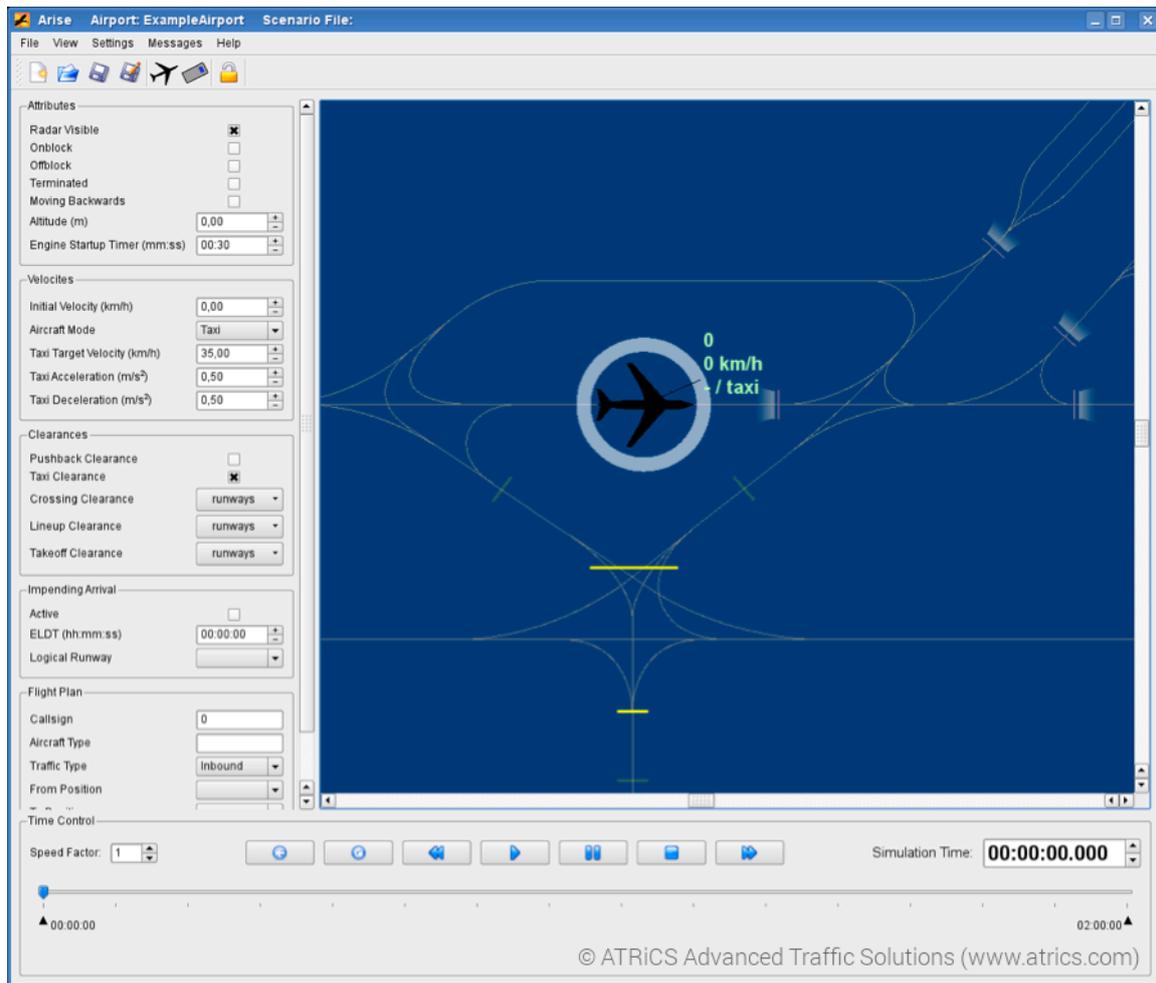


**Abbildung 65: Außensichtbeispiel mit Aliza [Atr11b]**

Für die Bildgenerierung wurde ein COTS Rechner mit drei Grafikkarten verwendet. Bei der Darstellungssoftware handelt es sich um das Flugsimulationsprogramm Aliza der Firma Atrics. Dieses Programm bietet die Möglichkeit die Rollwegbefeuerungselemente für den Flughafen Frankfurt einzeln an- und auszuschalten (s. Abbildung 65) und wurde bereits im Rahmen von Simulationsversuchen für das WFF Projekt eingesetzt [Böt10].

### 4.2.4. Fremdverkehr

Die Fremdverkehrssimulation wurde anhand des Programms Arise der Firma Atrics durchgeführt. Die Software ist ein graphischer Editor für Flughafenverkehrsszenarien (s. Abbildung 66) und wurde insbesondere für Testzwecke bei der Einführung von A-SMGCS Komponenten entwickelt. Sie ermöglicht hier auch die Vermittlung der Ownship Daten aus der Außensicht zum Surface Manager.



**Abbildung 66: ARISE Hauptfenster [Atr11a]**

Die graphisch erzeugten und editierten Fremdverkehrselemente konnten für jedes Szenario abgespeichert und wieder aufgerufen werden. Hierbei wurden der Flugzeugtyp, die Fluggesellschaft, sowie der Startpunkt und die Geschwindigkeit festgelegt. Die Anzahl der benötigten beweglichen Fremdverkehrselemente für die jeweiligen Szenarien wird in Tabelle 20 gegeben. Die Kreuzung dieser Flugzeuge vor oder nach Ownship entlang der Solltrajektorie diente zur Begründung der zeitlichen Vorgaben. Mehrere geparkte Flugzeuge wurden ebenfalls entlang der Solltrajektorien erzeugt, um den Realismus der Simulation zu erhöhen.

Die Steuerung der jeweiligen Szenarien wurde ebenfalls anhand des unteren Teils des ARISE Hauptfensters durchgeführt.

### 4.2.5. Räumliche Führung

Der Surface Manager (SMAN) der Firma Atrics ermöglicht die Erstellung von Trajektorien anhand von räumlichen Vorgaben für alle, sich am Flughafenboden befindlichen, Flugzeuge. Dieses Programm ist für die Unterstützung der Arbeit von Fluglotsen im Rahmen einer Einführung von A-SMGCS Komponenten konzipiert worden. Die Vergabe der Routen erfolgt in diesem Fall, wenn das Flugzeug gelandet ist oder sich in Parkposition nach dem Start der Triebwerke befindet, entsprechend des Rollführungsprozesses beschrieben in Kapitel 2.1.2.

Das Programm wird jedoch auch für Forschungszwecke benutzt, wie bereits im Rahmen von Simulationsversuche im WFF Projekt erfolgt, und bietet deshalb die Möglichkeit die erstellten Trajektorien für die jeweiligen Flugzeugen abzuspeichern und am Anfang eines neuen Versuchs wieder aufzurufen.



**Abbildung 67: Eingesetzte Funktionen von SMAN für die Rollführung aus [Böt10]**

Entsprechend wurde für jedes Szenario die benötigten räumlichen Trajektorien für das Ownship, sowie für alle Fremdverkehrelemente anhand der Routenvergabefunktion des SMAN (s. Abbildung 67) erzeugt und abgespeichert.

Darüberhinaus ermöglicht das Programm die Steuerung von einzelschaltbaren Rollwegbefeuerungselementen entlang der jeweiligen Solltrajektorien mit der „Taxi Route Guidance“ Funktion (s. Abbildung 67). Die Länge der angeschalteten Elemente vor den Flugzeugen konnte nur diskret, anhand einer Veränderung im Konfigurationsfenster, geändert werden. Um die notwendige kontinuierliche Veränderung zu ermöglichen, wurde der SMAN entsprechend von der Firma Atrics erweitert. Die Information über diese Länge wurde anhand des SGS Moduls (Kapitel 4.2.6) ermittelt und an den SMAN kontinuierlich weitergeleitet.

#### 4.2.6. Zeitliche Führung

Die zeitlichen Vorgaben werden dem Pilot anhand der dynamischen Länge von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen vor dem Ownship dargestellt. Diese Länge wird vom SGS Modul berechnet und an den SMAN weitergeleitet. In diesem Modul wird die jeweilige Systemart umgesetzt, mit einer konstanten Länge für die Baseline (A0), der Länge der Solltrajektorie plus der konstanten Länge vor dem Ownship entsprechend der Formel in Kapitel 0 für die Steuerung (A1) oder die vom Regler mit Smith-Prädiktor berechneten Länge für die Regelung (A2).

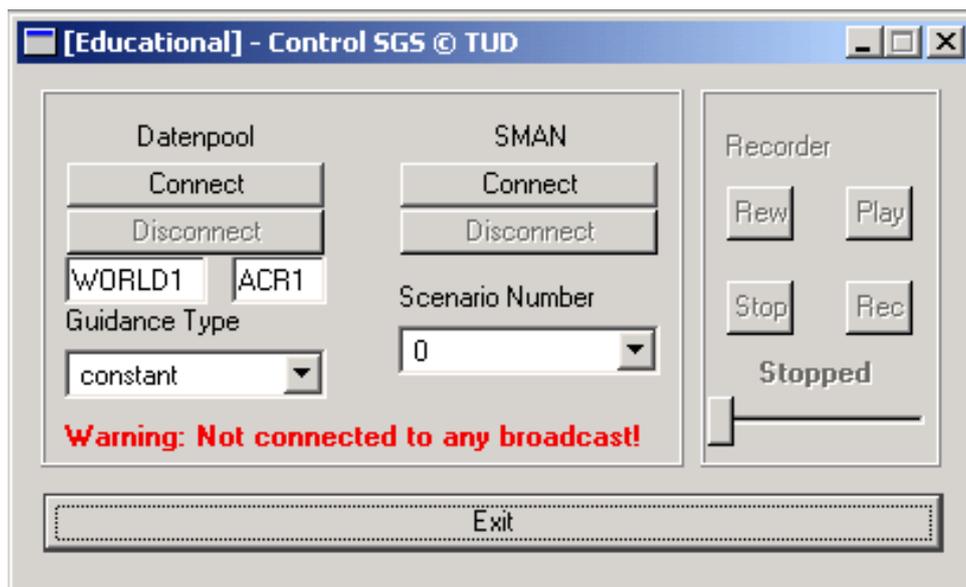
Die Benutzerschnittstelle zur Steuerung des Moduls wird in Abbildung 68 dargestellt. Hiermit kann von der Versuchsleiterin vor jedem Versuch sowohl das Szenario als auch die jeweilige Systemart entsprechend dem Versuchsplan ausgewählt werden.

Die 4D-Vorgaben liegen dem Programm als Text-Datei von Koordinaten mit einer Aufnahmezeit von 40 Hz vor und werden entsprechend der im Kapitel 3.4.3 beschriebenen Dimensionsreduzierung in die Form von Distanz nach Zeit intern umgewandelt. Aktuelle Koordinaten vom Ownship werden nach dem gleichen Prinzip ebenfalls in Form von Distanz nach Zeit gebracht. Anhand dieser Daten wird dann die entsprechende Länge berechnet.

Die so erstellten 4D-Solltrajektorien waren gebunden an fest abgespeicherte Werte und stellen somit eine Einschränkung des verwendeten prototypischen Systems für die Versuche dar: die fehlende dynamische Anpassung der Solltrajektorie. Diese setzt ein 4D-Rollführungsoptimierungssystem voraus, das eine dynamische, kontinuierliche und konfliktfreie 4D-Trajektorie für alle Verkehrsteilnehmer erzeugt (s. Kapitel 1.2). Solche Systeme sind noch Gegenstand der Forschung. Somit mussten die Versuche mit dieser Einschränkung durchgeführt werden.

Die Übermittlung der berechneten Länge am Surface Manager erfolgt über eine TCP-IP Verbindung. Nach entsprechender Registrierung am SMAN wird die Variable „setMaximumRouteIndicationDistance“ anhand einer XML Nachricht gesetzt und entsprechend vom SMAN für die Steuerung der Rollwegbefehrsselemente benutzt.

Da keine Möglichkeit bestand den Start der Szenarien mit Fremdverkehr von ARISE aus dem SGS Modul zu steuern, wurde die Synchronisierung der Szenarien vom SGS Modul und vom ARISE per Hand durchgeführt. Somit wurde das Fremdverkehrsszenario stets fünf Sekunden vor der Steuerung der Ownship Vorgabe gestartet.



**Abbildung 68: Benutzerschnittstelle des Surface Guidance System Moduls**

Das SGS Modul wurde auch benutzt, um alle notwendigen Daten während der Versuche aufzunehmen. Dies erfolgt mit einer 40 Hz Rate. Über diese Funktion wurden die 4D-Vorgaben für alle Versuche aufgenommen. Um diese hohe Rate zu erreichen, läuft der Kern der Software auf einem Linux Rechner, während die Benutzerschnittstelle auf einem Windows Rechner läuft.

### 4.3. Versuchsplanung

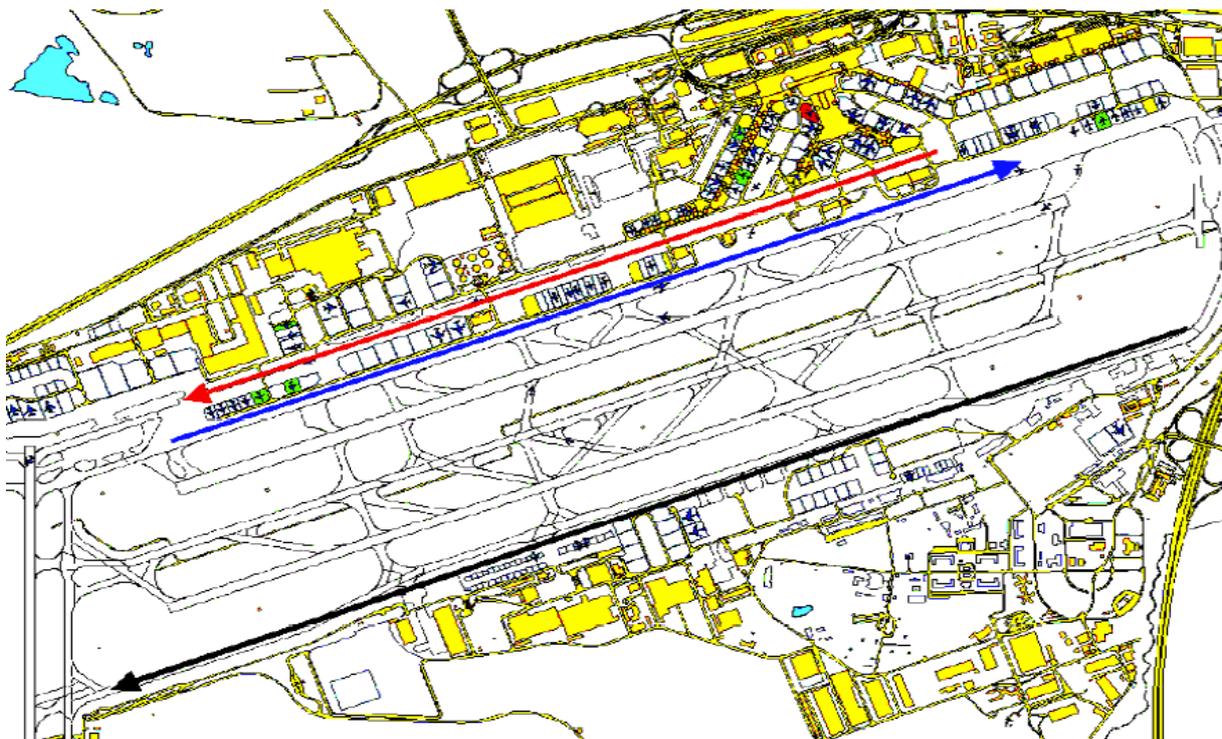
Im folgenden werden die für die Versuche ausgewählten Szenarien erläutert, der zweifaktorielle Versuchsplan dargestellt, sowie der Ablauf der Versuche beschrieben.

### 4.3.1. Szenarien

Alle Szenarien sind Rollszenarien am Flughafen Frankfurt. Die Sichtbedingungen bleiben über alle Szenarien gleich mit CAVOK (Ceiling And Visibility Okay, METAR Code) Verhältnissen. Dies entspricht einer Sicht von mindestens 10 km und enthält keine signifikanten Wettererscheinungen.

Die Rollrouten für Ownship, sowie für den Fremdverkehr, wurden entsprechend der Hauptrollrichtungen (s. Abbildung 69) am Flughafen Frankfurt erstellt: der in blau dargestellte Rollweg A wird in östlicher Richtung berollt, während die Rollwege N (rot) und S (schwarz) in westlicher Richtung berollt wurden.

Es wurden insgesamt drei unterschiedliche Szenarien geplant, die jeweils über eine der drei oben dargestellten Hauptrollrouten in Frankfurt verliefen. Alle Szenarien waren Taxi Out Szenarien aufgrund von Einschränkungen in der Simulation, in der die Durchführung von realistischen Taxi In Szenarien ohne tatsächliche Landung unmöglich war.

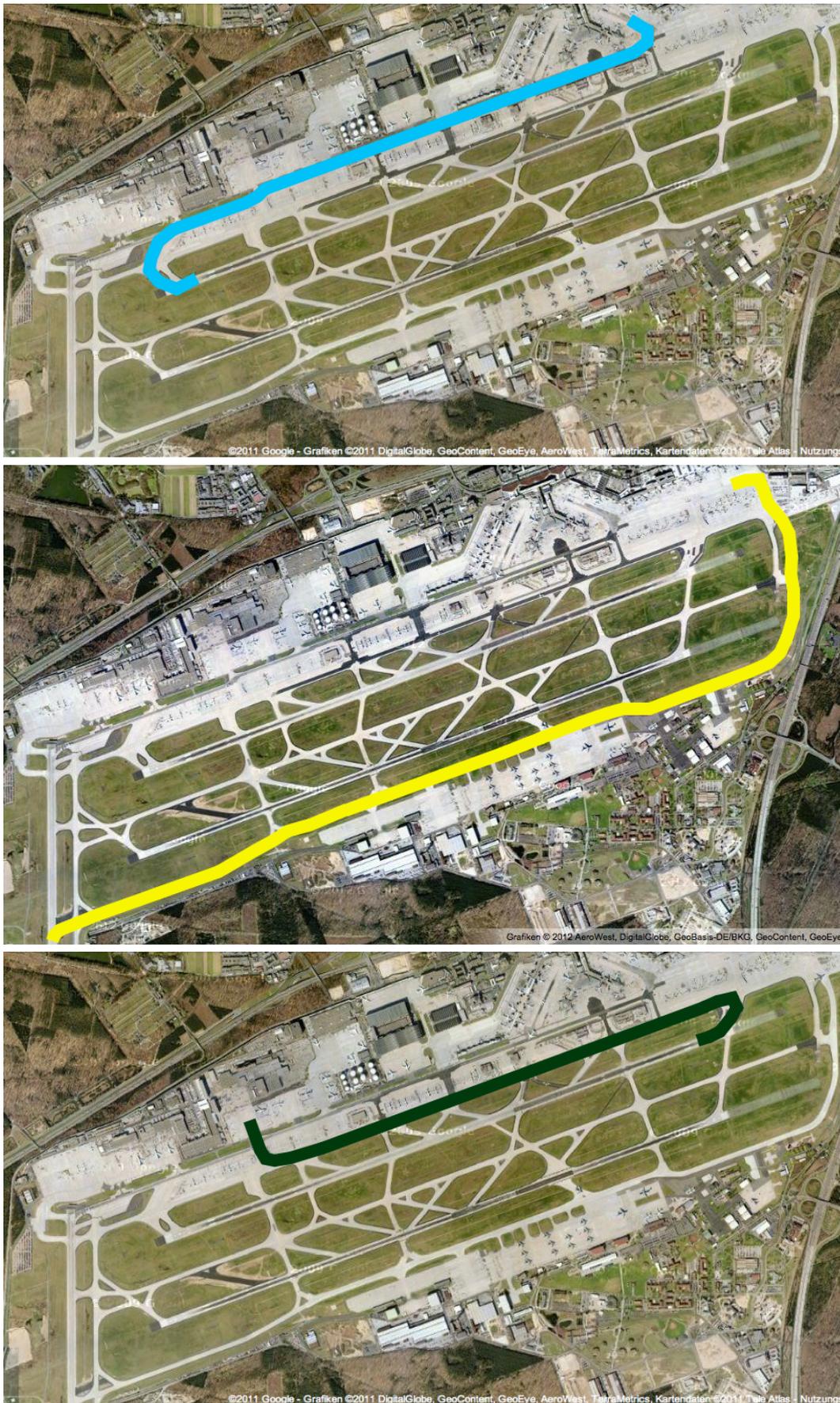


**Abbildung 69: Die Hauptrollrichtungen am Flughafen Frankfurt [Böt08]**

Die Rollrouten wurden mit mehreren Ersten Offizieren der Vorversuche abgestimmt, um die Realitätsnähe zu gewährleisten. Die zeitlichen Vorgaben wurden zusammen mit Fremdverkehrselementen aufgezeichnet. Aufgrund der noch unbekannt Güte der Einhaltung der Solltrajektorien durch die Piloten wurde ein großer Abstand (min. 400m) zwischen dem Fremdverkehr und der Solltrajektorie gewählt. Die drei Szenarien werden in Abbildung 70 veranschaulicht.

Es wurden für zwei der Szenarien zwei unterschiedliche Zeitvorgaben aufgezeichnet. Dies verhindert ein mögliches Anlernen und Erkennen der Solltrajektorien durch die Probanden im Verlauf des Versuchstages.

#### 4. Konzeption der experimentellen Untersuchungen



**Abbildung 70: Szenarien der Versuche – S1: blau, S2: gelb, S3: grün – Flughafenkarte aus Google Maps**

Eine Zusammenfassung der erstellten Szenarien wird in Tabelle 20 gegeben. Detailliertere Angaben zu den Szenarien in Anhang G abzulesen. Die Bezeichnungen der Rollwege entsprechen dem Zustand des Flughafens vor den Änderungen in der Nacht vom 12. zum 13. Juni 2010.

**Tabelle 20: Zusammenfassung der Szenarien**

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Betriebsrichtung	07	25	25
Start Position	Nach Pushback von Gate C8	Nach Pushback von Gate V111	Auf Rollweg Q
Startbahn	07L	18	25R
Taxiroute	N, L, 07L	N, B, BEast, S, 18	Q, A, D, 25R
Taxizeit	ca. 8 min.	13 min.	ca. 8 min.
Fremdverkehrselementen	7	8	7
Anzahl Zeitvorgaben	2	1	2
Szenarien Namen	S1a – S1b	S2	S3a – S3b

#### 4.3.2. Versuchsplan

Der größte Mehrwert des entwickelten Systems wird bei dem Piloten erwartet, der gerade die Steuerung übernimmt – Pilot Flying (PF). Dieses wurde bereits bei einer Untersuchung mit einer konstanten Länge der vorauslaufenden grünen Linie im Rahmen vom Projekt WFF ermittelt [UOD10]. Darüber hinaus werden die meisten unabhängigen Variablen nur von diesem Piloten beeinflusst. Aus beiden Gründen wurde eine Einschränkung der Cockpitbesetzung auf nur einen Piloten während der Versuche beschlossen. Dieser übernimmt dann die Rolle des Kapitäns und rollt alle Szenarien selbständig ab.

Zur Erleichterung der Navigationsaufgabe in diese „Single Pilot“ Konfiguration wurde das Navigation Display mit der Airport Moving Map (AMM) aus dem Surface Movement Awareness and Alerting System (SMAAS) vorgesehen (s. Abbildung 64). Diese bewegliche Flughafenkarte mit der Darstellung von Ownship wurde am Institut entwickelt und ihr positiver Einfluss auf die Rollphase im Rahmen von mehreren Versuchskampagnen untersucht [VUK08].

Für die Versuche ohne Vorwissen (V0) wurden jeweils nur zwei Szenarien durchgeführt, zuerst mit dem Baseline-System (A0) und dann mit der Regelung (A2). Alle fünf Szenarien, beschrieben in Tabelle 20, wurden von jedem Piloten mit jeder Systemart (A0, A1, A2) nach dem Briefing (V1) durchgeführt. Für das Baseline-System gibt es keinen Unterschied zwischen den Szenarien mit der gleichen räumlichen Vorgabe, aber unterschiedlichen zeitlichen Vorgaben (1a, 1b sowie 3a, 3b). Entsprechend wurde jeweils nur einer der beiden Szenarien mit dem Baseline-System durchgeführt.

Der resultierende zweifaktorielle Versuchsplan – Vorwissen und Systemart – mit 16 Durchläufen wird in Tabelle 21 beispielhaft für einen Piloten angegeben. Personenbezogene Störvariablen wurden durch geeignete Zufallsvorgaben für die Versuche mit Vorwissen (3 bis 16) für jeden Pilot neutralisiert. Dabei wurde versucht stets die räumlichen Vorgaben abzuwechseln, um Monotonie und Langeweile bei den Piloten zu vermeiden.

**Tabelle 21: Versuchsplanbeispiel**

VERSUCH	SZENARIO	FAKTOR 1: VORWISSEN	FAKTOR2: SYSTEMART
1	1a	V0	A0
2	3a	V0	A2
3	2	V1	A2
4	3a	V1	A1
5	1a	V1	A2
6	3a	V1	A2
7	2	V1	A0
8	1a	V1	A1
9	3a	V1	A0
10	1b	V1	A2
11	2	V1	A1
12	1b	V1	A1
13	3a	V1	A2*
14	1a	V1	A2*
15	3b	V1	A1
16	3b	V1	A2

Aufgrund der Ergebnisse aus den Vorversuchen wurde den PI<sub>2</sub>-Regler mit einem Smith-Prädiktor ergänzt, dies entspricht der Systemart A2. Zur Untersuchung der Vorteile dieses Reglers gegenüber einem klassischen PI<sub>2</sub>-Regler wurden jeweils von jedem Piloten zwei Versuche mit einem PI<sub>2</sub>-Regler ohne Smith-Prädiktor durchgeführt. Dies entspricht der Systemart A2\* in Tabelle 21. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in [HSU11] zusammengefasst und analysiert.

Während des Briefings wurde den Piloten mitgeteilt, welche Systemarten generell vorhanden sind. Die tatsächliche Systemart für jeden Versuch blieb den Piloten jedoch verborgen.

### 4.3.3. Ablauf der Versuche

Nach einer kurzen Begrüßung füllten die Piloten den Eingangsfragebogen (Anhang A) aus. Die Piloten wurden dann in den Simulator geführt, wo Sie sich zunächst mit der Simulationsumgebung, anhand zwei einfacher Rollszenarien mit ausgeschalteten Rollwegbefeuerungselementen, vertraut machen konnten. Die Piloten wurden auf die Verwendung der alten Rollweg-Bezeichnungen in der Außensicht, sowie auf die Airport Moving Map aufmerksam gemacht. Die vier Fragebögen (MCHS, SUS, R-TLX und SART) wurden dann den Piloten erläutert.

Anschließend wurden zwei Versuche durchgeführt: Zunächst ein Versuch mit dem Baseline-System und dann mit dem kooperativen System mit Regler A2. Am Ende dieser Versuche

wurden die Piloten umfassend in das zu untersuchende System eingeführt. Anschließend führten die Probanden 14 Versuche mit den verschiedenen Szenarien und Systemen durch.

Das jeweilige verwendete System – Baseline, informativ oder kooperativ – im Versuch wurde den Piloten nicht verraten. Nur das Baseline-System wurde tatsächlich von den Piloten meistens nach einigen Minuten im Versuch erkannt. Nach jedem Versuch wurden alle vier Fragebögen durch die Piloten ausgefüllt. Im Anschluss wurden die Piloten nach deren Eindrücke mit dem System gefragt, sowie nach etwaigen Verbesserungsmöglichkeiten in einem umfangreichen Debriefing.

**Tabelle 22: Taxianweisungen für die Versuche**

<b>Eingewöhnung</b>	[Airlinebezeichnung]4TU Taxi to Runway [Runwaybezeichnung] via [Taxiroute]
<b>Versuche mit/ohne Vorwissen</b>	[Airlinebezeichnung]4TU Taxi to Runway [Runwaybezeichnung], follow the greens

Es gab für die Versuche keine Sprechfunk Simulation. Die Lotsenanweisungen wurden direkt von der Versuchsleiterin im Simulator laut angesagt. Die Piloten antworteten entsprechend mit einem Readback. Die Anweisung für die Eingewöhnungsversuche bestand aus der üblichen Anweisung mit der kompletten Taxiroute, während für die Versuche, sowohl ohne als auch mit Vorwissen, stets die gleiche einheitliche Anweisung „Follow the Greens“ benutzt wurde. Diese Anweisung wird heute am London Heathrow Flughafen benutzt, wenn die räumliche Steuerung der Piloten anhand der Rollwegbefeuerungselemente erfolgt. Die verwendeten Anweisungen werden in Tabelle 22 zusammengefasst.

**Tabelle 23: Versuchsablauf**

Begrüßung und Eingangsfragebogen		15 min
Eingewöhnung		15 min
Erläuterung der Fragebögen		10 min
Versuche ohne Vorwissen	Baseline	15 min
	Regler	15 min
Briefing		15 min
14 Versuche mit Vorwissen (zufällige Reihenfolge)		14 x 15 min
Debriefing		30 min

Der Ablauf eines Versuchstages, sowie die ungefähre Dauer der Untersuchungen, wird in Tabelle 23 zusammengefasst. Zusammen mit den Mittags- und Kaffeepausen dauerte ein Versuchsdurchlauf etwa sechs Stunden. Die erste Pause war meistens nach den ersten drei Versuchen mit Vorwissen geplant; die zweite Pause nach weiteren fünf Versuchen.



**Abbildung 71: Bild aus dem Cockpit während der Simulator Versuche**

In Abbildung 71 ist der Blick aus dem Cockpit auf die Kette von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen während eines Versuchs dargestellt.

## 5. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die zu der Hypothesenprüfung notwendigen Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen dargestellt und interpretiert.

Die Auswertung der gewonnenen Daten teilt sich wie folgt auf:

- der Beschreibung der Stichprobe,
- den aufgenommenen objektiven quantitativen Daten aus den Aufzeichnungen,
- den subjektiven Daten aus den jeweiligen Fragebögen,
- dem Debriefing.

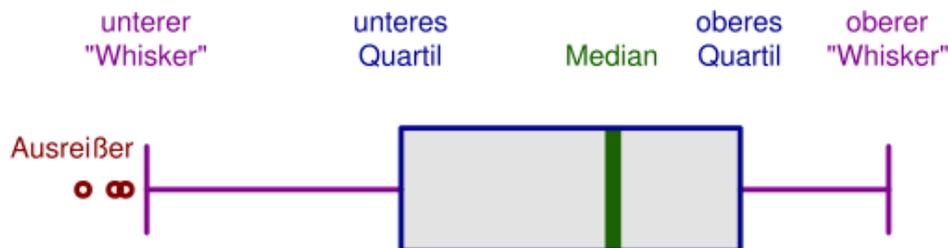


Abbildung 72: Elemente eines Boxplots [Wik11]

Die gewonnenen Daten werden im Folgenden mittels Boxplot-Darstellungen (dt. Kastengrafik) veranschaulicht. Ein Boxplot stellt die Häufigkeitsverteilung der erhobenen Daten dar.

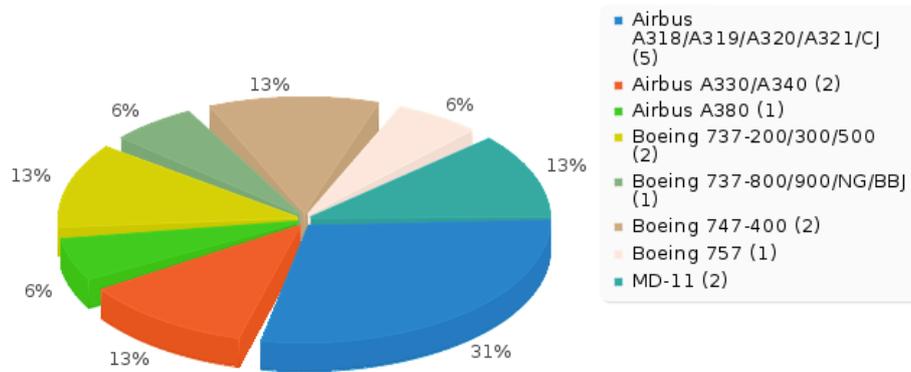
Die Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50% der Werte liegen und wird damit vom oberen und unteren Quartil der Verteilung begrenzt. Der Median teilt die Werteverteilung in zwei Hälften, wobei seine Lage innerhalb der Box einen Eindruck über die Schiefe bzw. Symmetrie der Verteilung gibt.

Die Antennen – auch „Whiskers“ genannt – wurden hier anhand der Definition von John W. Tukey [Tuk77] dargestellt. Die Länge des Whiskers wird hierbei auf das 1,5-Fache des Interquartilsabstands – die Länge der Box – begrenzt. Die Whisker entsprechen demnach dem höchsten bzw. niedrigsten Wert, der noch innerhalb dieser Grenzen liegt. Kreise und Sterne stellen Werte dar, die außerhalb der Box liegen – die sogenannten Ausreißer [BUO10]. Eine graphische Erklärung der Boxplot Elemente wird in Abbildung 72 gegeben.

Die Systemarten werden in den folgenden Darstellungen folglich genannt. System 0 entspricht das Baseline (A0), System 1 entspricht der reinen Steuerung (A1). Die Systeme 3 und 4 entsprechen der Regelung (A2\* und A2, s. Kapitel 4.3.2).

### 5.1. Stichprobenbeschreibung

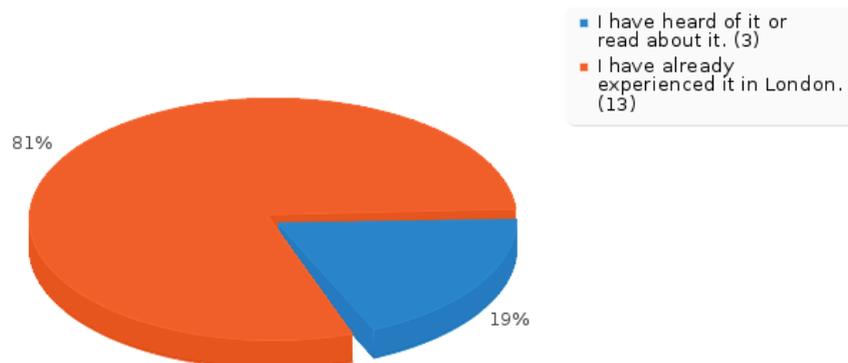
Die Rollaufgabe wird in der Regel von den Kapitänen durchgeführt [MHR04]. Diese stellen eine sehr homogene Gruppe dar im Bezug auf Alter, Erfahrung und Trainingsgrad. Es wurden entsprechend nur aktive Flugkapitäne für die Durchführung der Versuche eingeladen.



**Abbildung 73: Aktueller Flugzeugtyp der Probanden**

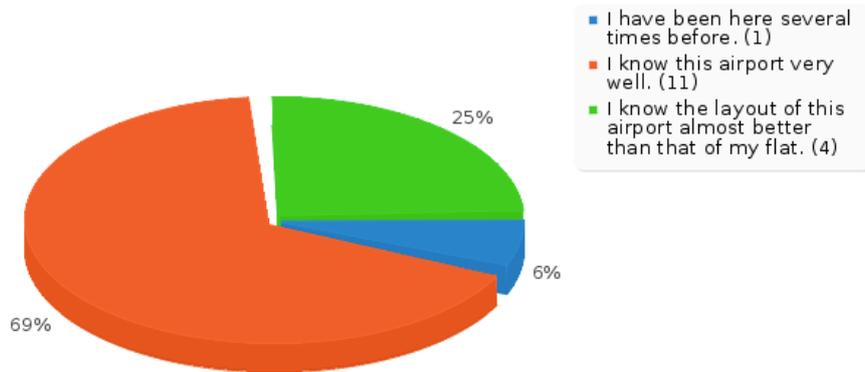
Die Strichprobe aus 16 Flugkapitänen zeichnet sich demnach durch eine sehr geringe Streuung bezüglich Geschlecht, Alter, Erfahrung und Trainingsgrad der Versuchspersonen aus. Diese homogene Stichprobe spiegelt die Homogenität der Gesamtheit der Zielbenutzer wider und stellt somit, wie in Kapitel 4.1.3 dargestellt, eine proportional geschichtete Stichprobe dar.

Das Durchschnittsalter der Probanden war 45, der jüngste Kapitän war 35 Jahre alt, der älteste 62 Jahre alt. Die Piloten hatten durchschnittlich 12281 Flugstunden, der mindesterfahrene Pilot hatte 4500 Flugstunden, der meisterfahrene 26500 Flugstunden. 75% der Piloten wiesen mehr als 12875 Flugstunden auf (Q1 = 9000). Zwölf Kapitäne waren bei der Deutschen Lufthansa beschäftigt, zwei bei der Lufthansa Cargo, einer flog für Condor und einer flog für Ryanair. Sechs Probanden waren auch Ausbilder.



**Abbildung 74: Erfahrung der Probanden mit dem „Follow the Greens“ System in London Heathrow**

Acht Piloten flogen zurzeit der Versuche eine Airbus Maschine, sechs Piloten flogen eine Boeing Maschine. Die zwei Cargo Pilot flogen das McDonnell Douglas MD11 Flugzeug (s. Abbildung 73). Die Mehrzahl der Kapitäne (13) war schon mit dem „Follow the Greens“ System am London Heathrow Flughafen vertraut und alle hatten von dem System gehört (s. Abbildung 74).



**Abbildung 75: Vertrautheit der Probanden mit dem Frankfurter Flughafen**

Die Mehrzahl der Piloten (15 von 16) kannten den Frankfurter Flughafen als Heimatflughafen und waren somit sehr vertraut mit dem vorhandenen Rollwegsystem. Nur ein Pilot war nur einmal am Frankfurter Flughafen gewesen (s. Abbildung 75).

## 5.2. Aufzeichnungen

Die Ergebnisse der Aufzeichnungen werden für die jeweiligen Systemarten: Baseline (A0), Steuerung (A1) und Regelung (A2) erläutert, um anschließend gemeinsam statistisch ausgewertet zu werden. Zunächst wird die zur Auswertung notwendige Datenreduzierung beschrieben.

### 5.2.1. Datenreduzierung

Für die statistische Auswertung der aufgezeichneten Daten wurden zuerst die wichtigsten Merkmale für die Beurteilung der Einhaltung der Solltrajektorien für jeden Versuch ermittelt. Diese umfassen die Differenz zwischen der Soll- und der Ist-Position zum Zeitpunkt  $t$ , sowie die Differenz zwischen der Soll- und der Ist-Geschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t$ .

**Tabelle 24: Statistisch relevante Parameter der aufgezeichneten Daten**

<u>Lageparameter</u>	<u>Streuungsparameter</u>
Arithmetisches Mittel	Varianz
Median	Standardabweichung
Quartile	
Minimum	
Maximum	

Da die, während der Versuche mit einer 40 Hz Rate aufgezeichneten Daten eine zu große Datenmenge für die statistische Analyse darstellten, wurden für jeden der beschriebenen Merkmale mehrere aggregierende Parameter ermittelt. Um die zentrale Tendenz der jeweiligen Merkmale festzustellen, wurden die Lageparameter: arithmetischer Mittelwert, Median und Quartile berechnet. Letztere werden zur Darstellung der Werte als Boxplot benutzt. Als Maß für die Streuung der Werte wurden die Varianz und Standardabweichung berechnet (s. Tabelle 24).

### 5.2.2. Räumliche Führung

Die räumliche Führung der Piloten anhand der vorgegebenen Routen war in allen Versuchen bis auf einen erfolgreich. Dies entspricht einer Erfolgsquote von 99,6% (237 erfolgreiche Versuche von 238). Im einzigen Versuch, bei dem sich ein Pilot verrollt hat (Szenario 3a, System A2), war er schon sehr früh, viel schneller gerollt als die Vorgabe. Durch die prototypbedingte fehlende dynamische Anpassung der Solltrajektorie (s. Kapitel 4.2.6), hatte er keine angeschalteten Lampen mehr vor sich und rollte dann geradeaus zur falschen Landebahn. Mit der notwendigen dynamischen Anpassung der Solltrajektorie wäre ein solcher Fall jedoch nicht möglich gewesen.

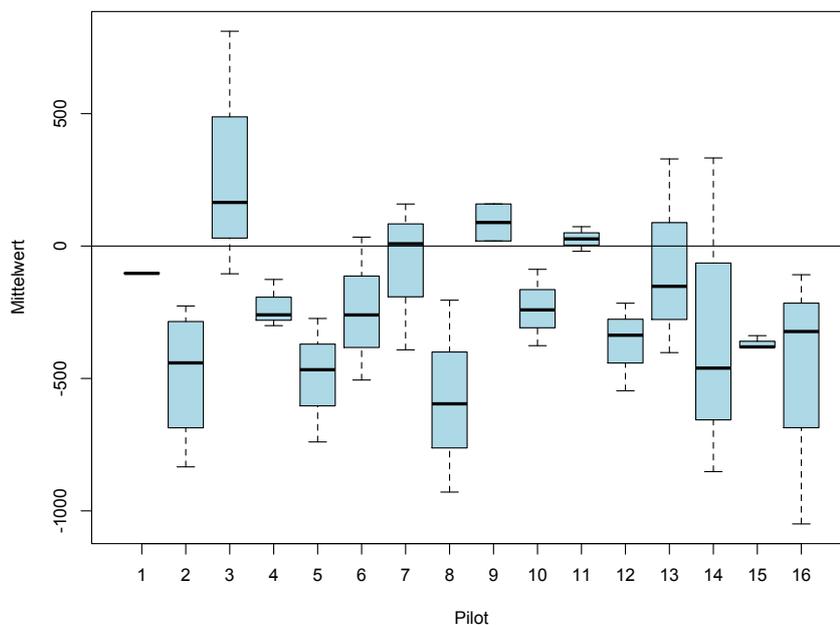
### 5.2.3. Zeitliche Führung

Die Ergebnisse der zeitlichen Führung der Piloten durch das System werden hier nach der jeweiligen Systemart beschrieben: Baseline, Steuerung und Regler um anschließend Paarweise verglichen zu werden.

#### Baseline

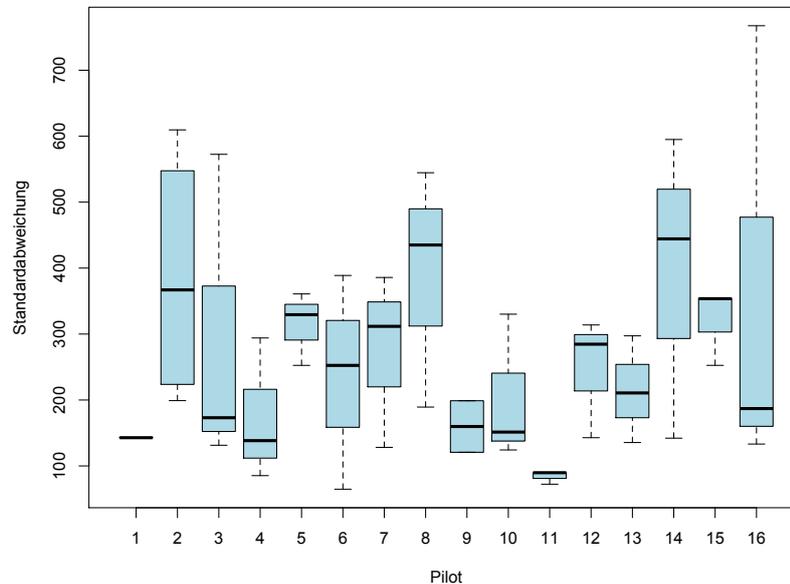
Bei der Systemart (A0) war die zeitliche Vorgabe für die Piloten nicht sichtbar, da diese nur eine Linie von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen mit einer konstanten Länge sehen konnten, unabhängig von der Vorgabe und der eigenen Geschwindigkeit. Diese Versuche dienten als Kontrolle, um zu überprüfen, ob die Geschwindigkeitsänderungen der Piloten bei den zwei anderen Systemarten durch die dynamischen Rollwegbefeuerungselementen bedingt waren, und nicht beispielsweise als Reaktion auf die eingebauten Fremdverkehrselemente.

In der Regel sind die Piloten mit der konstanten Länge von angeschalteten Elementen schneller gerollt als die Vorgabe und auch teilweise schneller gerollt als von den Fluglinien empfohlen. Dies ist aus der Häufung eines Großteils der Mittelwerte der Positionsdivergenz zwischen der Soll- und Ist-Position deutlich im negativen Bereich in Abbildung 76 abzulesen.



**Abbildung 76: Mittelwert der Positionsdivergenz in Meter nach Pilot für die Baseline Versuche**

Dieses Ergebnis erklärt sich durch das, in mehreren A-SMGCS Studien beobachtete, schnellere Rollen der Piloten durch eine grafische räumliche Führung ([LW95], [MFA96], [HFA00]). Darüberhinaus ist die fehlende haptische Rückmeldung der Geschwindigkeit im Simulator von den Piloten selbst als mögliche Erklärung genannt worden. Die Überwachung der Bodengeschwindigkeit im Hinblick auf die Vorgabe der Fluglinien wird in der Regel vom Ersten Offizier durchgeführt. Folglich kann die „Single Pilot“ Konfiguration ebenfalls dieses schnelle Rollen mit dem Baseline-System erklären.



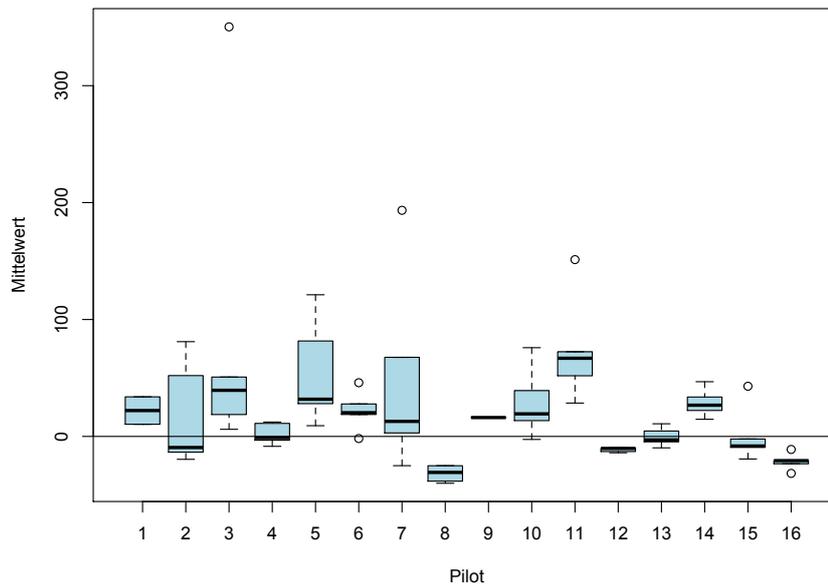
**Abbildung 77: Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter nach Pilot für die Baseline Versuche**

Eine hohe Streuung der Positionsdifferenz ist in Abbildung 77 deutlich zu erkennen, mit dem Median der Standardabweichungen bei den meisten Piloten zwischen 200 und 400 Metern.

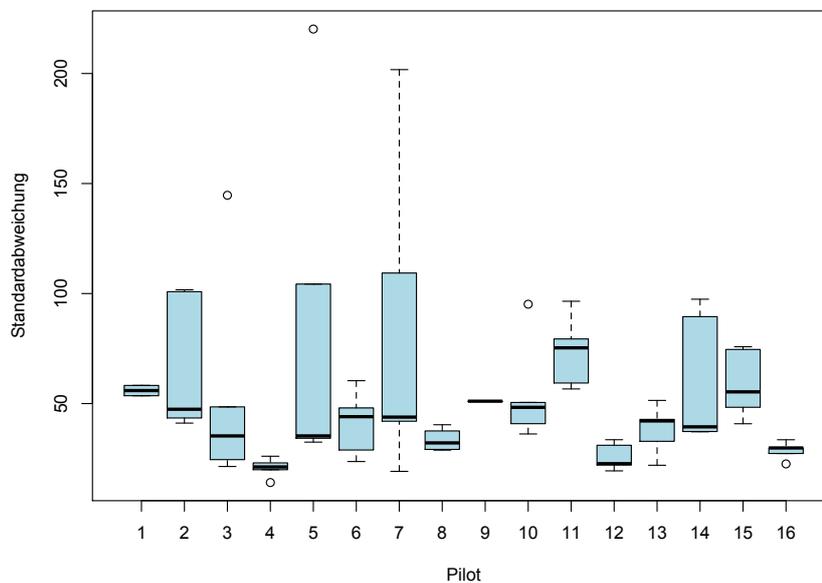
Der erste Pilot konnte aus zeitlichen Gründen nur einen Baseline Versuch durchführen, aus diesem Grund ist sein Boxplot auf beiden Abbildungen auf die Darstellung eines einzigen Wertes beschränkt.

### Steuerung

Bei der informativen Systemart (A1) bekamen die Piloten eine starre zeitliche Vorgabe. Sie sahen zu jedem Zeitpunkt eine Linie von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen zwischen deren eigenen Position und der Sollposition plus 100 Meter. Das System hatte keine Rückführung der Abweichung zwischen der Ist- und der Sollposition, so dass bei einer deutlichen Überschreitung der Geschwindigkeit, d.h. sie befanden sich mehr als 100 Meter vor der Sollposition, keine angeschalteten Lampen mehr zu sehen waren.



**Abbildung 78: Mittelwert der Positionsdiffenz in Meter nach Pilot für die Versuche mit Steuerung**



**Abbildung 79: Standardabweichung der Positionsdiffenz in Meter nach Pilot für die Versuche mit Steuerung**

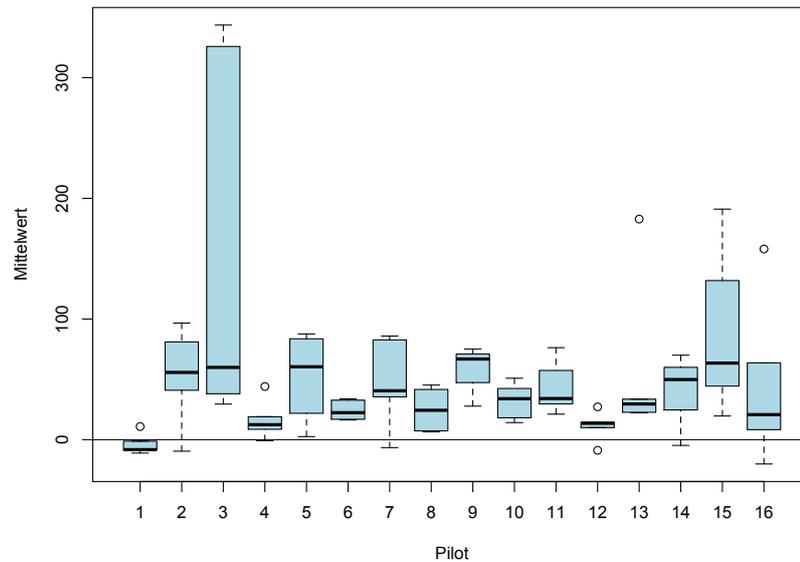
Die Mittelwerte der Differenz zwischen Ist- und Sollposition sind hier deutlich niedriger als mit der Baseline mit allen Medianwerten nah an Null. Bis auf drei Ausreißer bleibt der Mittelwert durchwegs unter 100 Meter wie in Abbildung 78 zu sehen ist.

Ebenfalls ist mit der Steuerung eine deutlich geringere Streuung der Differenz zwischen Ist- und Sollposition im Vergleich zu den Versuchen mit der Baseline in Abbildung 79 zu beobachten. Die Medianwerte der Standardabweichung bei allen Piloten blieben unter 80 Meter. Bis auf drei Ausreißer blieb die Standardabweichung unter 100 Meter.

### Regler

Bei der kooperativen Systemart (A2) bekamen die Piloten die vom Regler berechnete optimale Länge von angeschalteten Rollwegbefeuerungselementen vor dem Ownship zu

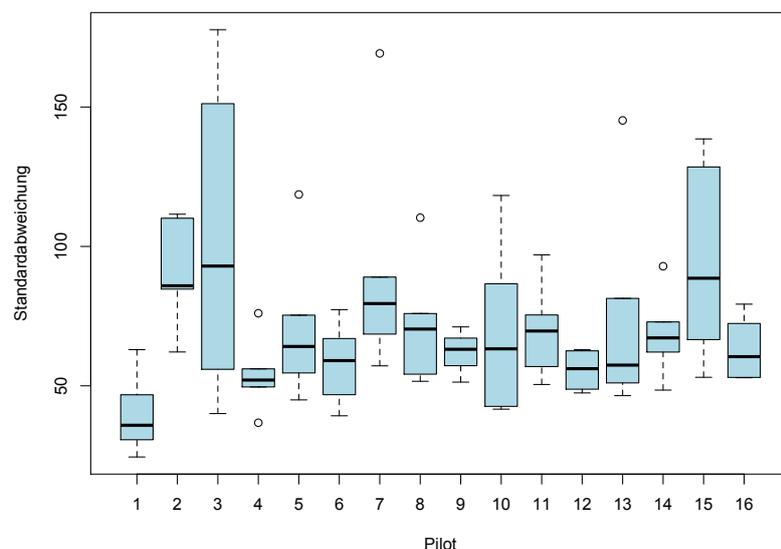
sehen, um die Sollposition zu erreichen. Mit diesem System bekamen die Piloten immer mindestens eine Lampe zu sehen und die maximale Länge war entsprechend der beschriebenen Anforderungen in Kapitel 0 auf 250 Meter begrenzt.



**Abbildung 80: Mittelwerte der Positionsdifferenz in Meter nach Pilot für die Versuche mit Regler**

Die Mittelwerte der Differenz zwischen Ist- und Sollposition sind hier auch deutlich niedriger als mit der Baseline mit allen Medianwerten unter 80 Meter. Bis auf die Piloten 3 und 15, sowie zwei Ausreißer, bleibt der Mittelwert durchwegs unter 100 Meter wie in Abbildung 80 dargestellt.

Ebenfalls ist mit dem Regler eine deutlich geringere Streuung der Differenz zwischen Ist- und Sollposition im Vergleich zu den Versuchen mit der Baseline in Abbildung 81 zu beobachten. Die Medianwerte der Standardabweichung bei den meisten Piloten (13 von 16) blieb unter 80 Meter. Bis auf zwei Ausreißer blieb die Standardabweichung unter 150 Meter.



**Abbildung 81: Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter für die Versuche mit Regler**

## Vergleich

Wie erwartet liegt der signifikanteste Zusammenhang zwischen den Merkmalen der Aufzeichnungen und der jeweiligen Systemart, wie die niedrigen Werte des Signifikanzniveaus in der Zeile „System“ der Tabelle 25 zeigen. Insbesondere das Baseline-System hat einen erwartungsgemäß sehr großen Einfluss auf alle statistisch relevanten Daten.

**Tabelle 25: Signifikanzniveau des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die Merkmale der Aufzeichnungen**

	Positionsdifferenz				
	Median	Mittelwert	Abweichung	Min	Max
Piloten	0,524 -	0,4765 -	0,8924 -	0,5621 -	0,3909 -
System	$5,391e^{-10}$ ***	$1,81e^{-11}$ ***	$2,275e^{-11}$ ***	$< 2,2e^{-16}$ ***	0,02458 *
Vorwissen	0,4256 -	0,7073 -	0,2011 -	0,4369 -	0,359 -
Baseline	$< 2,2e^{-16}$ ***	$< 2,2e^{-16}$ ***	$< 2,2e^{-16}$ ***	$< 2,2e^{-16}$ ***	0,2758 -
Steuerung/Regelung (ohne Baseline)	0,003687 ***	0,006079 ***	0,0001231 ***	0,09176 *	0,0005944 ***
Versuch (ohne Baseline)	0,002626 ***	0,004215 ***	0,1677 -	0,1373 °	0,104 °
Szenario (ohne Baseline)	0,006016 ***	0,03373 **	0,3671 -	0,1644 -	0,8935 -

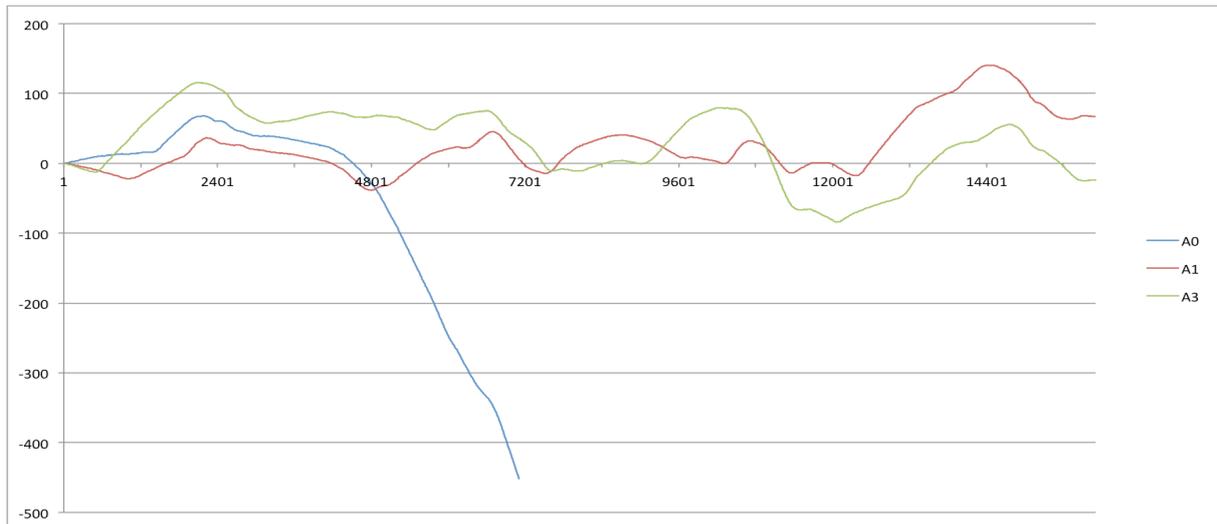
mit  $p \leq 0,01$  (\*\*\*) ;  $0,01 < p \leq 0,05$  (\*\*);  $0,05 < p \leq 0,10$  (\*);  $0,10 < p \leq 0,15$  (°)

Der hohe Einfluss der Systemart auf alle Merkmale der Positionsdifferenz ist in Tabelle 25 deutlich abzulesen, mit einem Signifikanzwert unter  $e^{-9}$  für alle Merkmale bis auf den Maximalwert. Insbesondere zwischen dem Baseline-System einerseits und den Systemen A1 und A2 andererseits ist eine hohe statistische Signifikanz zu erkennen ( $p < e^{-16}$ ).

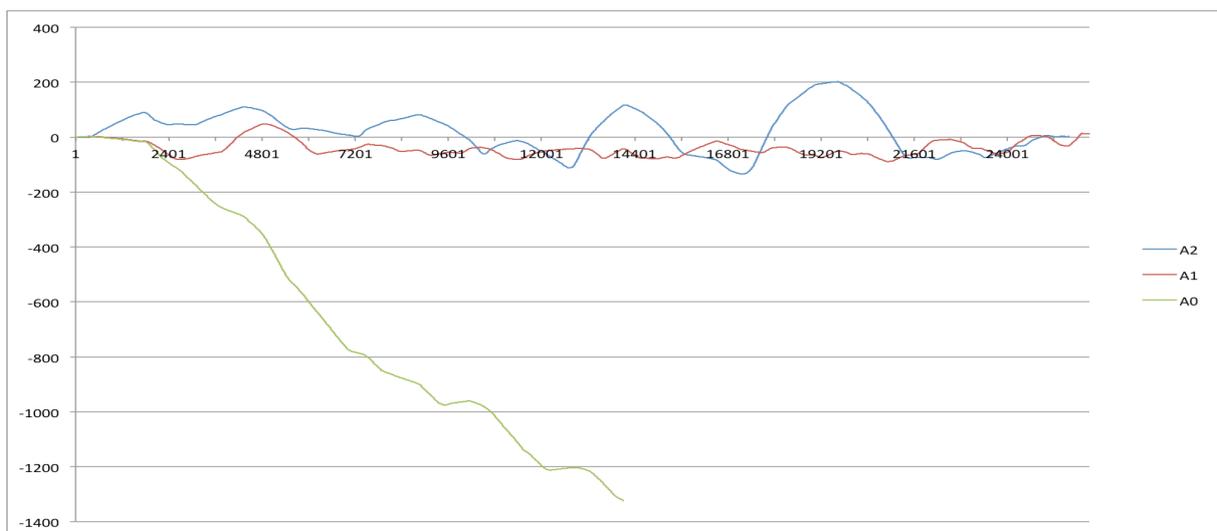
Zunächst werden die Ergebnisse mit dem Baseline-System mit den anderen Systemen verglichen. Danach werden beide Systeme mit zeitlichen Vorgaben untereinander verglichen.

## Vergleich zwischen Baseline und den Systemen mit zeitlicher Vorgabe

Der Einfluss der Systemart auf die Güte der Einhaltung der Solltrajektorie ist beispielhaft in Abbildung 82 und Abbildung 83 deutlich zu erkennen. Beim Baseline Szenario, mit dem keine zeitliche Vorgabe möglich war, waren die Piloten nach einer gewissen Zeit meistens viel schneller als die Solltrajektorie. Somit ist sicher gestellt, dass die Einhaltung der zeitlichen Vorgabe durch die Anweisungen aus den Systemen A1 und A2 kam.

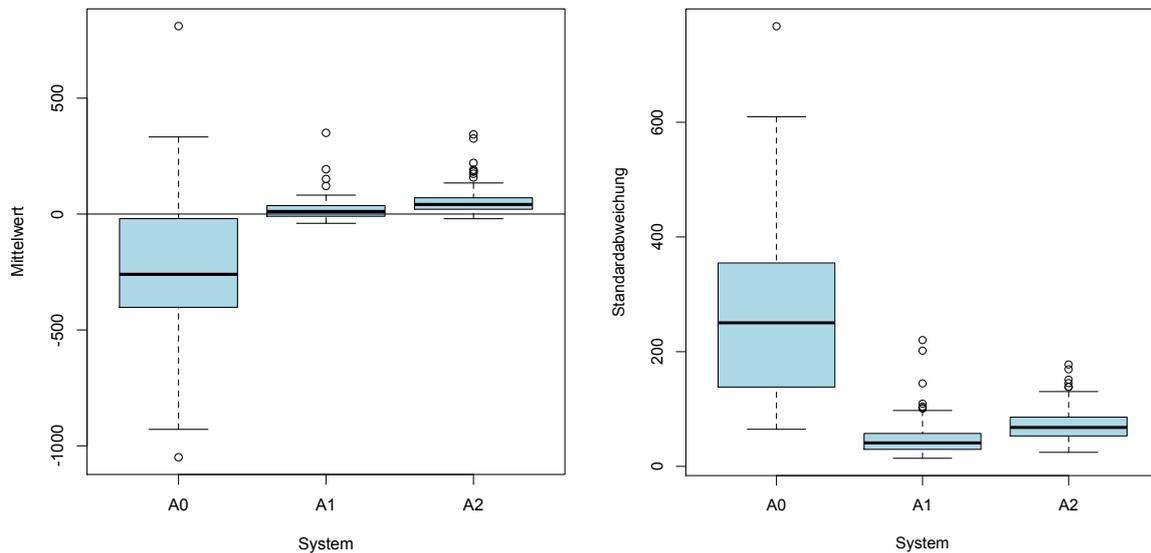


**Abbildung 82: Positionsdifferenz in Meter für Szenario 3 nach Systemart**



**Abbildung 83: Positionsdifferenz in Meter für Szenario 2 nach Systemart (Pilot 8)**

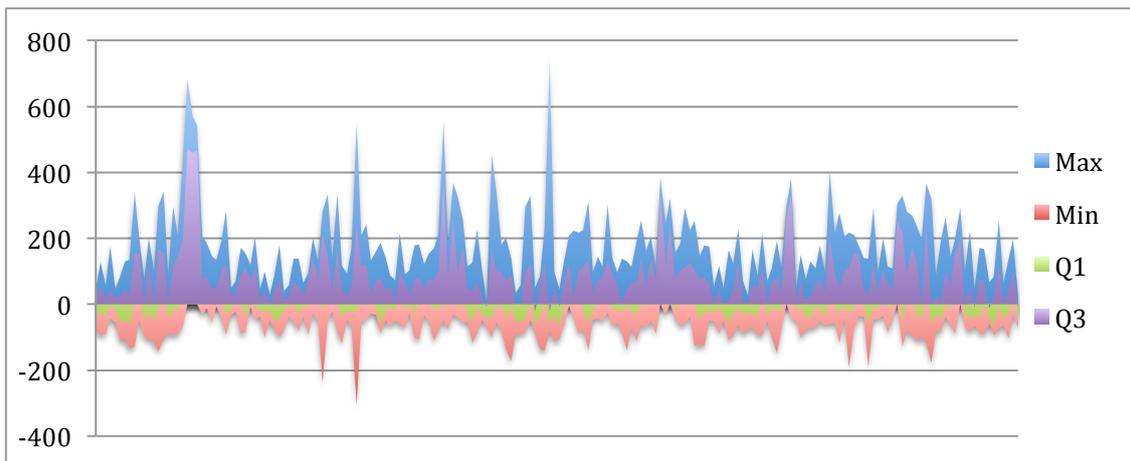
Die Tendenz der Piloten beim Baseline-System deutlich schneller zu sein als die 4D-Solltrajektorie wird weiter in Abbildung 84 verdeutlicht, mit einer Mehrzahl der Mittelwerten der Differenz zwischen Soll- und Ist-Positionen zwischen -20 und -400 Metern. Hingegen liegt die Mehrzahl der Mittelwerte für beide Systeme mit einer zeitlichen Vorgabe zwischen -20 und +100 Metern. Zusammen mit der niedrigen Streuung mit diesen Systemen (Abbildung 84) deuten diese Werte auf eine gute Erfüllung der Aufgabe durch die Piloten hin.



**Abbildung 84: Mittelwert und Standardabweichungen der Positionsdivergenz in Meter nach Systemart**

### Vergleich zwischen Steuerung und Regelung

In Abbildung 85 sind die wichtigsten Merkmale der Differenz zwischen den Ist- und Soll-Positionen des Flugzeugs entlang der 4D-Trajektorie für alle Versuche mit der Steuerung oder der Regelung abzulesen. Bis auf einige wenige Ausreißer ist hier die Erfüllung der Hauptaufgabe deutlich zu erkennen, mit den Extremwerten durchwegs unter 400 Meter bzw. unter -200 Meter. Die starke Verengung des Bereichs zwischen den Quartile 1 und 3 zwischen 250 Meter und -50 Meter zeigt, dass die Piloten die meiste Zeit sehr dicht an den Vorgaben gerollt sind.

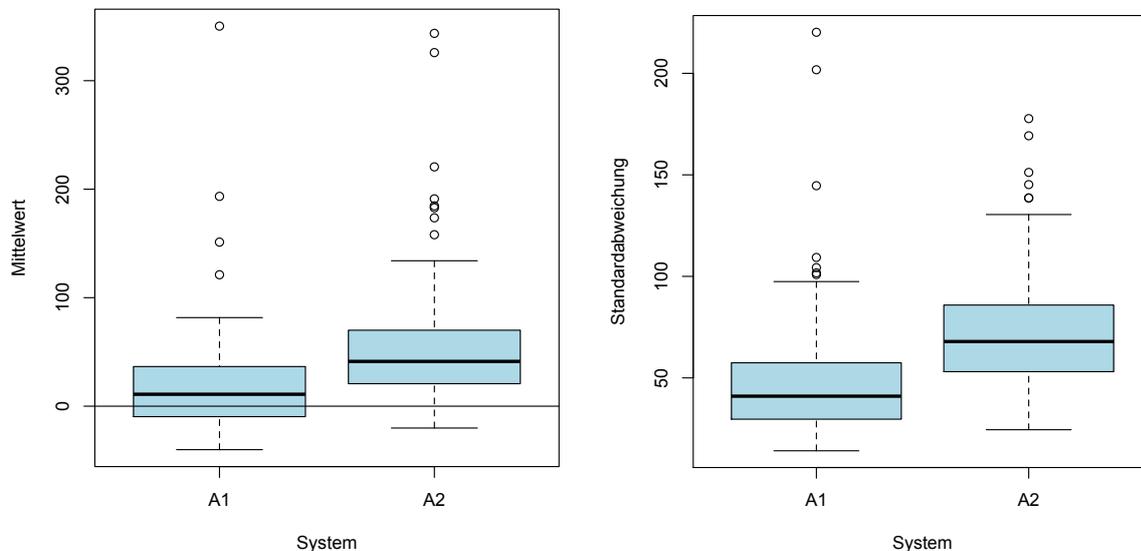


**Abbildung 85: Merkmale der Positionsdivergenz in Meter aller Versuche mit Steuerung oder Regelung**

Verantwortlich für die deutlichsten Ausreißer, auch im Wert vom Quartil 3 (erster Ausreißer über 600 Meter beim Maximalwert und einziger Ausreißer über 400 Meter bei Q3), waren die gleichen Versuche wie später in Kapitel 5.2.4 (s. Abbildung 92). Während der ersten vier Versuche rollte der Pilot 3 so langsam, dass er immer eine sehr lange Linie von Rollwegebefehrs-elementen sehen konnte. Somit war für ihn keine zeitliche Vorgabe zu erkennen. Zwischen Versuchen 4 und 5 wurde der Pilot darauf aufmerksam gemacht, dass er

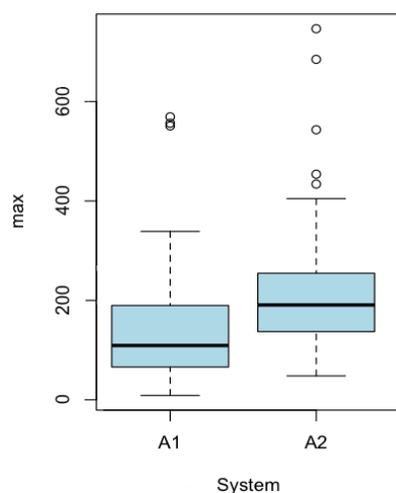
entsprechend den Vorgaben deutlich schneller sein sollte. Die anschließenden Versuche stellten dann keine Ausreißer mehr dar.

Zwischen der reinen Steuerung und dem System mit Regler zeigen alle Merkmale relativ niedrige Signifikanzwerte ( $p < 0,004$  bis auf dem Minimum Wert mit  $p < 0,1$ , s. Tabelle 25) und somit hatte die gewählte Art der zeitlichen Vorgabe einen deutlichen Einfluss auf die Einhaltung der 4D-Solltrajektorie.



**Abbildung 86: Mittelwert und Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter nach Systemart ohne Baseline**

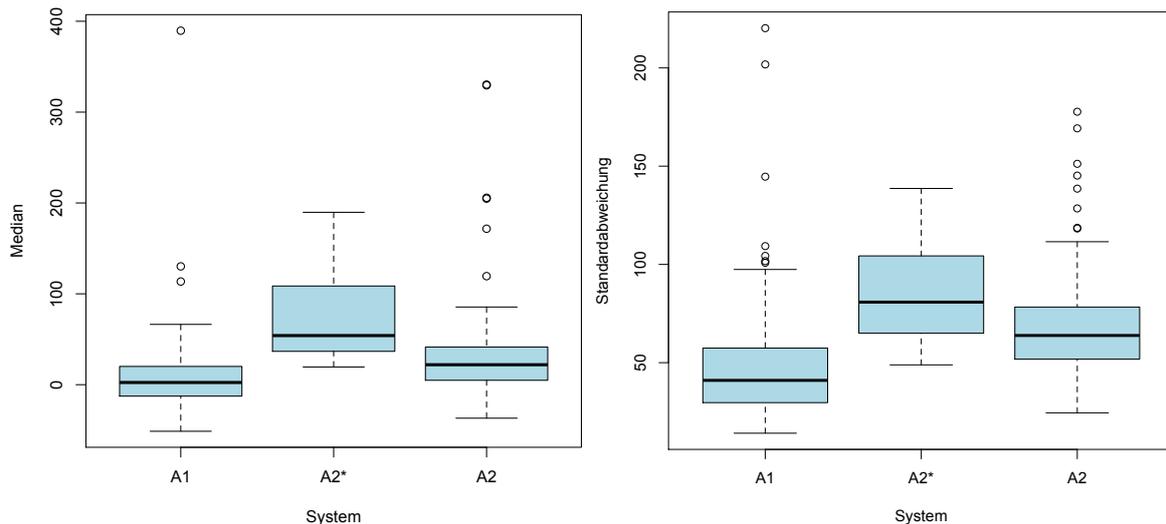
Die reine Steuerung scheint bessere Ergebnisse bei den Piloten erzielt zu haben, wie die niedrigeren Mittelwerte und niedrigeren Standardabweichungen in Abbildung 86 für das System A1, sowie die niedrigeren Maximalwerten in Abbildung 87 für das System A1 zeigen.



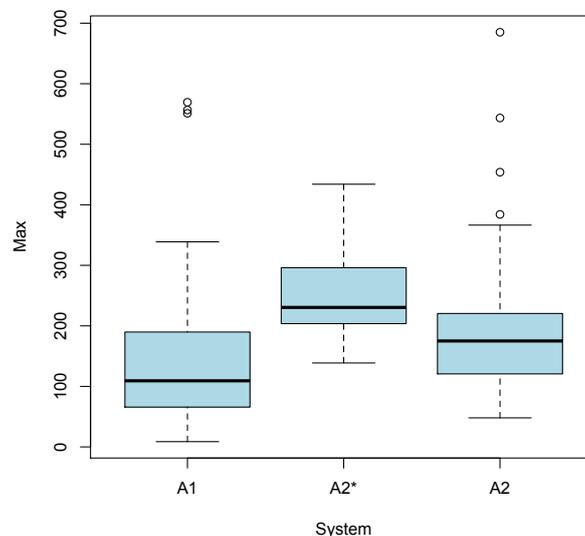
**Abbildung 87: Maximalwert der Positionsdifferenz in Meter nach Systemart ohne Baseline**

Wie in Kapitel 4.3.3 erläutert, wurden zwei verschiedene Systeme mit Regler entwickelt. Ein System mit nur einem klassischen  $PI_2$ -Regler (A2\*) und ein System mit einem zusätzlichen Smith-Prädiktor (A2), entsprechend der Empfehlungen der Piloten in den Vorversuchen. Die etwas schlechteren Ergebnisse des geregelten Systems im Vergleich zum gesteuerten System

sind hauptsächlich mit dem System ohne Prädiktor entstanden, wie Abbildung 88 und Abbildung 89 verdeutlichen.



**Abbildung 88: Median und Standardabweichung der Positionsdiffenz in Meter nach System ohne Baseline**



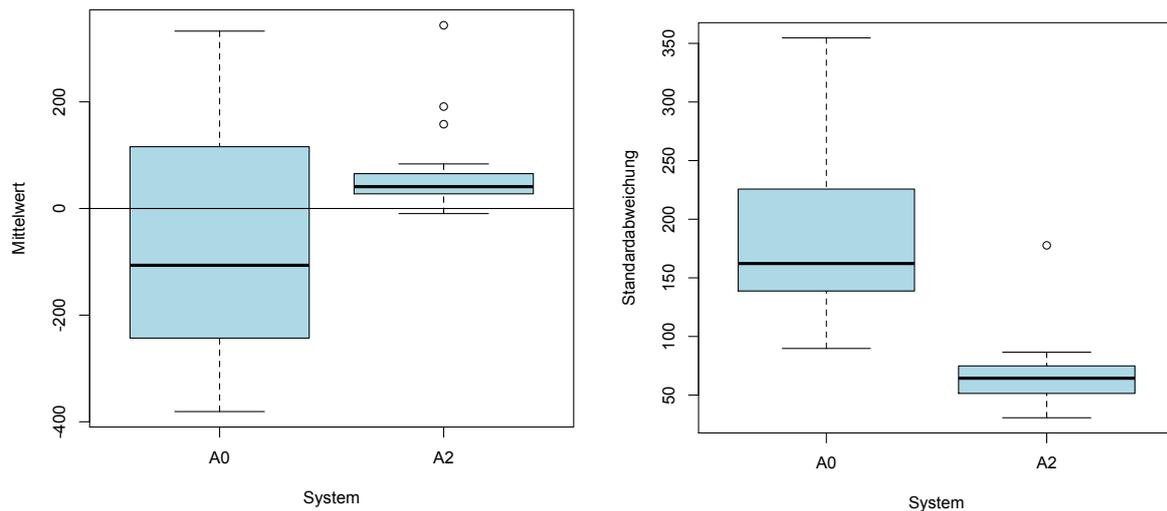
**Abbildung 89: Maximalwert der Positionsdiffenz in Meter nach System ohne Baseline**

Sowohl für die Steuerung als auch für die Regelung liegen die Werte innerhalb der gewünschten Schranken (s. Kapitel 0). Und somit, zusammen mit der Erkenntnis, dass die Piloten mit dem Baseline-System weit außerhalb dieser Schranken lagen, ist Hypothese H1 für beide Systeme validiert.

### 5.2.4. Gebrauchstauglichkeit

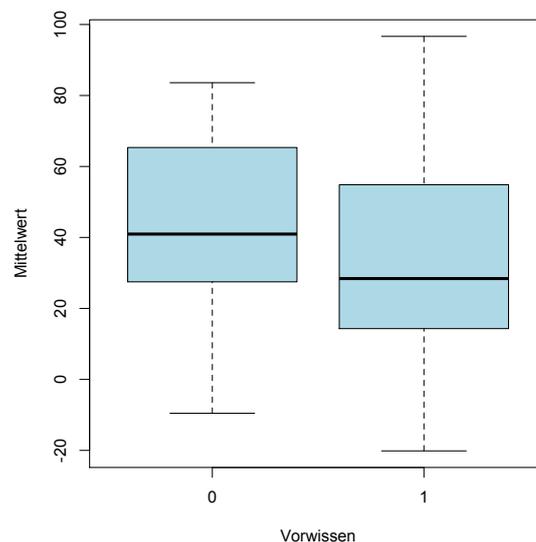
Auch ohne Vorwissen ist die Erfüllung der zeitlichen Vorgabe mit Hilfe des Reglers deutlich zu erkennen. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten des Baseline-Systems (A0) und des geregelten Systems (A2), sowie der Unterschied zwischen den Standardabweichungen des Baseline-Systems (A0) und des geregelten Systems (A2) in Abbildung 90 veranschaulicht dies.

Somit ist die Gebrauchstauglichkeit des Systems validiert (Hypothese H3, s. Kapitel 0).



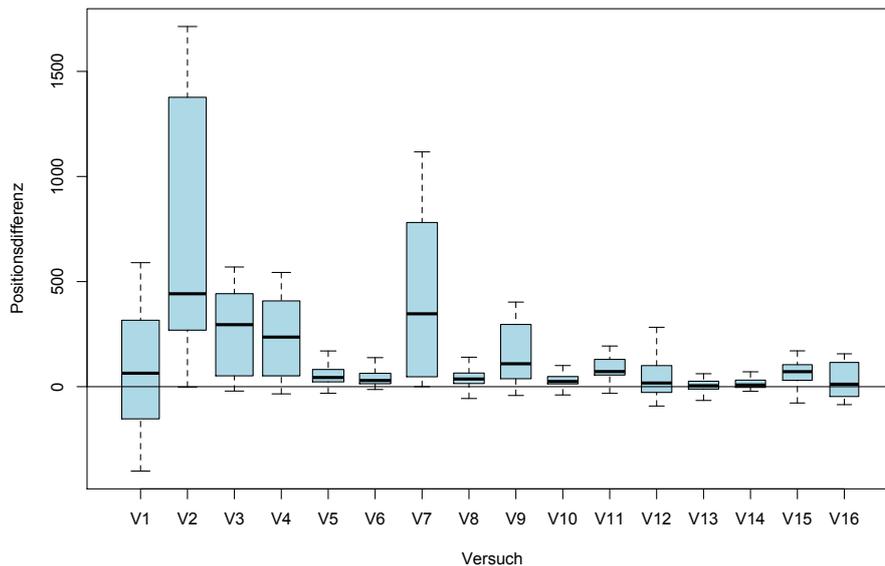
**Abbildung 90: Mittelwert und Standardabweichung ohne Vorwissen**

Einen Einfluss des Vorwissens auf die Güte der abgerollten Trajektorie ist nur für den Mittelwert der Versuche mit Regler zu erkennen ( $p=0,06066$ ). Wie in Abbildung 91 zu erkennen, verringert sich der Mittelwert der Positionsdifferenz um etwa 10 Meter nach dem Briefing.



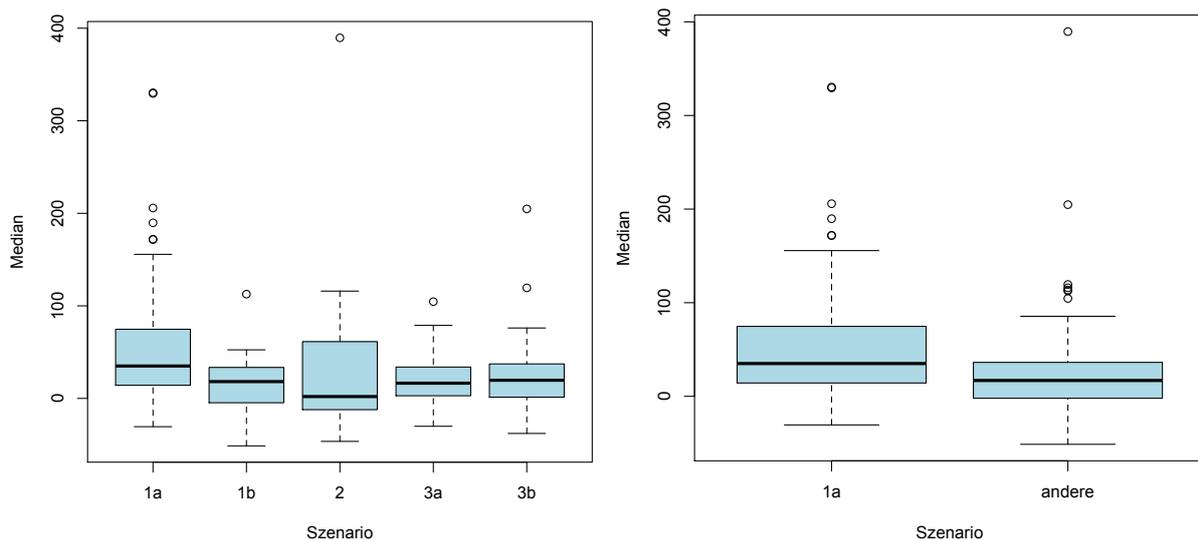
**Abbildung 91: Einfluss des Vorwissens bei den Versuchen mit Regler – Mittelwert der Positionsdifferenz in Meter**

Generell war jedoch der Einfluss des Briefings auf die Solltrajektorie sehr gering bis auf einen Piloten (Pilot 3, s. Abbildung 92). In diesem Fall rollte der Pilot so langsam, dass er immer eine sehr lange Linie von Rollwegbefehlselementen sehen konnte. Somit gab es kaum merkbare Unterschiede für diesen Pilot zwischen den Versuchen mit Baseline oder mit Steuerung bzw. mit Reglervorgaben. Zwischen Versuchen 4 und 5 wurde der Pilot darauf aufmerksam gemacht, dass die Vorgaben viel schneller waren als er. Ab Versuch 5 sind dann die Unterschiede zwischen den Versuchen mit Baseline (V7 und V9) und den anderen Versuchen deutlich zu erkennen.



**Abbildung 92: Positionsdifferenz in Meter nach Versuch für Pilot 3**

Die Auswahl der Szenarien scheint nur einen mäßigen Einfluss auf die Einhaltung der Solltrajektorie zu haben. Nur die Medianwerte zeigen einen niedrigen Signifikanzwert (s. Tabelle 25). Bei genauer Analyse der Werte ist ein sehr niedriger Signifikanzwert ( $p = 3,452e^{-5}$ ) zu beobachten für den Unterschied der Medianwerte bei Szenario 1a im Vergleich zu allen anderen. Die Medianwerte der Positionsdifferenz für dieses Szenario sind durchwegs schlechter als für die anderen Szenarien wie in Abbildung 93 abzulesen.

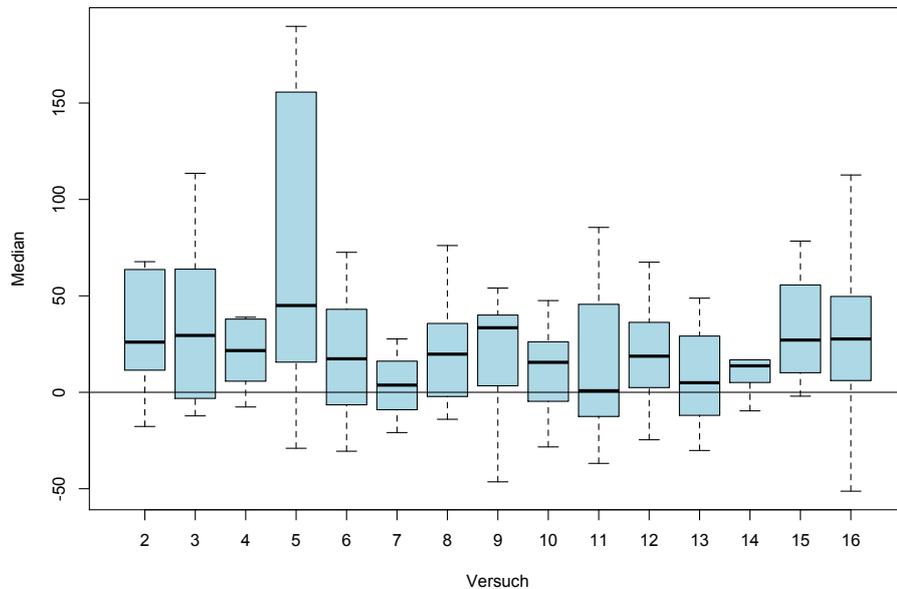


**Abbildung 93: Medianwert der Positionsdifferenz in Meter nach Szenario für die Versuche ohne Baseline**

Da Szenarien 1a und 1b die gleiche räumliche Solltrajektorie hatten (s. Tabelle 20), scheint der Grund für die Signifikanz von Szenario 1a in der enthaltenen zeitlichen Vorgabe zu liegen. Hierbei liegt ein Gesamtunterschied von 26s zwischen den beiden Szenarien (1a: 7min16s – 1b: 7min42s). Möglicherweise waren diese Vorgaben zu unrealistisch gewählt, so dass die Piloten den resultierenden Anweisungen nur schwer folgen konnten.

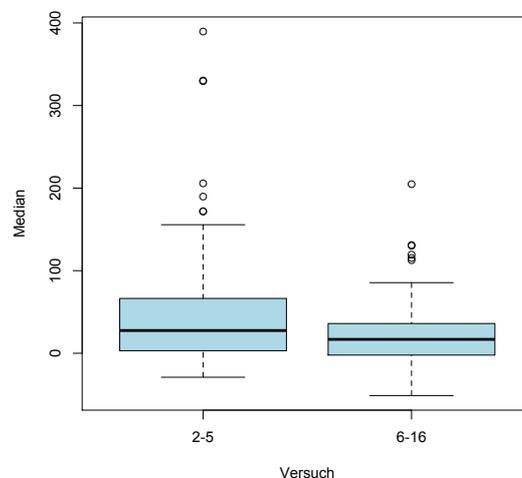
Der Einfluss der Versuchsnummer auf die Ergebnisse könnte ein gutes Maß sein, um den möglichen Einfluss der Ermüdung der Probanden auf die Durchführung dieser komplexen

Rollaufgabe zu untersuchen. Wie in Tabelle 25 abzulesen, hatte die Versuchsnummer nur auf die Medianwerte einen signifikanten Einfluss. Jedoch scheinen die Werte nicht nach steigender Zeit und entsprechender Müdigkeit schlechter zu werden (s. Abbildung 94). Vielmehr scheinen die ersten Versuche etwas schlechter zu sein als die weiteren.



**Abbildung 94: Median der Positionsdifferenz in Meter nach Versuchsnummer für die Versuche ohne Baseline**

Bei genauer statistischer Analyse ist ein sehr niedriger Signifikanzwert ( $p = 0,0001068$ ) und dementsprechend ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Differenz der Soll- und Ist-Trajektorie vor und nach dem fünften Versuch (s. Abbildung 95) zu erkennen. Bei den Versuchen 2 bis 5 sind die Ergebnisse schlechter, mit einer deutlich höheren Positionsdifferenz als bei den Versuchen 6 bis 16.



**Abbildung 95: Median der Positionsdifferenz in Meter nach Versuch vor und nach der ersten Pause ohne Baseline**

Wie in Kapitel 4.3.3 erläutert, war die erste Pause nach dem dritten Versuch mit Vorwissen eingeplant, dies entspricht genau dem fünften Versuch. Folglich scheint die Zeit zur

Verarbeitung der neuen Aufgabe während der Pause eine entscheidende Rolle auf die erzielten Ergebnisse gehabt zu haben.

### 5.3. Fragebögen

Die Fragebögen wurden eingesetzt um die qualitativen subjektiven abhängige Variablen der Benutzbarkeit, Lernbarkeit und des Situationsbewusstseins zu erfassen. Erwartungsgemäß liegt die statistisch signifikanteste Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Ergebnissen der Fragebögen - MCHS, SUS, RTLX und SART - und den einzelnen Piloten, wie die niedrige Werte des Signifikanzniveaus der individuellen Wahrnehmung (Zeile „Piloten“) in Tabelle 26 zeigen.

Dieses liegt für die RTLX Werte an der je nach Pilot sehr unterschiedlichen subjektiven Bewertung der Beanspruchung durch die Rollaufgabe. Aus diesem Grund werden im Folgenden teilweise intra-subjekt RM-ANOVA (s. Kapitel 4.1.4) Ergebnisse dargestellt.

**Tabelle 26: Signifikanzniveau des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die Fragebögen Ergebnisse**

	MCHS	SUS	RTLX	SART
Piloten	0,0307 **	0,3078 -	0,0041 ***	0,145 °
System	0,2727 -	0,1707 -	0,3014 -	0,3561 -
Vorwissen (ohne Baseline)	0,0071 ***	0,1903 -	0,5023 -	0,2915 -
Baseline	0,7442 -	0,0751 *	0,0610 *	0,1294 °
Steuerung/Regelung	0,2387 -	0,7849 -	0,8088 -	0,7158 -

mit  $p \leq 0,01$  (\*\*\*) ;  $0,01 < p \leq 0,05$  (\*\*);  $0,05 < p \leq 0,10$  (\*);  $0,10 < p \leq 0,15$  (°)

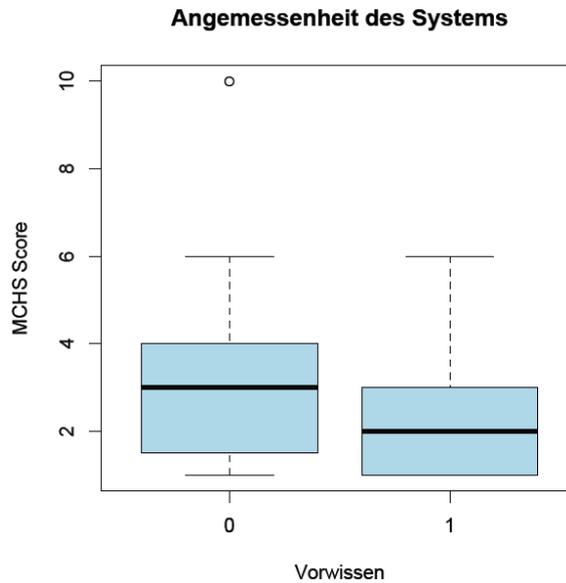
Das Vorwissen über das System ist für die Bewertung der Angemessenheit des Systems durch die „Modified Cooper Harper Rating Scale“ (MCHS, s. Anhang B) sehr relevant. Die konstante oder dynamische Länge der Lampen war sowohl für die Benutzbarkeit (SUS) als auch für die Beanspruchung (RTLX) und die Beurteilung des Situationsbewusstseins (SART) ausschlaggebend (Linie Baseline in Tabelle 26). Dagegen war die Logik hinter der dynamischen Bewegung der Lampen für die Piloten völlig transparent, wie die hohen Werten des Signifikanzniveaus der Linie Steuerung/Regelung in Tabelle 26 zeigen.

#### 5.3.1. Modified Cooper-Harper Rating Scale

Anhand der, an die Rollaufgabe angepassten, „Cooper Harper Rating Scale“ (MCHS) konnten die Piloten am Ende jeden Versuchs die empfundene Angemessenheit des Systems für die zu bewältigende Aufgabe bewerten. Je niedriger die MCHS Zahl desto besser die Bewertung, die Zahl 1 stellt die maximale Bewertung in dieser Skala dar.

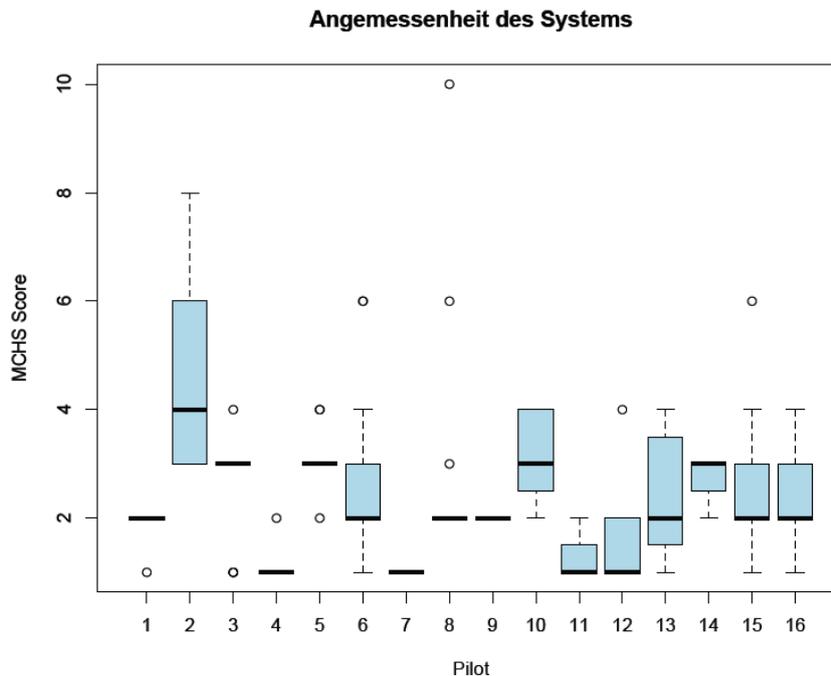
In Abbildung 96 ist der Einfluss des Vorwissens auf die Gesamtbewertung des Systems mittels der MCHS deutlich. Neben einer Verbesserung des Mittelwerts um einen Punkt auf der MCHS-Skala, verschwinden auch die Ausreißer nach dem Briefing. Da vor dem Briefing

die genaue Aufgabe beabsichtigt für die Piloten nicht klar war, ist dieses Ergebnis erwartungsgemäß.



**Abbildung 96: Bewertung des Systems mit und ohne Vorwissen anhand von MCHS**

Eine allgemein sehr hohe Bewertung der Angemessenheit des Systems für die Aufgabe ist hier zu bemerken, mit einem Medianwert von 2 nach dem Briefing.



**Abbildung 97: Bewertung des Systems nach Pilot anhand von MCHS**

Wie aus Tabelle 26 zu entnehmen ist, stellt die individuelle Wahrnehmung der einzelnen Piloten die größte Varianz für die Bewertung der Angemessenheit des Systems für die 4D-Rollaufgabe mittels der MCHS dar. Dies ist in Abbildung 97 deutlich erkennbar.

Für die Piloten 2, 6, 8 und 15 ist eine relativ große Streuung der MCHS Werte zu bemerken. Dieses ist bedingt durch den, für diese Piloten sehr hohen, Einfluss des Vorwissens auf die Bewertung der Angemessenheit des Systems, wie in Abbildung 98 zu sehen ist.

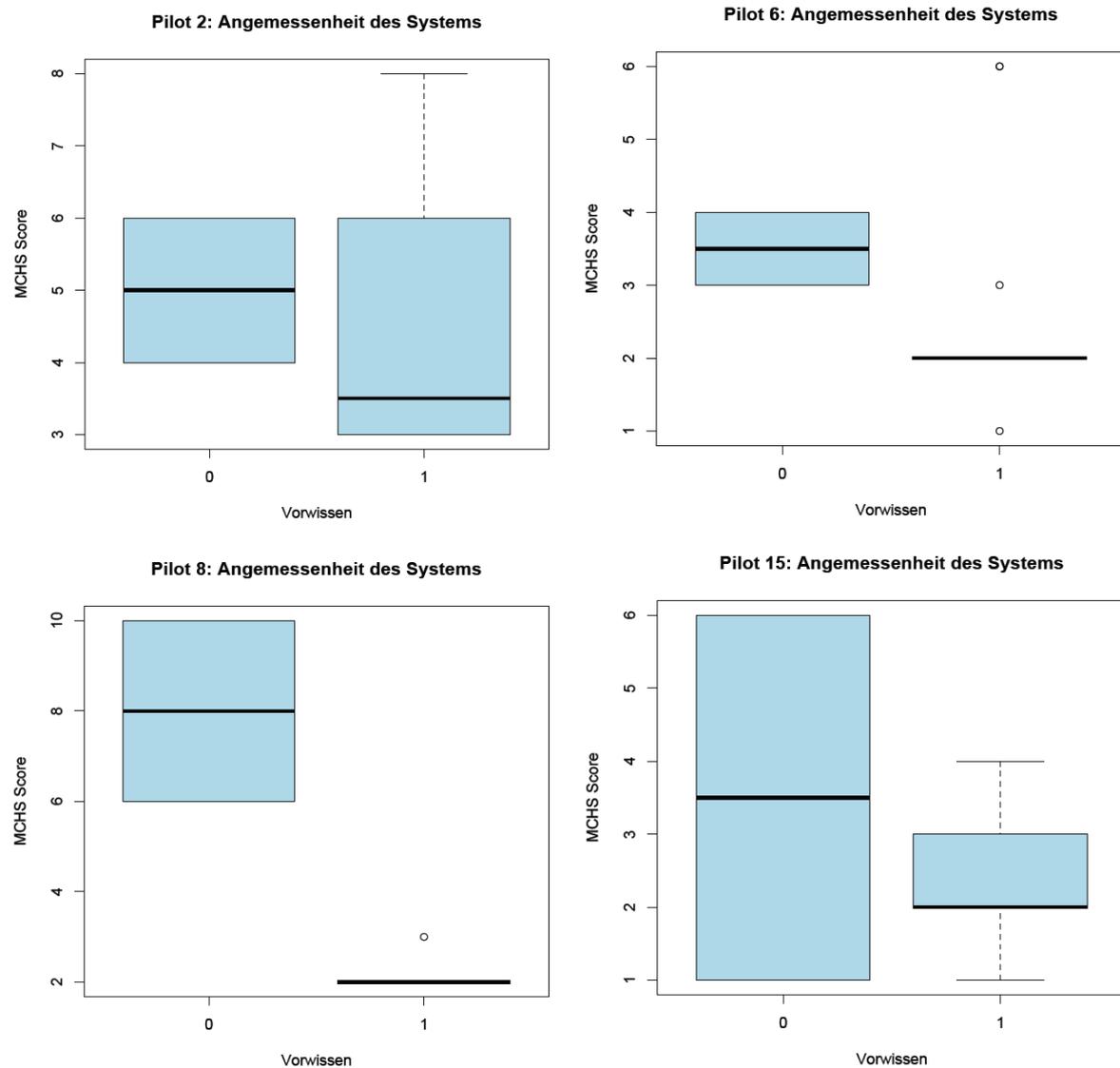


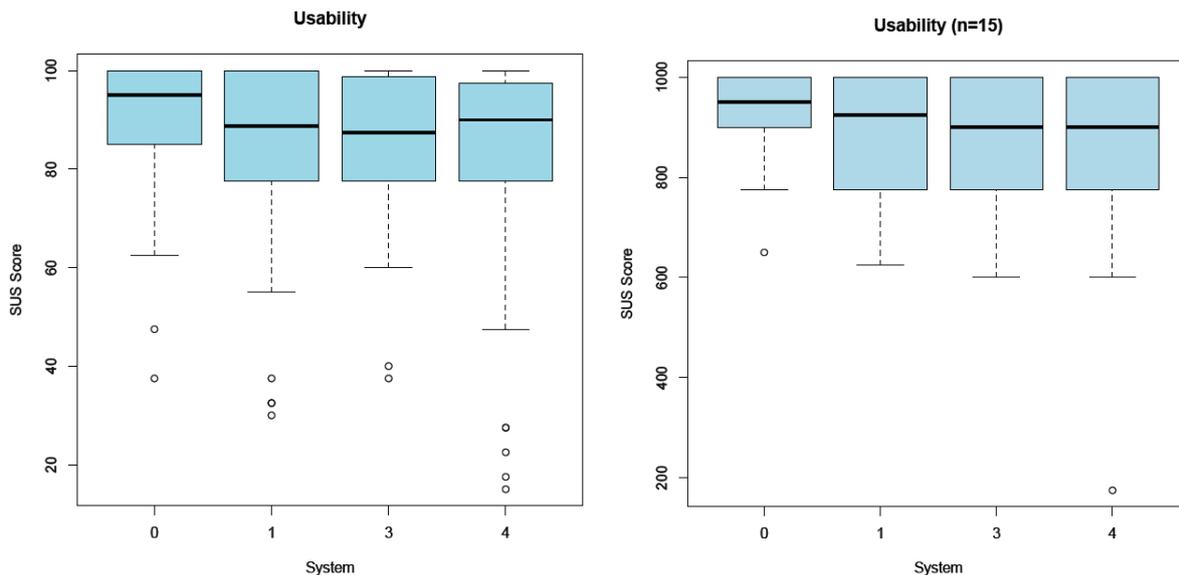
Abbildung 98: Bewertung des Systems von Piloten 2, 6, 8 und 15 anhand von MCHS

### 5.3.2. System Usability Scale

Anhand der „System Usability Scale“ (SUS, s. Anhang C) konnten die Piloten am Ende jedes Versuches die empfundene Gebrauchstauglichkeit des Systems bewerten.

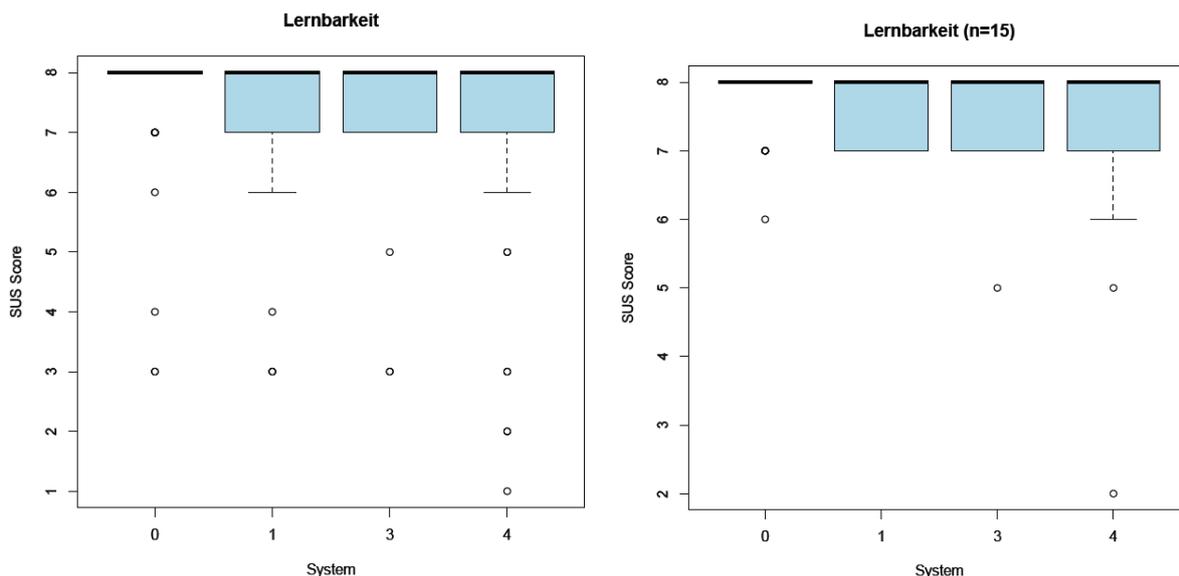
In Abbildung 99 ist der Einfluss der Einführung einer Zusatzaufgabe auf die Bewertung der Benutzbarkeit des Systems deutlich zu erkennen: das Baseline-System mit reiner Wegsteuerung bekam eine höhere Bewertung als die drei Systeme mit zusätzlicher Zeitsteuerung.

Eine allgemein sehr hohe Bewertung der Benutzbarkeit für alle Systeme ist zu bemerken, mit 75% aller Bewertungen über 80. Alle Werte unter 50 stellen Ausreißer dar. Diese Ausreißer kamen alle vom selben Piloten, der die Idee des Systems grundsätzlich als falsch empfand, wie die Darstellung der Ergebnisse ohne diesen Piloten verdeutlichen (n=15, Abbildung 99).



**Abbildung 99: Bewertung der Benutzbarkeit des Systems anhand der SUS-Skala**

Nach [LS09] kann die SUS-Skala neben der Benutzbarkeit auch Aufschluss über die Lernbarkeit des Systems geben anhand zwei der zehn Subskalen (s. Kapitel 0). Hier sind ebenfalls sehr hohe Werte für alle Systeme zu sehen, mit dem Medianwert durchweg bei der maximalen Bewertung (8 Punkte), der Ausreißer vom selben Piloten wiederum ausgenommen (n=15, Abbildung 100). Ein etwas besserer Wert für das Baseline-System ist ebenfalls zu erkennen.



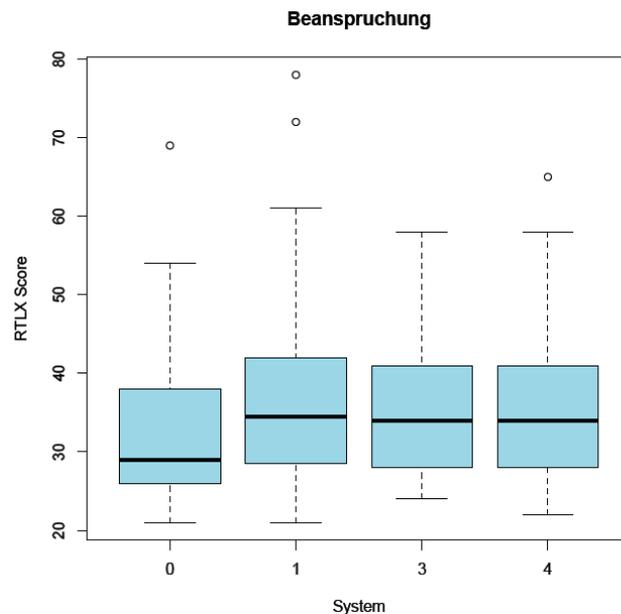
**Abbildung 100: Bewertung der Lernbarkeit des Systems anhand der SUS-Skala**

### 5.3.3. Raw TLX

Anhand des „Raw Task Load Index“ (RTLX, s. Anhang D) konnten die Piloten am Ende jedes Versuchs die empfundene Gesamtbeanspruchung durch die 4D-Rollaufgabe mit der Unterstützung des Systems bewerten.

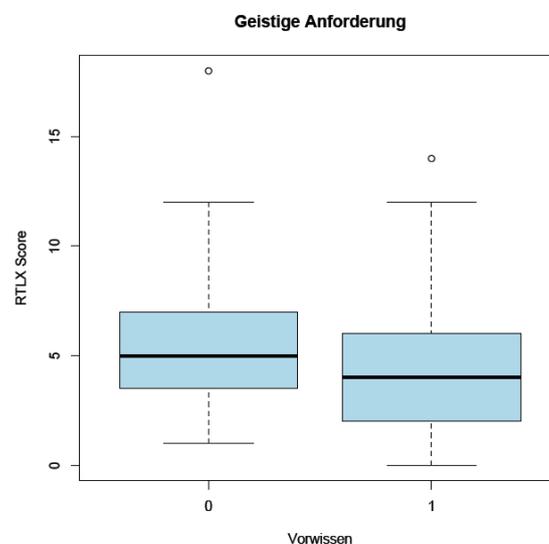
In Abbildung 101 ist der Einfluss einer zusätzlichen Dimension in der Rollaufgabe auf die gefühlte Beanspruchung der Probanden deutlich zu erkennen, mit dem Medianwert der Beanspruchung etwa 10 Punkte niedriger als für alle drei anderen Systeme. Die Logik hinter

der dynamischen Bewegung der Lampen für die Piloten scheint für die Beanspruchung kaum einen Einfluss zu haben. Ein etwas breiteres Spektrum der Ergebnisse für die Steuerung in Vergleich zu beiden Regelungen ist jedoch zu beobachten.



**Abbildung 101: Bewertung der Gesamtbeanspruchung mit dem System anhand der RTLX-Skala**

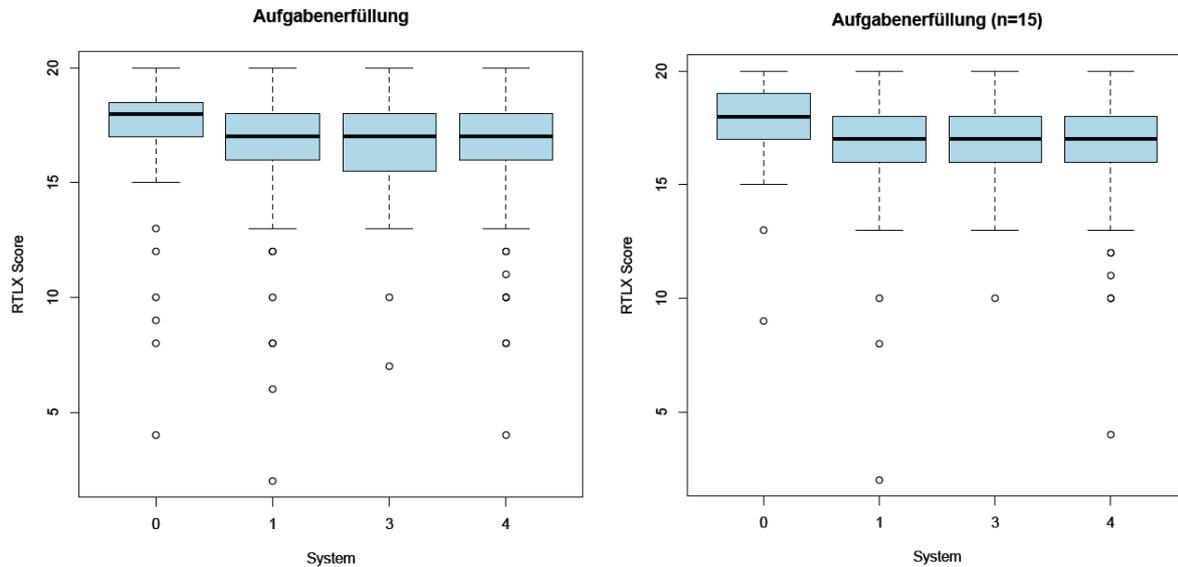
In Abbildung 102 ist der Einfluss des Vorwissens für die empfundene geistige Anforderung deutlich zu erkennen. Nach dem Briefing empfanden die Piloten die Aufgabe weniger schwer als davor. Ein allgemein niedriger Wert der empfundenen geistigen Anforderung ist hier zu bemerken, mit einem Medianwert von 4 Punkten nach dem Briefing (der Maximalwert liegt bei 20 Punkten).



**Abbildung 102: Bewertung der geistigen Anforderung mit und ohne Vorwissen anhand der RTLX-Skala**

Eine allgemein sehr hohe Bewertung der empfundenen Aufgabenerfüllung ist zu bemerken, mit 50% aller Bewertungen über 15 von 20. Die meisten Werte unter 15 stellen Ausreißer dar.

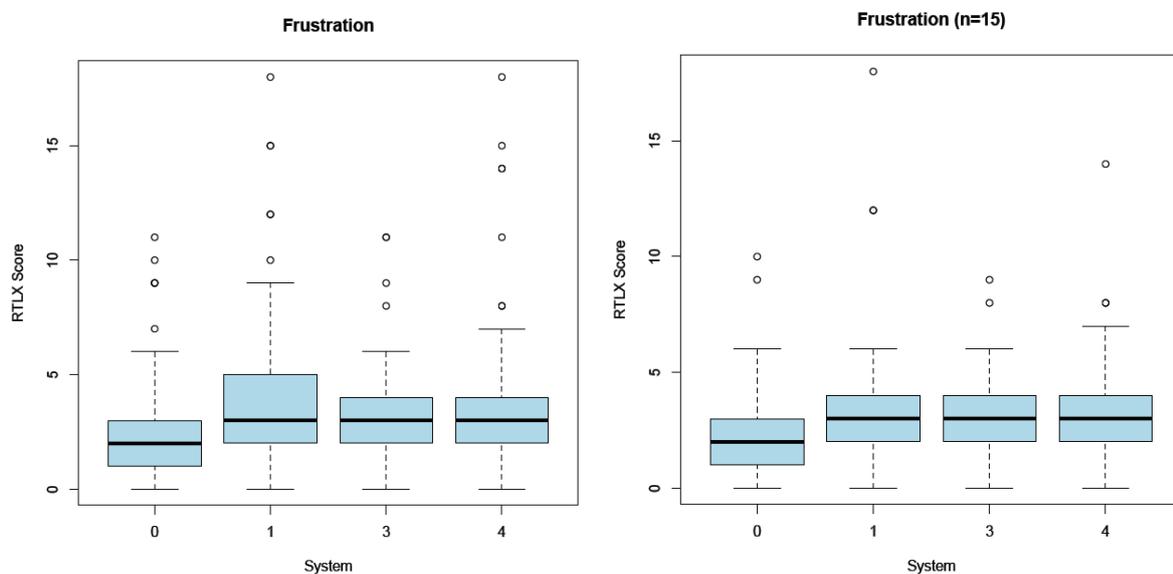
Diese Ausreißer kamen zum größten Teil vom selben Piloten, wie bereits für die SUS-Skala, wie die Darstellung der Ergebnisse ohne diesen Piloten (n=15 in Abbildung 103) verdeutlichen.



**Abbildung 103: Bewertung der empfundenen Aufgabenerfüllung mit Hilfe des Systems anhand der RTLX-Skala**

Ebenfalls wurden für die empfundene Frustration für alle Systemarten erfreulich niedrige Werte von den Piloten gegeben. Hierbei ist zu bemerken, dass das Baseline-System noch besser eingeschätzt wurde als die drei weiteren Systemarten. Hier sind die meisten Ausreißer auf einen einzigen Pilot zurückzuführen, wie die Darstellung ohne diesen Piloten in Abbildung 104 (n=15) verdeutlicht.

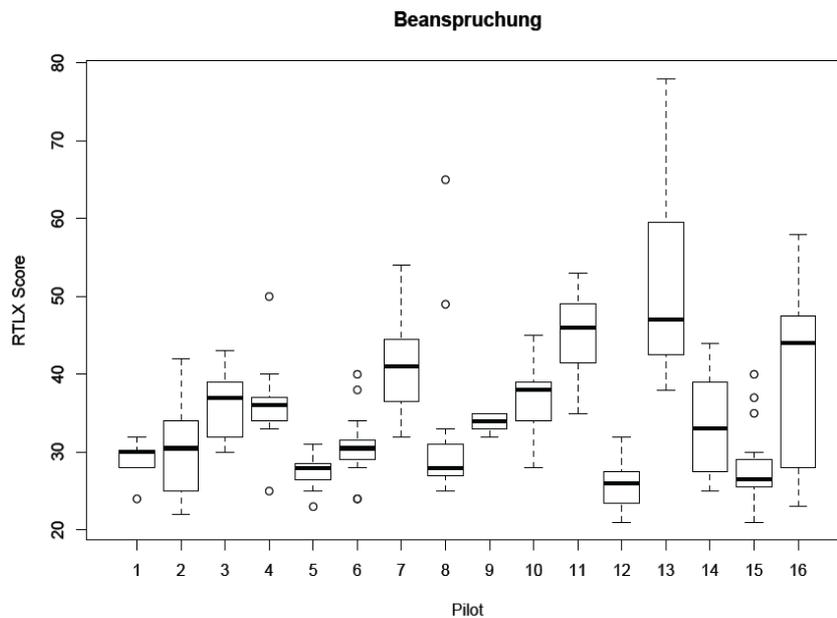
Die scheinbar schlechtere Bewertung der empfundenen Frustration für die reine Steuerung (System=1) ist ebenfalls durch denselben Piloten bedingt, da diese schlechtere Bewertung mit n=15 nicht mehr zu sehen ist.



**Abbildung 104: Bewertung der empfundenen Frustration nach Systemart anhand der RTLX-Skala**

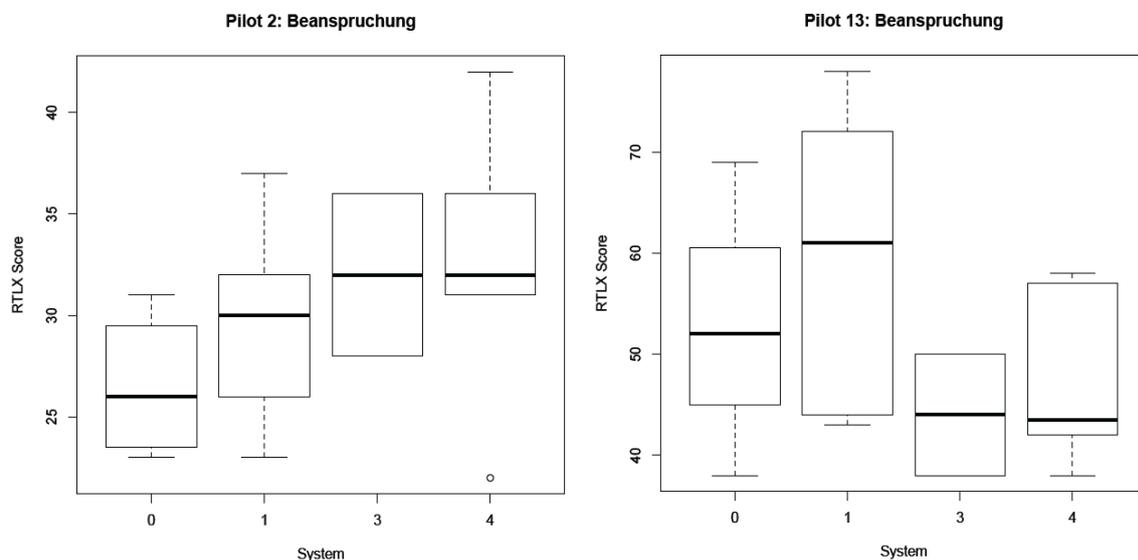
## 5. Ergebnisse

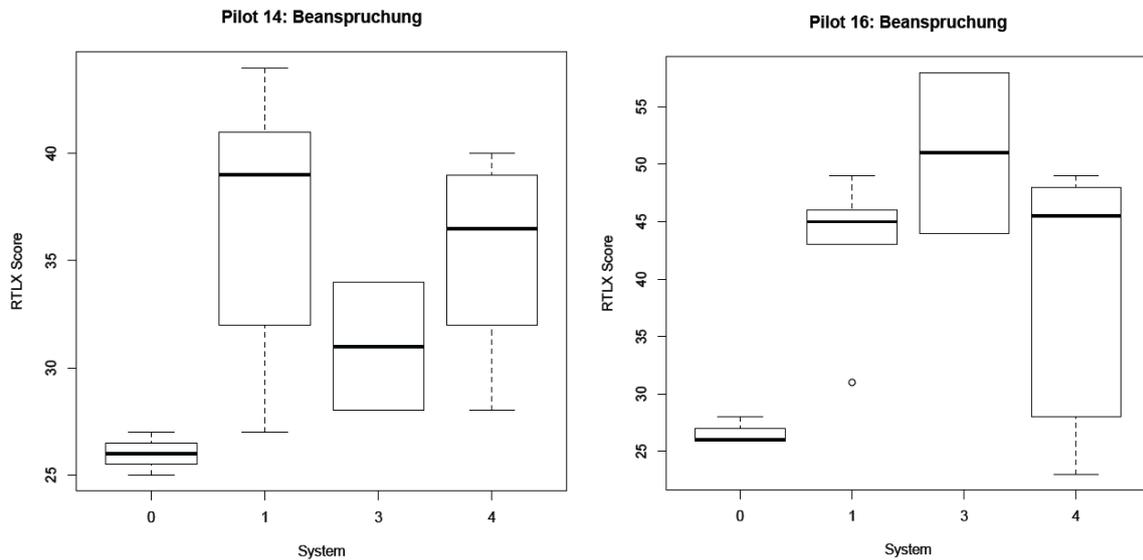
Wie aus Tabelle 26 zu erkennen ist, stellt die individuelle Wahrnehmung der einzelnen Piloten die größte Varianz für die Bewertung der Gesamtbeanspruchung mit dem System während der 4D-Rollaufgabe mittels der RTLX-Skala dar. Dieses ist in Abbildung 105 deutlich erkennbar, mit sehr starken Unterschieden zwischen den Piloten.



**Abbildung 105: Bewertung der Gesamtbeanspruchung mit dem System nach Pilot anhand der RTLX-Skala**

Für die Piloten 2, 13, 14 und 16 ist eine besonders große Streuung der RTLX Werte zu bemerken. Dieses ist bedingt durch den, für diese Piloten sehr hohen, Einfluss der Systemart auf die Bewertung der Angemessenheit des Systems, wie in Abbildung 106 zu sehen ist. Hierbei hat die Systemart für jeden dieser Piloten einen unterschiedlichen Einfluss auf die empfundene Beanspruchung. Während für Piloten 14 und 16 das Baseline-System (System=0) eindeutig eine niedrigere Beanspruchung erforderte, war dies für Pilot 2 ebenfalls der Fall, aber weniger deutlich. Für Pilot 13 hingegen stellte das Rollen, unterstützt durch die Regelung (System=3 und System=4), die niedrigste Beanspruchung dar.



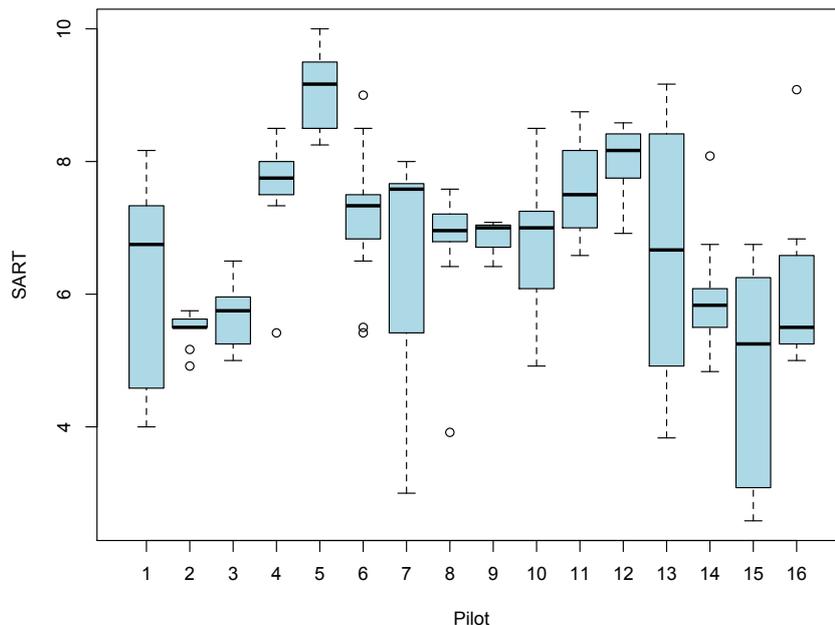


**Abbildung 106: Einzelne Bewertungen der Gesamtbeanspruchungen von Piloten 2, 13, 14 und 16**

### 5.3.4. Situation Awareness Rating Technique

Anhand der „Situation Awareness Rating Technique“ (SART, s. Anhang E) Skala konnten die Piloten am Ende jedes Versuchs das empfundene Situationsbewusstsein während des Versuchslaufs bewerten.

Wie aus Tabelle 26 abzulesen, stellt die individuelle Wahrnehmung der einzelnen Piloten die größte Varianz ( $p = 0,145$ ) für die Bewertung des empfundenen Situationsbewusstseins während der Versuche dar. Diese Korrelation ist bei den Versuchen ohne Baseline, mit einem Signifikanzwert von  $p = 0,02987$ , noch stärker ausgeprägt (s. Abbildung 107).

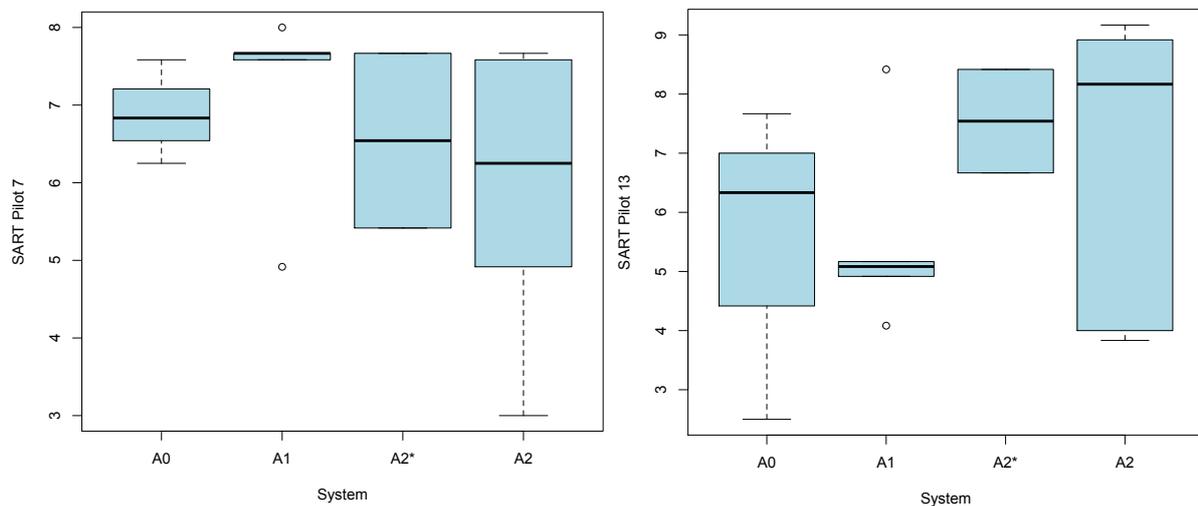


**Abbildung 107: Empfundenes Situationsbewusstsein nach Pilot während der Versuche ohne Baseline**

## 5. Ergebnisse

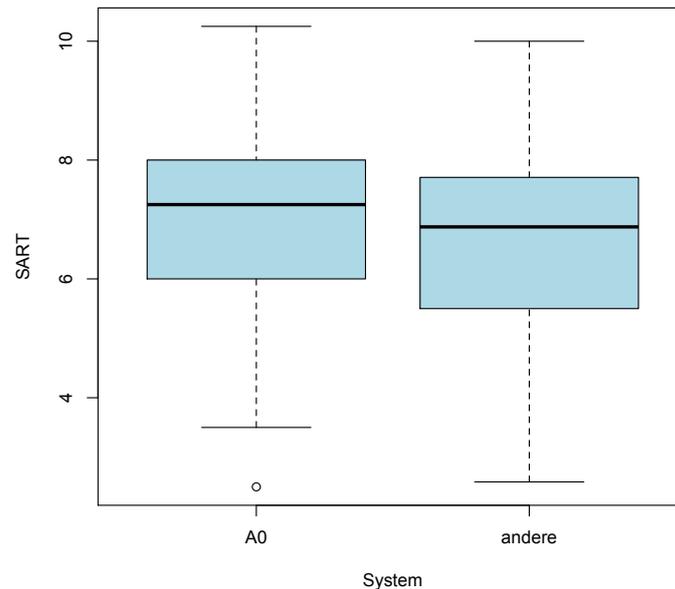
Für einige der wenigen Piloten mit einer großen Ausprägung der Situationsbewusstseinswerte ist eine Relevanz der Systemart zu erkennen. Insbesondere die Piloten 7 ( $p = 0,1898$ ) und 13 ( $p = 0,1623$ ) empfanden ihr Situationsbewusstsein bei den Versuchen mit der Steuerung (System A1) unterschiedlich im Vergleich zu den Versuchen mit der Regelung (Systeme A2 und A2\*). Pilot 7 empfand mit der Steuerung ein deutlich stärkeres Situationsbewusstsein, während Pilot 13 hingegen ein deutlich schlechteres Situationsbewusstsein, wie in Abbildung 109 zu sehen ist.

Für die meisten Piloten jedoch hatte der Unterschied zwischen den zwei Arten der zeitlichen Vorgabe keinen Einfluss auf das empfundene Situationsbewusstsein und schien somit transparent für die Probanden zu sein.



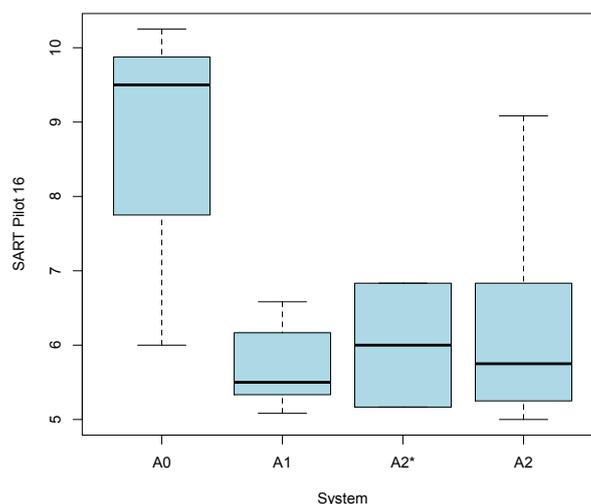
**Abbildung 108: Empfundenes Situationsbewusstsein nach Systemart für Piloten 7 und 13**

Die Zusatzaufgabe der zeitlichen Führung hatte einen etwas größeren Einfluss auf das empfundene Situationsbewusstsein der Piloten ( $p = 0,1294$ ). Wie in Abbildung 108 zu sehen, empfanden die Piloten ein etwas besseres Situationsbewusstsein ohne die zeitliche Vorgabe.



**Abbildung 109: Beurteilung des empfundenen Situationsbewusstseins**

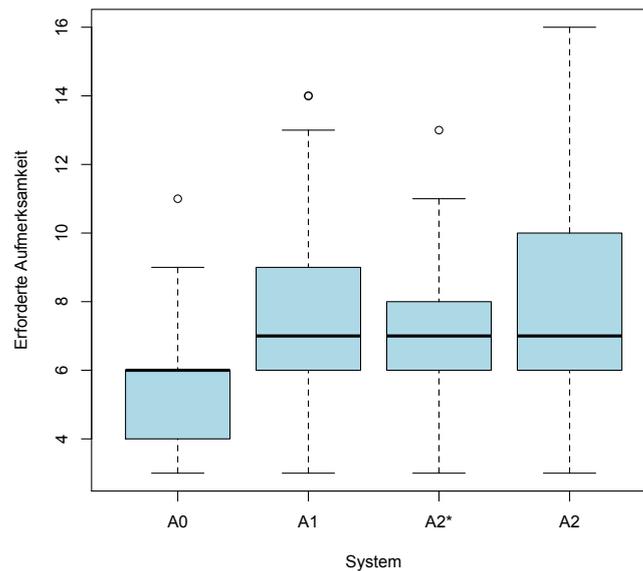
Für manche Piloten hatte diese Zusatzaufgabe einen sehr deutlichen Einfluss, wie beispielhaft Abbildung 110 für Pilot 16 veranschaulicht. Hierbei ist jedoch zu bemerken, dass keine der Werte auf ein schlechtes Situationsbewusstsein hindeuten.



**Abbildung 110: Empfundenes Situationsbewusstsein nach Systemart für Pilot 16**

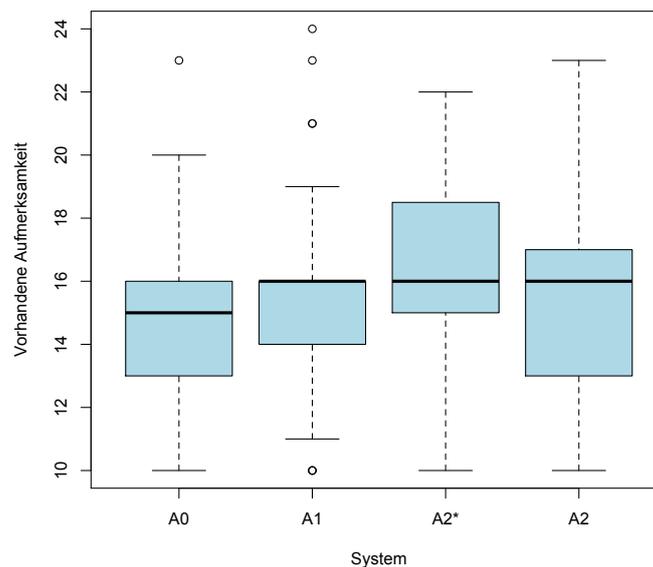
Die Ergebnisse der SART Befragung ermöglichen eine Beurteilung von drei Dimensionen des Situationsbewusstseins (s. Kapitel 0): die erforderte Aufmerksamkeit, die vorhandene Aufmerksamkeit, sowie das Verständnis für die Situation.

Die Systemart hatte vor allem auf die erforderte Aufmerksamkeit einen Einfluss, mit einem Signifikanzfaktor von  $p = 0,008538$ . Erwartungsgemäß sorgte hierbei die Einführung der zusätzlichen zeitlichen Dimension in der Rollaufgabe für eine Erhöhung der empfundenen geforderten Aufmerksamkeit (s. Abbildung 111).



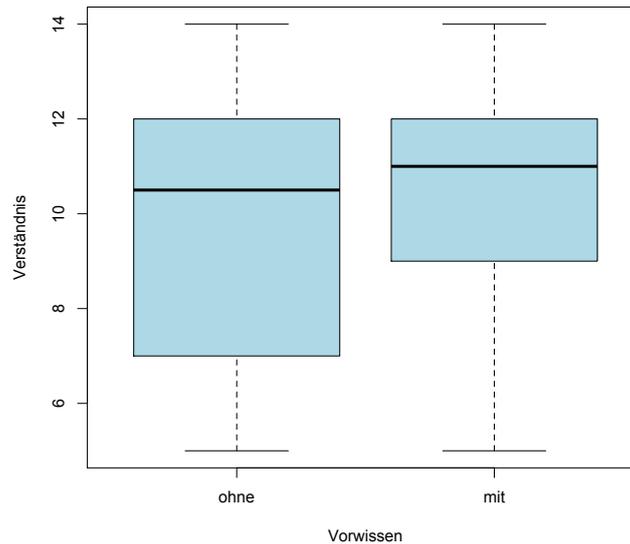
**Abbildung 111: Beurteilung der geforderten Aufmerksamkeit nach Systemart**

Die vorhandene Aufmerksamkeit hingegen war nur etwas niedriger beim Baseline-System als bei den Systemen mit zeitlicher Vorgabe, wie in Abbildung 112 zu sehen. Hierbei war die Korrelation mit der Systemart deutlich geringer ( $p = 0,2429$  für das Baseline-System verglichen zu den anderen Systemen).



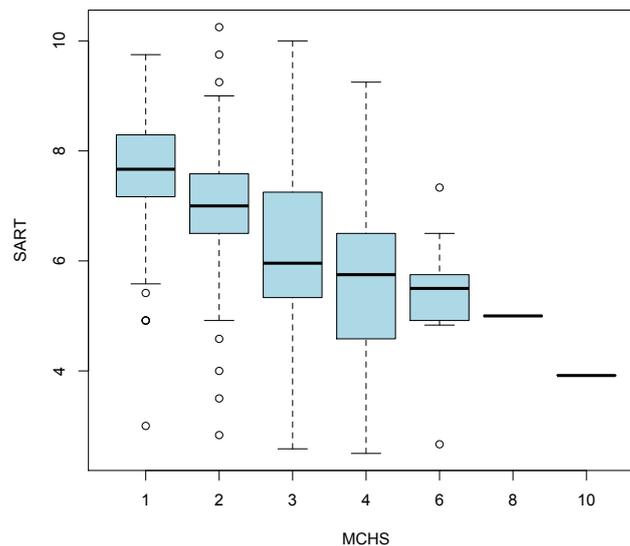
**Abbildung 112: Beurteilung der vorhandenen Aufmerksamkeit nach Systemart**

Die dritte Dimension hingegen, das Verständnis für die Aufgabe, wies keine Abhängigkeit zur benutzten Systemart auf ( $p = 0,7579$ ). Dagegen scheint das Briefing einen gewissen Einfluss auf das Verständnis zu haben ( $p = 0,1582$ ), mit einer logischen Verbesserung des Wertes mit Vorwissen (s. Abbildung 113).



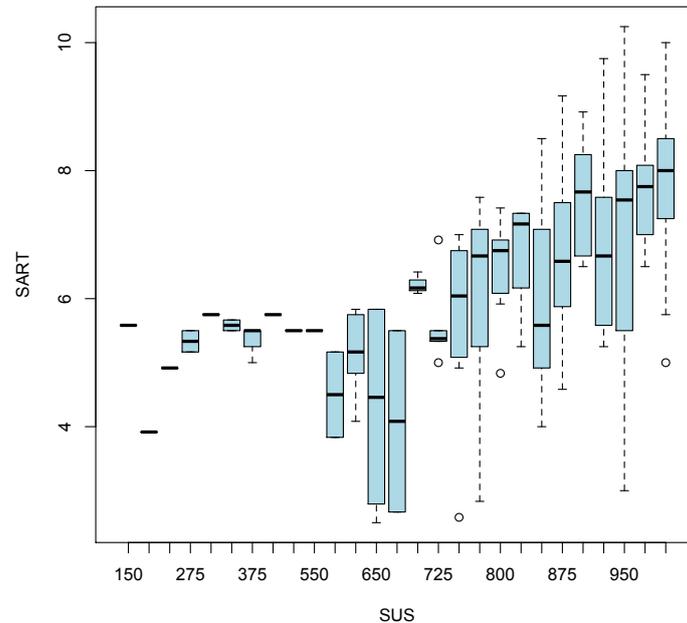
**Abbildung 113: Beurteilung des Verständnisses mit und ohne Vorwissen**

Das empfundene Maß an Situationsbewusstsein hatte einen großen Einfluss auf die Beurteilung der Angemessenheit des Systems durch die Piloten, wie der sehr niedrige Signifikanzwert von  $p = 1,275e^{-11}$  zeigt. Wie in Abbildung 114 abzulesen, war ein gutes Situationsbewusstsein ausschlaggebend für eine gute Bewertung der Angemessenheit des Systems.



**Abbildung 114: Korrelation zwischen dem empfundenen Maß an Situationsbewusstsein und die bewertete Angemessenheit des Systems**

Eine ähnlich starke Korrelation ist bei den Werten aus der SUS-Skala zu erkennen. Mit dem bestmöglichen Signifikanzwert von  $p < 2,2e^{-16}$  ist in Abbildung 115 deutlich zu erkennen, dass die Piloten auch die Gebrauchstauglichkeit des Systems stark mit der Höhe des empfundenen Situationsbewusstseins verbinden.



**Abbildung 115: Korrelation zwischen dem empfundenen Maß an Situationsbewusstsein und der bewerteten Gebrauchstauglichkeit des Systems**

## 5.4. Debriefing

Eine Zusammenfassung aller Kommentare, die die Piloten zu dem System im Laufe der Versuche sowie während des Debriefings gemacht haben, wird in Anhang F anhand eines Mind Maps veranschaulicht.

Der allgemeine Eindruck der Piloten für das System war durchwegs positiv. Alle waren der Meinung, dass die grundsätzliche Idee praxistauglich war. Mehrere bemerkten die Einfachheit des Systems und dem daraus folgenden hohen Maß an Intuitivität: „sehr simpel“, „geniale Idee“, „idiotensicher“. Andere waren offensichtlich von der Übergabe eines Teils ihrer Entscheidungsfreiheit an ein solches System nicht begeistert: „Ich werde sowieso so schnell oder langsam rollen wie ich es für richtig halte“, „Ich hab’s gemacht, aber schön fand ich’s nicht“. Viele empfanden die Verringerung der Geschwindigkeit durch das System als eine erhöhte Anstrengung im Vergleich zum Baseline-System. Jedoch waren alle von der Machbarkeit des Systems überzeugt.

Viele Piloten identifizierten eine zu geringe Anzahl an angeschalteten Lampen als problematisch. Zum einen war die Wegführung mit einer zu kurzen Kette an Lichter sehr schwer vorherzusehen. Zum anderen schien eine kurze Anzahl an Lampen einen großen Einfluss auf die gefühlte notwendige Konzentration für die Aufgabe zu haben. Nur in diesem Zusammenhang wurde eine echte Gefahr einer Aufmerksamkeitseinengung (s. Kapitel 0) erkannt, da die Beobachtung der Lampen dann zu viel Aufmerksamkeit binden könnte. Ein Pilot erwähnte einen erhöhten Stresslevel, wenn die Anzahl der Lampen zu gering wurde.

Gezielt wurde während des Debriefings nach der Einschätzung der Piloten zu einer möglichen Aufmerksamkeitseinengung gefragt. Einige erkannten eine mögliche Gefahr in Zusammenhang mit einer zu geringen Anzahl an angeschalteten Lampen. Mit einer ausreichenden Anzahl an Lampen (5 bis 10) jedoch würde man die Information „unbewusst“ verarbeiten können. Andere waren der Meinung, dass eine Gefahr bei der ersten Benutzung des Systems vorhanden sein könnte: "könnte passieren, dass man abgelenkt ist". Diese Gefahr würde aber mit zunehmender Vertrautheit abnehmen. Mehrere Piloten waren der Meinung,

dass eine Gefahr nicht vorhanden war aufgrund des Vermittlungsorts der Information: „man guckt sowieso nach der Taxilinie“. Einige waren sogar der Meinung, dass das System ermöglichte weniger auf die Markierungen zu achten und somit Aufmerksamkeitskapazitäten frei hielte.

Dieser Faktor wurde jedoch von manchen Piloten als mögliche Gefahr für das Situationsbewusstsein erkannt, insbesondere für Piloten, die den Flughafen sehr gut kannten: „Wo rollte ich jetzt überhaupt lang?“ fragte ein Pilot am Ende eines durchaus erfolgreich gerollten Versuchs.

Alle Piloten empfanden die gewählte Anweisung „[Airlinebezeichnung]4TU Taxi to Runway [Runwaybezeichnung], follow the greens“ – dieselbe Anweisung wie in London bei der Verwendung der Rollwegbefeuerungselementen zur reinen räumlichen Führung (s. Kapitel 4.3.3) – als ausreichend. Ein Pilot erwähnte jedoch eine mögliche Ergänzung mit „expect slow bzw. speedy taxi“ sowie eine Angabe zum erwarteten Geschwindigkeitsbereich.

Eine Angabe zum generellen Geschwindigkeitsbereich des Systems wurde von mehreren Piloten als Teil des „Preflight Information Bulletins“ (PIB) für den Flughafen, der das System einsetzt, gewünscht. Darin sollte das System genau beschrieben werden, sowie alle Informationen, die das System mit einbezieht, aufgelistet werden. Die Piloten hatten eine genaue Vorstellung aller Parameter, die das System berücksichtigen sollte. Diese Parameter werden in Kapitel 5.6.3 dargestellt.

Die Auflistung der einbezogenen Daten war für die Piloten aus zwei Gründen wichtig. Zum einen waren die Probanden oft während der Versuche irritiert, weil sie nicht erkennen konnten wieso das System eine geringere Geschwindigkeit forderte. Zwar waren alle Geschwindigkeitsänderungen so eingeplant, dass sie mit einer Kreuzung eines Fremdverkehrs einhergingen, jedoch war der gewählte, sehr konservative Sicherheitsbereich um die Luftfahrzeuge wahrscheinlich so groß (über 400 Meter, s. Kapitel 4.3.1), dass die Kausalität der Bremsvorgänge von den Probanden nicht mehr zu erkennen war. Somit wollten die Piloten unbedingt wissen aus welchen möglichen Gründen das System seine Vorgaben kalkulierte (Fremdverkehr, Slots, ...). Zum anderen wollten die Probanden wissen, wie weit sie dem System vertrauen konnten. Die Piloten betrachteten eine Vielzahl von Parametern, um deren eigene Geschwindigkeit auf dem Rollfeld zu entscheiden, und somit wäre die Betrachtung der gleichen Parameter durch das System notwendig, um deren Vertrauen für die Entscheidungen des Systems zu gewinnen.

## 5.5. Hypothesenprüfung

In diesem Kapitel werden die zuvor dargestellten Hypothesen systematisch anhand der erzielten Ergebnisse geprüft. Hierzu werden diese Ergebnisse nach den in Kapitel 4.1.2 definierten Dimensionen und Richtwerten untersucht. Anschließend werden die in Verlauf der Versuche und insbesondere des Debriefings gewonnenen weiteren Erkenntnisse dargestellt.

### 5.5.1. Einhaltung der Solltrajektorie

**H1:** Die zeitliche und räumliche Einhaltung der Solltrajektorie ist durch die dynamische Länge der Befeuerung gewährleistet.

Die räumliche Einhaltung der Solltrajektorie wurde mit einer Erfolgsquote von 99,6% erzielt (s. Kapitel 5.2.2). Der Grund für den einzigen Ausreißer liegt in einer prototypbedingten Einschränkung des Systems: die fehlende dynamische Anpassung der Solltrajektorie (s. Kapitel 4.2.5). Somit ist die räumliche Führung der Piloten mit dem System validiert.

Die beschriebenen Ergebnisse in Kapitel 5.2.2 zeigen eindeutig, dass die Probanden anhand der Systeme A1 (informativer Ansatz) und A2 (kooperativer Ansatz) zeitlich entlang der Solltrajektorie geführt wurden. Zum einen ist hierfür der Beleg die hohe statistische Relevanz der Baseline Versuche gegenüber der Versuche mit zeitlichen Vorgaben. Zum anderen sind es die erzielten Abweichungen zwischen der Ist- und der Sollposition, die in einem Korridor zwischen +200 (Q1) und -50 (Q3) Metern für 50% der Messungen liegen. Auch die extremen Werte bleiben für 97% der Versuche innerhalb +400 (Maximum) und -200 (Minimum) Meter (s. Kapitel 5.6.1). Somit ist die Hypothese H1, die zeitliche Führung der Piloten anhand der untersuchten Systeme A1 (informativer Ansatz) und A2 (kooperativer Ansatz) validiert.

### 5.5.2. Sicherheitsfaktoren

Sowohl das Situationsbewusstsein als auch die Beanspruchung der Piloten während dieser kritischen Flugphase sollten sich sowohl anhand des informativen Systems (A1) als auch anhand des kooperativen Systems (A2) nicht so stark verändern, dass eine Gefährdung entstehen könnte.

**H2.1:** Das Situationsbewusstsein der Piloten bleibt durch den Einsatz des jeweiligen Systems im ähnlichen Wertebereich wie bei der heutigen Rollaufgabe.

Die Ergebnisse des gemessenen Situationsbewusstseins der Probanden anhand der SART-Skala, beschrieben in Kapitel 5.3.4, zeigen, dass die Zusatzaufgabe nur einen sehr geringen Einfluss auf das empfundene Situationsbewusstsein hatte. Das Situationsbewusstsein mit den Systemen mit zeitlichen Vorgaben war im Schnitt nur 5% schlechter bewertet als das Situationsbewusstsein mit dem Baseline-System mit einer Verschiebung der Werte um 0,5 von 10 möglichen Punkten (s. Abbildung 109). Die gemessene erforderte Aufmerksamkeit war entsprechend der in Kapitel 0. geschilderten Erwartungen etwas höher mit der zeitlichen Führung als mit dem Baseline-System.

Bei den Versuchen nach dem Briefing empfanden die Piloten erwartungsgemäß ein besseres Verständnis für das System (s. Abbildung 113).

Insgesamt bleibt das von den Probanden empfundene Situationsbewusstsein mit dem informativen System und mit dem kooperativen System ähnlich hoch wie mit dem Baseline-System. Somit ist die Hypothese H2.1, das angemessene Situationsbewusstsein mit dem System validiert.

**H2.2:** Die Beanspruchung der Piloten bleibt durch den Einsatz des jeweiligen Systems im ähnlichen Wertebereich wie bei der heutigen Rollaufgabe.

Die Ergebnisse der gemessenen Beanspruchung der Probanden anhand der RTLX-Skala, beschrieben in Kapitel 5.3.3, zeigen eine etwas höhere Beanspruchung für die Systeme mit zeitlicher Führung als mit dem Baseline-System. Das Vorwissen hatte jedoch einen positiven Einfluss auf die empfundene geistige Anforderung.

Insgesamt bleibt die von den Probanden empfundene Beanspruchung mit dem informativen System und mit dem kooperativen System ähnlich hoch wie mit dem Baseline-System. Somit ist die Hypothese H2.2, die angemessene Beanspruchung mit dem System validiert.

### 5.5.3. Gebrauchstauglichkeit

**H3:** Die Gebrauchstauglichkeit der Befeuerungselemente zur Rollführung ist mit dem Einsatz einer dynamischen Länge gewährleistet.

Zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit des Systems wurden zwei Skalen verwendet: die „Modified Cooper Harper Rating Scale“ (MCHS) Skala zur Analyse der Angemessenheit des Systems sowie die „System Usability Scale“ (SUS) zur Analyse der Benutzbarkeit. Der Vergleich zwischen den Versuchen vor und nach dem Briefing sollte ebenfalls zur Einschätzung der Gebrauchstauglichkeit beitragen.

Das System wurde grundsätzlich als angemessen bewertet mit 75% der MCHS Werte unter 4 von 10 möglichen Punkten (s. Kapitel 5.3.1) – je niedriger der Wert desto angemessener das System. Es gab zwischen dem Baseline-System und den Systemen mit zeitlicher Führung keine statistisch relevanten Unterschiede. Durch das Briefing hingegen verbesserte sich die empfundene Angemessenheit des Systems um rund 10% (s. Abbildung 96).

Die Ergebnisse der gemessenen Benutzbarkeit des Systems anhand der SUS-Skala, beschrieben in Kapitel 5.3.2, zeigen eine etwas höher empfundene Benutzbarkeit für das Baseline-System als für die komplexeren Systeme A1 und A2. Insgesamt sind jedoch 75% aller Werte über 80 von 100 möglichen Punkten und somit ist eine hohe Benutzbarkeit der informativen und kooperativen Systeme validiert.

Die Probanden wurden alle auch während der Versuche vor dem Briefing erfolgreich zeitlich entlang der 4D-Solltrajektorie geführt. Das Vorwissen hatte statistisch nur einen Einfluss auf den Mittelwert der Abweichung bei den Versuchen mit dem kooperativen System. Hierbei zeigen die Ergebnisse nach dem Briefing eine etwas bessere Einhaltung der 4D-Solltrajektorie mit einer Verringerung der Mittelwert der Abweichung zur Solltrajektorie von nur etwa 10 Meter (s. Abbildung 91). Dies entspricht die Forderung aus Kapitel 0 und somit ist die Intuitivität des Systems validiert.

Mit einem hohen Maß an empfundener Angemessenheit des Systems, einer hohen Benutzbarkeit, sowie guter Intuitivität wurde Hypothese H3: die Gebrauchstauglichkeit beider Systeme mit zeitlicher Führung – informatives System (A1) und kooperatives System (A2) – validiert.

#### 5.5.4. Zentrale Hypothese

**H0:** Die Piloten sind anhand dieses Systems in der Lage ein ausreichend genaues Rollen entlang einer vorgegebenen 4D-Solltrajektorie zu absolvieren, um alle Möglichkeiten einer Rollfluss-Optimierung auszuschöpfen.

Die Probanden wurden anhand des informativen und des kooperativen Systems erfolgreich entlang einer vorgegebenen 4D-Solltrajektorie geführt (Hypothese H1). Die Beanspruchung der Aufgabe blieb hierbei ähnlich hoch wie bei den heutigen Rollaufgaben (Hypothese H2.2) und das empfundene Situationsbewusstsein ebenfalls (Hypothese H2.1). Die Gebrauchstauglichkeit beider Systeme wurde von den Piloten hoch bewertet (Hypothese H3). Somit ist die zentrale Hypothese H0 validiert.

## 5.6. Weitere Erkenntnisse

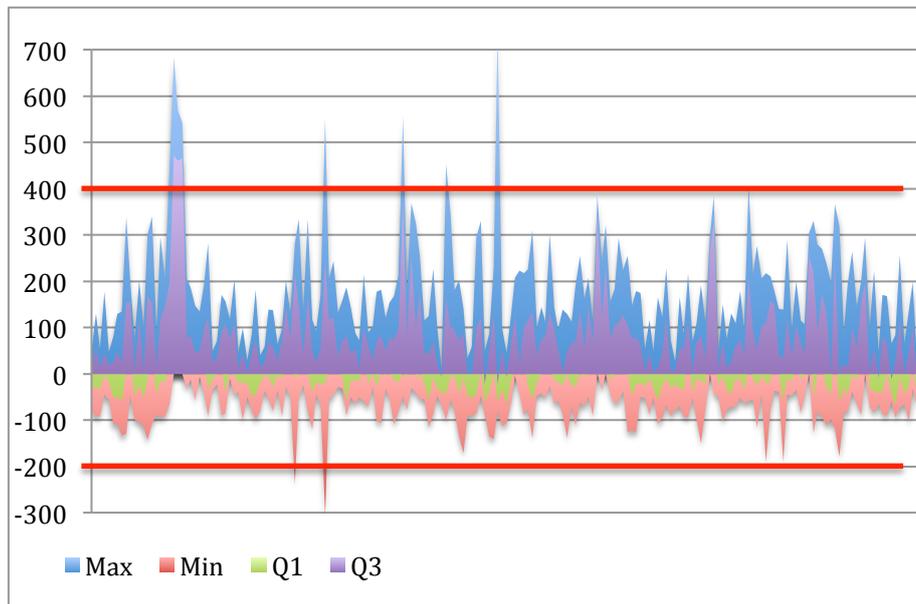
Die Ergebnisse zur Einhaltung der Solltrajektorie sind ein guter Anhaltspunkt, um einen realistischen Sicherheitsbereich um die Flugzeuge für die Berechnung der Solltrajektorie zu determinieren.

Während der Gespräche mit den Piloten im Laufe der Versuche, sowie während des Debriefings, sind mehrere weitere interessante Aspekte für die weitere Entwicklung von

Rolloptimierungssystemen identifiziert worden. Diese Erkenntnisse werden in diesem Kapitel beschrieben und diskutiert.

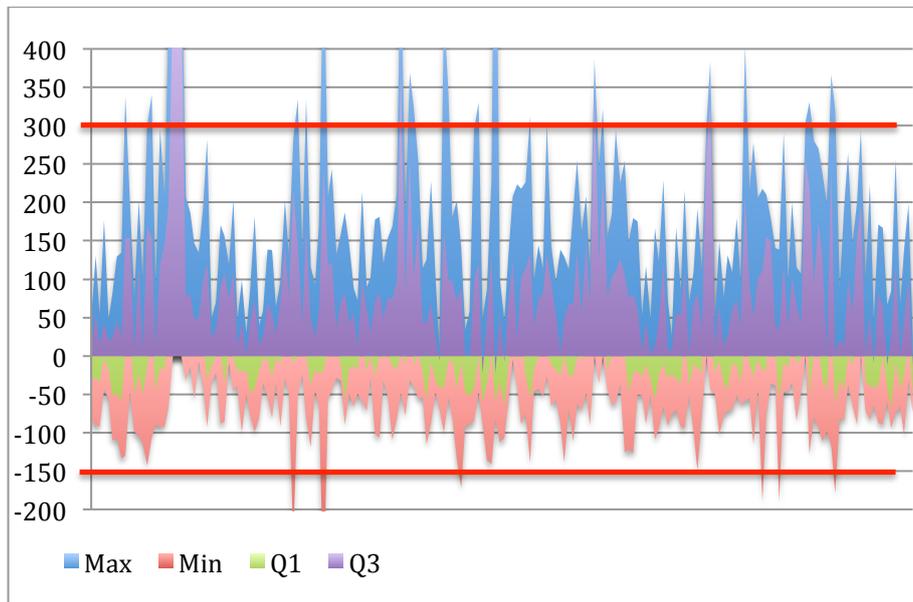
### 5.6.1. Sicherheitsbereich

Das vorausgesetzte System zur Berechnung der 4D-Solltrajektorie für alle rollenden Flugzeuge an einem gegebenen Flughafen muss diese Trajektorien so planen, dass keine Kollisionsgefahr durch das System entsteht. Deshalb sollte das System neue Trajektorien berechnen, sobald die Piloten sich außerhalb gewisser Schranken bewegen. Der hiermit definierte Sicherheitsbereich wird hier als die Enveloppe der jeweiligen Flugzeuge bezeichnet.



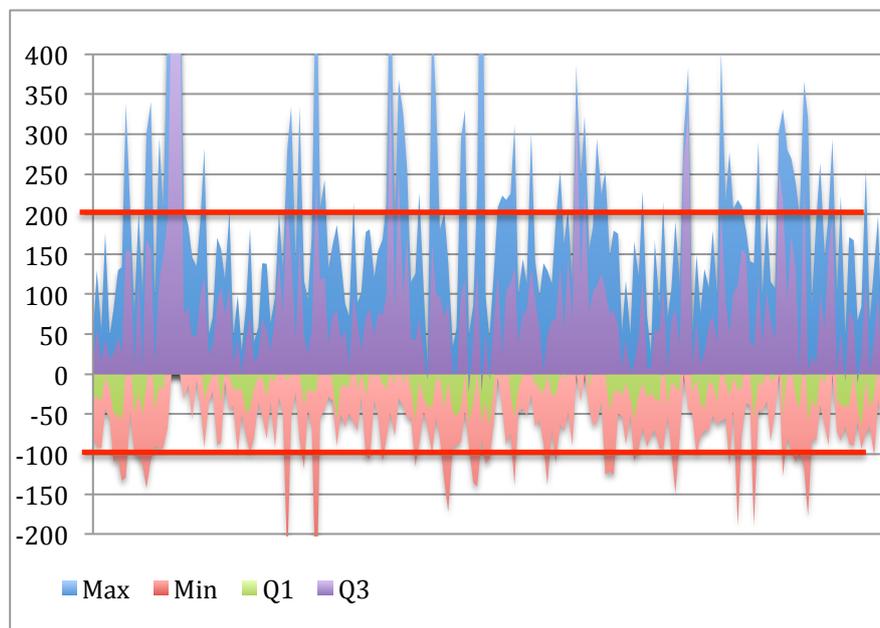
**Abbildung 116: Konservative Enveloppe E1: +400/-200 Meter**

Anhand aller Ergebnisse zur Einhaltung der 4D-Solltrajektorie mit den Systemen A1, A2 und A2\* kann der Umfang der notwendigen Enveloppe bestimmt werden. Es ist zunächst deutlich zu erkennen, dass die Enveloppe asymmetrisch nach hinten ausgerichtet sein sollte. In einem ersten konservativen Ansatz wäre eine Enveloppe von +400 Meter und -200 Meter zu wählen. Hiermit wäre eine Neuberechnung der Trajektorien in nur sechs der gesamten Versuche notwendig gewesen (etwa 3%), wie in Abbildung 116 abzulesen. Der Gesamtumfang dieser Enveloppe E1 ist jedoch mit 600 Meter relativ groß.



**Abbildung 117: Enveloppe E2: +300/-150 Meter**

Einen weiteren Ansatz, dargestellt in Abbildung 117, ermöglicht eine Enveloppe mit einem Gesamtumfang von 450 Metern. Hierbei wäre eine Neuberechnung der Solltrajektorie in 20 von insgesamt 192 Versuchen notwendig gewesen (etwa 10%).



**Abbildung 118: Enveloppe E3: +200/-100 Meter**

Einen weiteren Ansatz, dargestellt in Abbildung 118, ermöglicht eine Enveloppe mit einem Gesamtumfang von nur 300 Metern. Hierbei wäre eine Neuberechnung der Solltrajektorie in 38 von insgesamt 192 Versuchen notwendig gewesen (etwa 20%).

Weitere Untersuchungen mit den vorgeschlagenen Enveloppen zur dynamischen Neuberechnung der Solltrajektorie sowie zu entsprechenden Enveloppen zur kollisionsfreien Planung wären hier erforderlich, um den genauen Umfang der notwendigen Enveloppe zu ermitteln.

### 5.6.2. Notwendige Vorabinformationen

Die durchwegs erfolgreiche Einhaltung der 4D-Solltrajektorie bei den Versuchen vor dem Briefing hat gezeigt, dass auch ohne Vorabinformationen über das System die Piloten räumlich und zeitlich geführt wurden. Dieses Ergebnis validiert vor allem die Intuitivität des Systems. Jedoch sollte dieses sicherlich nicht ohne publizierte Vorabinformationen für die Piloten eingeführt werden. Aus diesem Grund wurden die Probanden gezielt nach deren Einschätzung zu den notwendigen Vorabinformationen zum Einsatz dieses 4D-Rollführungssystems befragt.

Der Einsatz der Rollwegbefeuerungselemente zur räumlichen und zeitlichen Führung soll Teil der „Terminal Procedure Publication“ sein. Die Piloten wünschen sich hierzu Eingaben zum möglichen Geschwindigkeitsbereich des Systems, sowie die Auflistung der einbezogenen Parameter zur Berechnung der Route (s. Kapitel 5.6.3). Im Fall einer einfachen Steuerung, wie mit dem informativen System A1, erachteten die Probanden eine Erläuterung der Logik des Systems für sinnvoll: „die letzte angeschaltete Lampe zeigt die Sollposition des Flugzeugs plus 100 Meter“. Für komplexere, kooperative Systeme mit Regler hingegen würde eine Erklärung nicht zu einem besseren Verständnis des Systems führen.

Die gewählte Lotsenanweisung während der Versuche war absichtlich so einfach und knapp gehalten wie die heute verwendete Anweisung am Londoner Flughafen bei der Verwendung der Rollwegbefeuerungselemente zur räumlichen Führung (s. Kapitel 4.3.3): „*[Airlinebezeichnung]4TU Taxi to Runway [Runwaybezeichnung], follow the greens*“. Dies bezeichneten alle Probanden als ausreichend. Ein einziger Pilot wünschte sich eine weitere Information über den Geschwindigkeitsbereich der Solltrajektorie beziehungsweise einen Trend hierzu: „expect slow/speedy taxi“ (s. Kapitel 5.4). Jedoch würde eine solche Angabe die Möglichkeit die Solltrajektorie dynamisch anzupassen, beeinträchtigen und wäre somit kontraproduktiv zur Optimierung des gesamten Rollprozesses.

### 5.6.3. Solltrajektorie

Darüberhinaus haben die Piloten wertvolle Informationen gegeben, die zur Konzeption eines geeigneten 4D-Rolloptimierungssystem unabdingbar sind. Ein solches System ist Voraussetzung für den Einsatz des vorgestellten Konzepts und somit hängt die Akzeptanz der Verwendung von Rollwegbefeuerungselementen zur 4D-Rollführung stark mit der Akzeptanz der berechneten 4D-Solltrajektorien zusammen.

Dies wurde insbesondere deutlich durch die häufige Kritik der Piloten an der Nichtnachvollziehbarkeit mancher, durch das System geforderten, Geschwindigkeitsänderungen (s. Kapitel 5.4). Das prototypbedingte Fehlen einer dynamischen Anpassung der Solltrajektorie (s. Kapitel 4.2.6), sowie die stark konservativ gewählte Enveloppe von 400 Metern um jedes Flugzeug (s. Kapitel 4.3.1), waren für die Versuche die Ursache für diese Kritik. Jedoch ist die Entwicklung eines geeigneten Systems zur Berechnung der optimalen 4D-Solltrajektorien sehr komplex und die Eingaben der Piloten sicherlich hilfreich für weitere Forschungen in diese Richtung.

In Tabelle 27 werden alle von den Probanden identifizierten, notwendigen zusätzlichen Parameter zur Berechnung der 4D-Solltrajektorien zusammengefasst. Der Aktualisierungszyklus der jeweiligen Daten ist ebenfalls angegeben. Insbesondere die fett hervorgehobenen Parameter könnten ein Problem darstellen, da diese dem Bordcomputer nicht bekannt sind.

**Tabelle 27: Zusammenfassung zusätzliche Parameter zur Berechnung der 4D-Solltrajektorie**

<i>Quelle</i>	<i>Aktualisierung</i>	<i>Parameter</i>
Flugzeugtyp	Nie (konstant)	Flugzeuggröße Bremsentyp
Digital Terminal Procedure Publication (d-TPP)	Alle 28 Tage	Hot Spots Beschaffenheit der Wege <b>Zustand der Wege</b> Gelände
Flugzeugstatus	Während dem Rollvorgang	<b>Cabin Ready for Taxi</b> Bremstemperatur
Wetterbedingungen	Während dem Rollvorgang	Temperatur Wind

### Flugbegleitpersonal

Während der Rollphase am Boden dürfen die Passagiere nicht aufstehen. Dies gilt jedoch nicht für das Flugbegleitpersonal, da die Taxi-Out und Taxi-In Flugphasen nicht als „Sterile Flight Deck Procedures“ im Regelwerk gelten [EASA12]. Es wird jedoch empfohlen, dass das Flugbegleitpersonal während des gesamten Rollprozesses grundsätzlich sitzen sollte und nur dann aufstehen darf, wenn sicherheitsrelevante Aufgaben zu erledigen sind, wie in [GAIN01] beschrieben. In der Praxis jedoch scheint diese Empfehlung selten befolgt zu werden, sodass die Piloten die Grundgeschwindigkeit während des Rollvorgangs niedrig halten sollen, um das Flugbegleitpersonal nicht zu gefährden. Aus dem gleichen Grund werden starke und abrupte Geschwindigkeitsänderungen vermieden.

In der Regel informiert das Flugbegleitpersonal die Cockpitbesatzung, wenn sie alle anfallenden Aufgaben vor dem Flug erledigt haben und alle tatsächlich sitzen können. Diese Information wird jedoch nicht vom Bordcomputer erfasst, was eine Einbeziehung in die Berechnung der Solltrajektorie erschwert. Somit müssten die Solltrajektorien immer so ausgelegt sein, dass keine Gefährdung etwaig stehenden Flugbegleitpersonals entstehen kann: eine möglichst niedrige und gleichmäßige Geschwindigkeit entlang der gesamten Taxiroute.

Die oben genannten Empfehlungen könnten jedoch bald in die offiziellen „Standard Operation Procedures“ (SOP, dt. Standardvorgehensweise) einfließen, wie das Veränderungsvorschlagsdokument [EASA12] der European Aviation Safety Agency (EASA) ankündigt.

### Geländeprofil und Oberflächenbeschaffenheit

Das Geländeprofil, sowie Oberflächenbeschaffenheit und -zustand der Rollwege hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die erreichten Rollgeschwindigkeiten auf dem Vorfeld. Somit sollte ein System zur Berechnung der 4D-Solltrajektorie diese Parameter mit einbeziehen, um beispielsweise zu hohe Sollgeschwindigkeiten auf einem steigenden Rollweg oder auf einem Rollweg in schlechtem Zustand zu vermeiden. Dies würde insbesondere die Akzeptanz des Systems durch die Piloten stark gefährden.

Die hierzu notwendigen Informationen sind nur teilweise auf den Flughafen Charts erhältlich, z.B. wird der Zustand der Rollwege zurzeit nicht erfasst.

### **Wetterbedingungen**

Wetterbedingte Änderungen der Rollwegbeschaffenheit sollten ebenfalls bekannt sein. Nasse oder vereiste Rollwege verlangen niedrigere Rollgeschwindigkeiten. Diese Forderung wird den Piloten auch von Flugzeugherstellern nahe gebracht, wie in [OAA10] aus dem Boeing Magazine AERO: „Taxi at a reduced speed. Taxiing on slippery taxiways or runways at excessive speed or with strong crosswinds may cause the airplane to skid“. Die Windverhältnisse wären demnach ebenfalls zu beachten.

Bei niedrigen Temperaturen werden die Triebwerke automatisch enteist. Eine Erhöhung des Schubs während eines Rollvorgangs mit Triebwerkenteisung um 2 bis 3% für einen A320 ist hierbei einzuplanen. Diese Eingabe eines Piloten konnte jedoch mit keiner Literaturquelle bestätigt werden. Der genaue Einfluss der Triebwerksenteisung auf die Leistung des Flugzeugs beim Rollen müsste untersucht werden, um diesen Faktor in der Berechnungslogik der 4D-Solltrajektorien einzubinden.

### **Flugzeuggröße**

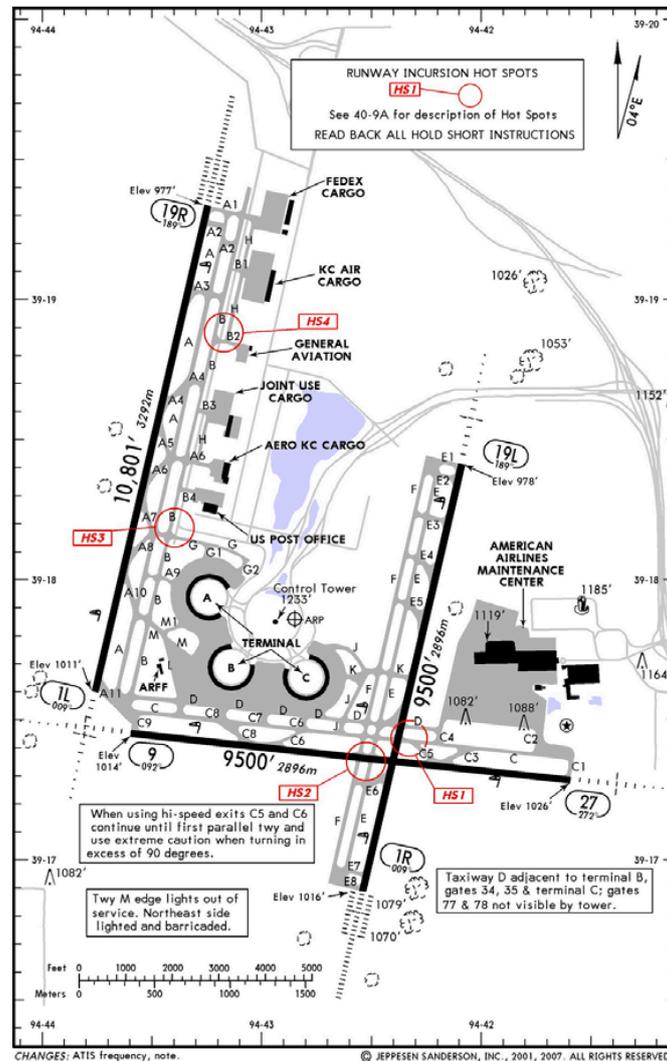
Die sichere Höchstgeschwindigkeit eines Flugzeugs beim Rollen scheint stark von der Flugzeuggröße abhängig zu sein. Insbesondere Piloten, die gewöhnlich mit sehr großen Maschinen flogen (beispielsweise den A380), bemerkten wie wichtig dieser Parameter für die Geschwindigkeitsentscheidung ist. Vor allem bezogen auf den Kurvenradius der Solltrajektorie, sollte auf diesen Faktor geachtet werden. Dieses Empfinden der Probanden wird gestärkt durch die Ergebnisse der Studie [GM03], die ebenfalls eine starke Korrelation zwischen der gerollten Geschwindigkeit und der Flugzeuggröße nachweist.

Eine Vernachlässigung dieses Parameters durch das System könnte in Kurven mit niedrigem Radius potentiell gefährliche Folgen haben und würde sicherlich die Akzeptanz des Gesamtsystems gefährden.

### **Hot Spots**

Ein weiteres Element, das Piloten in deren Geschwindigkeitsentscheidung im Bodenverkehr mit einbeziehen, ist der sogenannte Hot Spot. Die ICAO definiert einen Hot Spot im Bodenverkehr als: „a location on an aerodrome movement area with a history or potential risk of collision or runway incursion, and where heightened attention by pilots/drivers is necessary“ [ICAO07b]. Diese Hot Spots sollen auch seit 2007 in den Flughafenkarten in den Vereinigten Staaten, wie in [ICAO07c] empfohlen, gekennzeichnet sein, um Piloten auf die vorhandene Gefahr aufmerksam zu machen. Dies ist beispielhaft für den Kansas City International Airport in Abbildung 119 zu sehen.

Die Piloten werden ausdrücklich darauf hingewiesen, diese kritischen Orte auf den Flughäfen in deren Briefing vor jedem Rollvorgang mit einzubeziehen [ICAO07c]. Somit sollte ebenfalls diese Information für die Berechnung der 4D-Solltrajektorien eingeplant werden, um die geforderten Geschwindigkeiten in diesen kritischen Orten niedrig zu halten. Dies scheint insbesondere wichtig zu sein für Hot Spots mit dichtem Bodenfahrzeugverkehr, solange diese nicht überwacht werden.



**Abbildung 119: Hot Spots (in rot) auf einer Flughafenkarte des Kansas City International Airport**

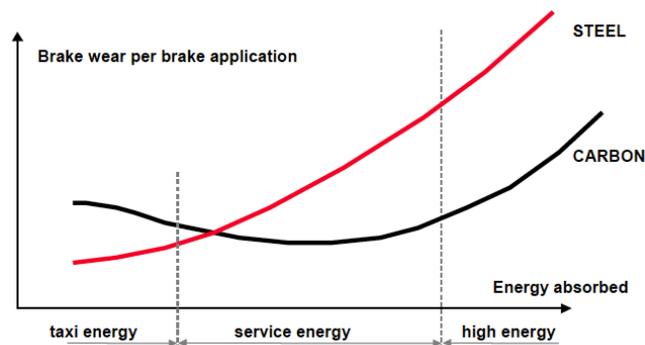
## Bremsen

Das Bremsverhalten der Piloten während der Taxi-In und Taxi-Out Flugphasen hat einen Einfluss, sowohl auf die Temperatur der Bremsen, als auch auf den generellen Verschleiß der Bremsen. Eine zu hohe Temperatur der Bremsen führt zu einer Verspätung des Abfluges, bis die, für jeden Flugzeugtyp vorgeschriebene, maximale Bremstemperatur wieder unterschritten ist [DiS01]. Eine erhöhte Bremstemperatur und ein starker Verschleiß der Bremsen sind beide Konsequenzen von zu häufigem bzw. zu hartem Bremsen während des Rollvorgangs. Diese wären für ein System zur Optimierung der Bodenprozesse somit kontraproduktiv.

Insbesondere ein konstantes Bremsen „riding the brakes“ könnte die Temperatur der Bremsen so stark erhöhen, dass eine entsprechende Warnung im Cockpits ECAM System den Start der Maschine verhindern würde [TBC08]. Dieses könnte beispielsweise durch eine falsch geplante 4D-Solltrajektorie mit einer zu niedrig angesetzten Sollgeschwindigkeit auf einem sinkenden Rollweg verursacht werden (s. Kapitel 0).

Der Bremsentyp ist jedoch entscheidend für das richtige Bremsverhalten zur Reduzierung von Verschleiß [AMP09]. Der Verschleiß von Stahlbremsen ist direkt proportional zur aufgenommenen kinetischen Energie (s. Abbildung 120). Somit sind bei Stahlbremsen mehrere leichte und kurze Bremsvorgänge einem langen Bremsvorgang vorzuziehen. Hingegen ist der Verschleiß von Karbonbremsen stark von der Anzahl der Bremsvorgänge

abhängig [DiS01]. Somit sollte mit Karbonbremsen bevorzugt lang und stark gebremst werden.



**Abbildung 120: Bremsenverschleiß nach aufgenommene Energie [DiS01]**

Der eingesetzte Bremsentyp ist demnach mit entscheidend für das richtige Bremsverhalten am Boden und somit auch die richtige 4D-Solltrajektorie.

### 5.6.4. Visuelle Anweisungen

Während der Versuche wurden keine Anhalte-Anweisungen an die Piloten erteilt. Somit waren einige Probanden unsicher, ob eine solche Anweisung mit dem vorgestellten System vereinbar sein könnte. Sie dachten, dass nur ein Fehlen von angeschalteten Lampen nicht ausreichend wäre, um eine Anhalte-Anweisung zu erteilen.

In der Tat sollen Anhalte-Anweisungen anhand der angeschalteten roten „Taxiway Holding Position“ Lampen erteilt werden (s. Abbildung 121). Dies war bereits ein Ergebnis der Simulator Voruntersuchungen zum WFF Projekt: sowohl die rote Farbe der Lampen als auch die querversetzte Lage zur Rollrichtung waren von den damaligen Probanden bevorzugt worden [BUO10]. Diese Bemerkungen der Piloten stärken somit die schon bekannten Ergebnisse.



**Abbildung 121: Anhalte-Anweisung anhand von Rollwegbefeuerungselementen [Atr12]**

Das Fehlen von angeschalteten Lampen vor dem Ownship wurde von einigen Piloten während der Versuche beobachtet. Sie überrollten die Linie von angeschalteten grünen Rollwegbefeuerungselementen während Versuche mit der reinen Steuerung. Aufgrund der prototypbedingten fehlenden Anpassung der 4D-Solltrajektorie hatten sie anschließend keine einzige angeschaltete Lampe vor sich. Dieses schwache visuelle Signal, das von der übliche Umgebung nicht zu unterscheiden war, haben sie übersehen und sind weiter mit der gleichen

Geschwindigkeit gerollt. Dies bestätigt weiter, dass ein weiteres visuelles Signal als zusätzlich zum Fehlen von angeschalteten Lampen unabdingbar ist, um eine Anhaltenweisung an den Piloten zu übermitteln.



**Abbildung 122: Mögliche Bremsvorgang-Anweisung im GECO Simulator der DLR [Böt10]**

Zwar wäre dieser Zustand mit einer dynamischen Anpassung und Neuberechnung der Solltrajektorie nicht möglich, jedoch zeigen diese Versuche auch, dass die Länge der angeschalteten Elemente allein eventuell nicht immer ausreicht, um einen Bremsvorgang einzuleiten. Hierzu haben zwei Piloten den Vorschlag gemacht, zweifarbige Befuerungselemente zu verwenden, um eine Verlangsamung der Sollgeschwindigkeit anhand einiger roter Lampen am Ende der Kette zu kennzeichnen (s. Abbildung 122). Weitere Untersuchungen mit einem System mit dynamischer Anpassung der Solltrajektorie, wenn das Flugzeug sich außerhalb der in Kapitel 5.6.1 vorgestellten Enveloppe bewegt, wären hier erforderlich, um die Notwendigkeit eines mehrfarbigen Systems zu analysieren.



## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit sollte ein System zur Übermittlung von räumlichen und zeitlichen Trajektoriendaten an Cockpitbesatzungen während der Rollphase eines Fluges konzipiert und analysiert werden. Primäres Ziel war hierbei die Einhaltung der vorgegebenen 4D-Trajektorie durch die Piloten, ohne die Sicherheit des Flugzeugs und des Flughafens zu gefährden.

Hierzu wurden zunächst der Stand der Forschung und Entwicklung hinsichtlich einer Umsetzung von 4D-Trajektorien während der Rollphase untersucht, sowie die mögliche Gefährdung durch den Einsatz einer Vollautomatisierung analysiert. Der heutige Einsatz von Rollwegbefeuerungselementen zur räumlichen Führung an mehreren Großflughäfen wurde vorgestellt.

Anhand dieser Erkenntnisse wurden die Anforderungen an ein 4D-Rollführungssystem zusammengefasst und die resultierenden Hypothesen zur Validierung solch eines Systems formuliert. Unter Berücksichtigung technischer Annahmen und geometrischer Einschränkungen wurde schließlich ein 4D-Rollführungssystem mittels einer dynamischen Anschaltung der vorhandenen Rollwegbefeuerungselemente der Taxilinie vor dem Flugzeug entlang der Solltrajektorie konzipiert. Dieses System wurde in zwei Ausführungen entworfen: einem informativen Ansatz mit einer reinen Steuerung der Piloten entlang der Trajektorie und einem kooperativen Ansatz bei dem die Piloten in ihren Entscheidungen mithilfe eines Reglers unterstützt werden.

Folglich wurden die notwendigen experimentellen Untersuchungen entworfen. Das 4D-Rollführungssystem wurde dann prototypisch für diese Untersuchungen entwickelt und der genaue Ablauf der Untersuchungen geplant.

Schließlich wurden die zweistufigen Untersuchungen mit Vorversuchen mit Copiloten, gefolgt von Hauptversuchen mit Kapitänen, durchgeführt. Die hiermit gewonnenen Daten wurden ausgewertet und hinsichtlich der zuvor formulierten Hypothesen untersucht.

Die vorgegebenen räumlichen und zeitlichen Trajektorien wurden durchwegs von den Piloten anhand beide Ausführungen des Systems – informativen Ansatz und kooperativen Ansatz – eingehalten. Die Abweichungen zur Sollposition an jedem gegebenen Zeitpunkt entlang der Rolltrajektorien blieben für alle Versuche zwischen +400 und -200 Metern. In 80% der Versuche gelang es den Piloten sogar, die Trajektorie mit Abweichungen zwischen +200 und -100 Metern einzuhalten. Die erreichten Abweichungen mit der reinen Steuerung des informativen Systems waren etwas besser als die mit der Regelung des kooperativen Systems. Hierbei scheint die Güte des Reglers eine entscheidende Rolle gespielt zu haben: die Werte mit Regler mit Prädiktion schnitten deutlich besser ab als die Werte mit Regler ohne Prädiktion, entsprechend der Vorschläge der Copiloten in den Vorversuchen. Jedoch bleiben die Werte mit diesem Regler etwas schlechter als mit der reinen Steuerung.

Der eingesetzte Regler wurde anhand des Rollverhaltens der Copiloten in den Vorversuchen erstellt. Somit ist eine mögliche Verbesserung der Ergebnisse mit der Verwendung eines Pilotenmodells aus dem Rollverhalten der Kapitäne während der Hauptversuche denkbar. Aus den Gesprächen mit den Kapitänen scheint jedoch eine einfache Steuerung, die als solche angekündigt und erklärt wird, das beste System zu sein. Wenn die Piloten wissen mit welchem Abstand sie zu den Lampen rollen sollen, könnten sie am besten auf die Anweisungen reagieren, so die Mehrheit der Probanden der Hauptversuche. Weitere Untersuchungen mit einem verbesserten Regler, sowie mit einer vorab erklärten Steuerung wären hier erforderlich.

Durch das konzipierte System, das bewusst die Risiken einer Vollautomatisierung durch den Einbezug des Piloten für die Ausführung der Rollaufgabe vermeidet, wird die Sicherheit des Flugzeugs und des Flughafens nicht gefährdet. Hinzu wurden die zwei Sicherheitsfaktoren – Situationsbewusstsein und Beanspruchung – gezielt während der Versuche untersucht. Das Situationsbewusstsein blieb im ähnlich hohen Bereich bei Einsatz beider Systeme wie während der Versuche ohne zeitliche Führung (Baseline-System). Ebenfalls war die Beanspruchung während der Rollversuche mit der zusätzlichen zeitlichen Aufgabe nur geringfügig höher als die Beanspruchung bei der üblichen Rollaufgabe. Somit ist eine Gefährdung der Sicherheit durch den Einsatz des Systems in beiden Ausführungen, informativ und kooperativ, auszuschließen.

Um die Akzeptanz der Piloten für den möglichen Einsatz eines solchen Systems zu erhöhen, ist eine Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit unabdingbar. Das System wurde durchwegs als geeignet für die Aufgabe eingeschätzt und die Benutzbarkeit positiv bewertet. Die erreichte Einhaltung der Trajektorie ohne Vorwissen durch den Probanden in den ersten Versuchen zeugt ebenfalls für eine hohe Intuitivität und somit Gebrauchstauglichkeit des Systems.

Alle Probanden befanden das konzipierte 4D-Rollführungssystem für prinzipiell einsetzbar. Zu einer tatsächlichen Umsetzung gaben die Kapitäne zahlreiche Hinweise zu Faktoren, die sie selber bei der heutigen Ausführung der Rollaufgabe beachten und somit auch in die hier angenommene Berechnung der 4D-Solltrajektorien einfließen sollten. Insbesondere sind hier der Zustand der Rollwege, sowie der Status des Boardingprozesses des Flugbegleitpersonals zu erwähnen, die im Bordcomputer und somit in einem möglichen Berechnungssystem für die 4D-Trajektorien heute nicht bekannt sind. Darüberhinaus geben die durchgeführten Versuche einen guten Anhaltspunkt für mögliche Werte einer geeigneten Enveloppe zur Neuberechnung der Trajektorien. Diese Erkenntnisse sollten in die weitere Forschung der 4D-Planungssysteme am Boden einfließen.

Weitere Untersuchungen zum Zusammenspiel zwischen dynamisch berechneten 4D-Trajektorien und dem hier eingeführten Führungssystem sind notwendig, insbesondere um die Akzeptanz der Piloten zu sichern. Hierbei sollten auch Neuberechnungen durch das System während der Versuche eingeplant werden, um auch nicht nominale Rollphasen zu untersuchen. Reaktionen der Piloten auf Ereignisse, die in das 4D-Berechnungssystem nicht einfließen, sollten ebenfalls untersucht werden, um eine mögliche induzierte Selbstgefälligkeit (eng.: complacency) durch das Befeuerungssystem auszuschließen.

## Literaturverzeichnis

- [ABY08] Atkins, S., Brinton, C. & Jung, Y. (2008). *Implication of Variability in Airport Surface Operations on 4-D Trajectory Planning*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Anchorage, AK, 14-19 Sep. 2008
- [ABR10] Atkin, J. A. D., Burke, E. K. & Ravizza, S. (2010). *The Airport Ground Movement Problem: Past and Current Research and Future Directions*. 4th International Conference on Research in Air Transportation. Budapest, June 01-04, 2010, pp. 131-138.
- [Air11a] Airbus. (2011). *A330 Airplane Characteristics for Airport Planning*. Revision Jan. 2011.
- [Air11b] Airbus. (2011). *The future by Airbus*. Report. June 2011.
- [AIS08] Aeronautical Information Services – Aeronautical Information Management Study Group (AIS-AIMSG). (2008). *First Meeting – Aerodrome Mapping Databases*. Montréal, 2008.
- [AMP09] Allen, T., Miller, T. & Preston, E. (2009). *Operational Advantages of Carbon Brakes*. Boeing AERO Magazine. Third Quarterly 2009.
- [ARE98] Albert, O., Roshani, F., Engels, K., Huth, C., Thurecht, F. & Schiefele, J. (1998). *Das Forschungscockpit der TU Darmstadt: Ein Werkzeug zur Untersuchung neuer Cockpitkonzepte*, 40. DGLR Anthropotechnische Konferenz, Stuttgart
- [AS07] Adler, N. & Smilowiz, K. (2007). *Hub-and-spoke Network Alliances and Mergers: Price-location Competition in the Airline Industry*, Transportation Research, Vol. 41(4), 394 – 409
- [ASRS05] Aviation Safety Reporting System (ASRS). (2005). *Automation Complacency*. Callback 307. April 2005.
- [ASY08] Atkins, S., Brinton, C. & Jung, Y. (2008). *Implication of Variability in Airport Surface Operations on 4-D Trajectory Planning*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Anchorage, AK, 14-19 Sep. 2008.
- [ATA98] Air Transport Association. (1998). *Potential Knowledge, Policy, or Training Gaps Regarding Operation of FMS-Generation Aircraft*: Second Report.
- [Atr11a] Atrics GmbH. (2011). *Arise User Manual 4.1*.
- [Atr11b] Atrics GmbH. (2011). *ATRiCS Tower and Cockpit Simulator*.
- [Atr12] Atrics GmbH. (2012). *Simulator Image Gallery*. Recovered on Nov. 28<sup>th</sup> 2012 online at: <<http://www.atrics.com/solutions/atc-simulation/gallery.html>>
- [Atr12b] Atrics GmbH. (2012). *R&D efforts show promising results for surface automation*. Recovered on Oct. 26<sup>th</sup> 2013 online at: <<http://www.atrics.com/news/news-singles/datum/2012/10/15/article/rd-efforts-show-promising-results-for-surface-automation-31.html>>
- [Bai87] Bainbridge, L. (1987). *Ironies of automation*. In New technology and human error (ed. J. Rasmussen, K. Duncan, & J. Leplat). New York: Wiley.

- [Bak99] Bak, P. M. (1999). *Selektive Aufmerksamkeit und kognitive Ressourcen: Untersuchungen zum Flanker-Effekt*. Dissertation Universität Trier, Juli 1999.
- [BB96] Boston, B. N. & Braun, C. C. (1996). Clutter and display conformality: Changes in cognitive capture. In *Proceedings 124th Human Factors and Ergonomics Society 40th annual meeting* (pp. 57–61). Santa Monica, CA: HFES.
- [BBH89] Byers, J. C., Bittner Jr., A. C. & Hill, S. G. (1989). Traditional and raw task load index (TLX) correlations: are paired comparisons necessary? In: Mita, A. (Ed.), *Advances in Industrial Ergonomics and Safety I*. Taylor and Francis, Philadelphia, PA, pp. 481-485.
- [BD06] Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler* (4. Auflage). Berlin: Springer.
- [BG09] Balakrishna, P. & Ganesan, R. (2009). Application of Reinforcement Learning Algorithms for Predicting Taxi-out Times, *Proceedings of the Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2009)*
- [BH07] Barff, A. & Hogge, P. (2007). *The SESAR Concept of Operations in Detail*. Presentation made at NLR, 08.10.2007.
- [Bil96] Billings, C. E. (1996). Human-centered aircraft automation: principles and guidelines. *Technical Memorandum No. 110381*. NASA Ames Research Centre, Moffett Field, CA
- [Blu10] Blum, M. (2010). *Modellbildung von Rollführungsprozessen in der Luftfahrt*, Bachelor Thesis am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik.
- [BMJ06] Biannic, J. M., Marcos, A., Jeanneau, M. & Roos, C. (2006). Nonlinear simplified LFT modelling of an aircraft on ground, *Proceedings of the 2006 IEEE Interaction Conference on Control Applications Munich Germany*, October 4-6, 2006
- [Boe84] Boehm, B. (1984). Verifying and validating software requirements and design specifications. *Proceedings IEEE Software, Vol. 1(1)*.
- [Böt08] Böttcher, S. (2008). *Betriebliche Beurteilung zur Einführung einer A-SMGCS Rollführungskomponente an einem internationalen Verkehrsflughafen*. Diplomarbeit vom 07.04.2008, Dresden 2008.
- [Böt10] Böttcher, S. (2010). *Teilprojekt 2: Rollverkehr: Management- und Optimierungssysteme (Roll:MOPS)*. Abschlussreview – Langen 24. März 2010.
- [BP03] Bumiller, G. & Pirschel, N. (2003). Airfield ground lighting automation system realised with power-line communication. *7<sup>th</sup> International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications (ISPLC2003)* Kyoto, March 2003
- [Bra07] Brandrodungswanderfeldhackbau (Eigenes Werk) [Public domain], via Wikimedia Commons. <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3A787-flight-deck.jpg>> Stand: 11.11.2014
- [Bro96] Brooke, J. (1996). SUS: a 'quick and dirty' usability scale. In: Jordan PW, Thomas B, Weerdmeester BA, McClelland IL (eds) *Usability evaluation in industry*. Taylor & Francis, London, S. 189–194

- 
- [BUO10] Böttcher, S., Urvoy, C., Oehme, A. & Drege, D. (2010). *Wettbewerbsfähiger Flughafen (WFF) Cluster 2, „Rollverkehr: Management und Optimierungssysteme (Roll:MOPS)“ – Feldtests*. Abschlussbericht zu den Feldtests. 2010.
- [CAAS05] Civil Aviation Authority Singapore. (2005). AIP SINGAPORE WSSS AD 2.9 *Surface Movement Guidance and Control System and Markings*. Taxiing Guidance System at Singapore Changi Airport.
- [CAF09] Cheng, V. H. L., Andre, A. D. & Foyle, D. C., (2009). Information Requirements for Pilots to Execute 4D-Trajectories on the Airport Surface, *9<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)*, 21 – 23 September 2009, Hilton Head, South Carolina
- [Che03] Cheng, V. H. L. (2003). Airport Surface Operation Collaborative Automation Concept. *Proceedings of the 2003 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Austin, TX, August 11–14
- [Che04] Cheng, V. H. L. (2004). Surface Operation Automation Research for Airport Tower and Flight Deck Automation. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*
- [Che07] Cheng, V. H. L. (2007). Research Progress on an Automation Concept for Surface Operation with Time-Based Trajectories. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*
- [CJV05] Carotenuto, S., Jakobi, J. & Verbeek, R. (2005). *State of the Art in A-SMGCS*. Document D1.1.1. Report on the European Airport Movement Management by A-SMGCS, Part 2 (EMMA2) Project
- [CN06] Crawford, J. & Neal, A. (2006). A Review of the Perceptual and Cognitive Issues Associated With the Use of Head-Up Displays in Commercial Aviation. *The International Journal of Aviation Psychology*, 16 (1), 1-19.
- [CODA11] Central Office for Delay Analysis (CODA), Eurocontrol. (2011). *Digest – Delays to Air Transport in Europe. Annual 2010*.
- [CR09] Clare, G. & Richards, A. (2009). Receding Horizon, Iterative Optimization of Taxiway Routing and Runway Scheduling. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 10 – 13 August 2009, Chicago, Illinois
- [CS09] Cheng, V. H. L. & Sweriduk, G. D. (2009). Trajectory Design for Aircraft Taxi Automation to Benefit Trajectory-Based Operations. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Asian Control Conference*, Hong Kong, China, August 27-29, 2009
- [CYD04] Cheng, V. H. L., Yeh, A. & Diaz, G. M. (2004). Surface-Operation Benefits of a Collaborative Automation Concept. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 16 – 19 August 2004, Providence, Rhode Island
- [CYF03] Cheng, V. H. L., Yeh, A. & Foyle, D. C. (2003). Evaluation Plan for an Airport Surface-Operation Automation Concept. *Proceedings of the AIAA's 3<sup>rd</sup> Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Technical Forum*
- [DA10] Delta Airlines. (2010). *Flugzeugflotte*, <http://de.delta.com> (Stand: 01.12.2010).
- [DiS01] Di Santo, G. (2001). Proper Operation of Carbon Brakes. *Airbus – 11<sup>th</sup> Operations and Performance Conference*. Jalisco, Mexico. 26-30 March 2001

- [DSB10] The Dutch Safety Board. (2010). *Crashed during approach, Boeing 737-800, near Amsterdam Schiphol airport, 25 February 2009*. Final Report. The Hague, Mai 2010
- [EASA12] European Aviation Safety Agency (EASA). (2012). Notice of Proposed Amendment NPA 2012-06: *Sterile Flight Deck Procedures*. Juli 2012
- [Ebb09] Ebbatson, M. (2009). *The Loss of Manual Flying Skills in Pilots of Highly Automated Airliners*, PhD Thesis, Cranfield University
- [EC03] Eurocontrol. (2003). *A-SMGCS Project Strategy*, September 2003
- [EC05] Eurocontrol. (2005). *Definition of A-SMGCS Implementation Levels*, November 2005
- [EC07] Eurocontrol. (2007). *Eurocontrol Standard Document for Surveillance Data Exchange Part 7: Category 010 Transmission of Monosensor Surface Movement Data*. Issue 1.1
- [EC08a] Eurocontrol. (2008a), *Challenges of Growth*, Summary Report
- [EC08b] Eurocontrol. (2008b). *SESAR Definition Phase, Deliverable 5, The ATM Master Plan*, DLM-0710-001-02-00, April 2008
- [EC09] Eurocontrol. (2009). *Strategic Guidance in Support of the Execution of the European ATM Master Plan*, Version 1.0, May 2009
- [EC10] Eurocontrol. (2010). *Airport CDM Implementation – The Manual*. Version 3.1, Juli 2010
- [Edw77] Edwards, E. (1977). Automation in civil transport aircraft. *Applied Ergonomics*, 8, S. 194-198
- [EK95] Endsley, M. R. & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors*, 37(2), S. 381-394
- [EN99] EN ISO 9241-11. (1999). *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit*. Berlin: Beuth Verlag.
- [End95] Endsley, M. R. (1995). A taxonomy of situation awareness errors. R. Fuller, N. Johnston, & N. McDonald (Eds.), *Human Factors in Aviation Operations* (S. 287-292). Aldershot, England: Avebury Aviation, Ashgate Publishing Ltd.
- [End99] Endsley, M. R. (1999). Situation awareness in aviation systems. Garland, D. J., Wise, J. A. & Hopkin, V. D. (Eds.). *Handbook of Aviation Human Factors*, Mahwah, NJ: Erlbaum.
- [Eng01] Engels, K. (2001). *Realisierung und Untersuchung der Kommunikationsstruktur einer Simulationsarchitektur für einen verteilten Forschungssimulator*, Dissertation Technische Universität Darmstadt
- [Eur07] Euractiv. (2007). *Experten fordern Umsetzung des "Einheitlichen Luftraums"*, <<http://www.euractiv.com/de/verkehr/experten-fordern-umsetzung-des-e-news-252219>> Veröffentlicht 09. Juli 2007
- [FAA96] Federal Aviation Administration (FAA). (1996). *Federal Aviation Administration Human Factors Team Report on: The Interfaces Between Flight crews and Modern Flight Deck Systems*, June 18, 1996

- 
- [FAA11] Federal Aviation Administration (FAA). (2011). US Civil Airmen Statistics. <[http://www.faa.gov/data\\_research/aviation\\_data\\_statistics/civil\\_airmen\\_statistics/2011/](http://www.faa.gov/data_research/aviation_data_statistics/civil_airmen_statistics/2011/)> Stand 31.12.2011.
- [FHK09] Foyle, D. C., Hooey, B. L., Kunkle, C. L., Schwirzke, M. F. J. & Bakowski, D. L., (2009). Piloted Simulation of NextGen Time-based Taxi Clearances and Tailored Departures, *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, 2009
- [FHP80] Fischer, E, Haines, R. F. & Price, T. A. (1980). *Cognitive issues in head-up displays*. NASA Technical Paper 1711, Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration.
- [Fit51] Fitts, P. M. (1951). Engineering psychology and equipment design. S. S. Stevens (Ed.). *Handbook of experimental psychology* (S. 1287-1340). New York: Wiley
- [FKJ92] Foyle, D. C., Kaiser, M. K. & Johnson, W. W. (1992). Visual Cues in Low-Level Flight: Implications for Pilotage, Training, Simulation, and Enhanced / Synthetic Vision Systems. *American Helicopter Society 48th Annual Forum*, S. 253-260, 1992. Vol. 1
- [FKL07] Flemisch, F. O., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A. & Schindler, J. (2007). Automation spectrum, inner / outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. *Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter Annual Meeting 2007*. Braunschweig
- [FMB09] Funk, K., R. Mauro & I. Barshi (2009). NextGen flight deck human factors. *Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Symposium on Aviation Psychology*, Dayton, Ohio, 27 – 30 April 2009
- [GA99] Graeber, D. A. & Andre, A. D. (1999). Assessing visual attention of pilots while using Electronic Moving Maps for Taxiing, In R. S. Jensen, B. Cox, J. D. Callister, & R. Lavis (Eds.). *Proceedings of the Tenth Symposium on Aviation Psychology: 2*, 791-796. Columbus, Ohio: Ohio State University
- [GAIN01] Global Aviation Safety Network (GAIN). (2001). *Cabin Safety Compendium. Issue 1. A Companion to the Operator's Flight Safety Handbook*. Dec 2001
- [Ger09] Gerrit, S. (2009). *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik – Band 7. Oktober 2009.
- [GL08] Grandt, M. & Ley, D. (2008). Unterstützung von Entscheidungsprozessen durch benutzerzentrierte Gestaltung von Führungssystemen. Schmidt, L., Schlick, C. & Grosche, J. (Hrsg.) *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme*, Springer Verlag, Berlin 2008, ISBN 978-3-540-78330-5, S. 79-102
- [Gon09] Gong, C. (2009). Kinematic Airport Surface Trajectory Model Development, AIAA-2009-7076. *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS)*, Hilton Head, SC, 21-23 Sep. 2009
- [GM03] Grinspun, Y. & Miller, E. J. (2003). A Survey-Based Approach to Measure Taxiway Delay and Predictability at Lester B. Pearson International Airport. *Crossing Borders: Travel, Trade, Security and Communication, Canadian Transportation Research Forum, Proceedings 38th Annual Conference*

- [GS07] Ganesan, R. & Sherry, L., (2007). *A stochastic dynamic programming approach to taxi-out prediction using reinforcement learning*, Internal Center for Air Transportation Systems Research Report
- [Han97] Hancock, P. A. (1997). Hours of boredom, moments of terror, – or months of monotony, milliseconds of mayhem. *Ninth International Symposium on Aviation Psychology*, April 1997, Columbus, Ohio
- [HC86] Harper, Jr., R. P. & Cooper, G. E. (1986). Handling qualities and pilot Evaluation. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 9, S. 515-529
- [HFA00] Hooley, B. L., Foyle, D. C. & Andre, A. D. (2000). Integration of Cockpit Displays for Surface Operations: The Final Stage of a Human-Centered Design Approach. *SAE Transactions: Journal of Aerospace*, vol. 109, S. 1053-1065
- [HHH99] Hutchins, E. Holder, B. & Hayward, M. (1999). *Pilot attitudes toward automation*. University of California, San Diego (UCSD) Cognitive Science technical report. Web-published: <<http://hci.ucsd.edu/hutchins/aviation/attitudes/attitudes.pdf>>
- [Hoy90] Hoyos, C. (1990). Menschliches Handeln in technischen Systemen. C. Hoyos & B. Zimolong (Hrsg.) *Enzyklopädie der Psychologie*, Band D III 2, Ingenieurpsychologie (S. 1-30). Göttingen: Hogrefe
- [HP98] Hesselink, P. P. & Paul, S. (1998). Planning aircraft movements on airports with constraint satisfaction, NLR-TP-98397. *Proceedings of the Third Institute of Mathematics and its Applications (IMA) Conference on Mathematics in Transport Planning and Control*
- [HPR99] Herrero, J. G., Portas, J. A. B., Rodriguez, F. J. J. & Corredera, J. R. C. (1999). ASDE (Airport Surface Detection Equipment) and Multilateration Mode-S Data Fusion for Location and Identification on Airport Surface. *IEEE 1999 Radar Conference Proceedings*, S. 315-320
- [HS88] Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. P. A. Hancock & N. Meshkati (Hrsg.). *Human mental workload* (S. 139-183). Amsterdam: Elsevier
- [HSU10] Haus, S., Sendobry, A., Urvoy, C. & Klingauf, U. (2010). Nutzung eines Fahrermodells und regelungstechnischer Methoden zur Gestaltung einer Mensch-Maschine Schnittstelle für zukünftige Rollführungsprozesse. *3. Berliner Fachtagung Fahrermodellierung, VDI Fortschritt-Berichte, Mensch-Maschine-Systeme*
- [HSU11] Haus, S., Sendobry, A., Urvoy, C. & Klingauf, U. (2011). Control Theoretic Concept for Intuitive Guidance of Pilots during Taxiing, *30<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Seattle, October 2011
- [HT02] Hauß, Y. & Timpe, K.-P. (2002). Automatisierung und Unterstützung im Mensch-Maschine-System. Timpe, K.-P., Jürgensohn, T. & Kolrep, H. (Hrsg.). *Mensch-Maschine-Systemtechnik* (S. 41-62), Düsseldorf: Symposion Publishing GmbH
- [ICAO86] International Civil Aviation Organization (ICAO). (1986). *Manual of Surface Movement Guidance and Control Systems (SMGCS)*. Doc 9476
- [ICAO04a] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2004). *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, Aerodromes, Volume 1, Aerodrome*

---

*Design and Operations*, 4<sup>th</sup> Edition, July 2004

- [ICAO04b] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2004). *Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual*, First Edition. Doc 9830 AN/452
- [ICAO06] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2006). *Best Practices on the Flight Deck*. Doc 9870 AN/463
- [ICAO07a] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2007). *Global Air Navigation Plan*. Doc 9750 AN/963. Third Edition.
- [ICAO07b] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2007). *Procedure for Air Navigation Services — Air Traffic Management*. (Doc 4444). 15<sup>th</sup> Edition
- [ICAO07c] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2007). *Manual on the Prevention of Runway Incursions*. Doc 9870 AN/463. First Edition
- [JPD07] JPDO. (2007). *Concept of Operations of the Next Generation Air Transportation System*. V 2.0
- [JPD11] JPDO. (2011). *Human Factors Research Coordination Plan*. FAA and NASA Next Generation Air Transport Research Report. February 28, 2011
- [Kat00] Katz, E. S. (2000). *Evaluation of a Prototype Advanced Taxiway Guidance System (ATGS)*, DOT/FAA/AR-TN00/9, February 2000
- [Köh08] Köhler, T. (2008). *Statistische Einzelfallanalyse. Eine Einführung mit Rechenbeispielen*. Weinheim: Beltz. ISBN 978-3-621-27643-6
- [Köc09] Köck, K. (2009). *Enhanced A-SMGCS – A combination of A-SMGCS and electronic flight strips to enhance safety nets far beyond A-SMGCS Level 2 Definitions*. *Air Traffic Technology International 2009*. S. 89
- [LDB09] Loukopoulos, L. D., Dismukes, R. K. & Barshi, I. (2009). *The Multitasking Myth: Handling Complexity in Real-World Operations*. Burlington, Vermont, U.S.: Ashgate Publishing Co. 2009
- [LNL97] Lyall, B., Niemczyk, M., Lyall, R. & Funk, K. (1997). *Flight deck Automation: Evidence for Existing Problems*. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Aviation Psychology*
- [LS07] Lippold, C. & Schulz, R. (2007). *Orientierungssichtweite- Definition und Beurteilung- Schlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Dresden 2007*
- [LS09] Lewis, J., R. & Sauro, J. (2009). *The factor structure of the system usability scale*. In: *Proceedings of the human computer interaction international conference (HCII 2009)*, San Diego CA, USA
- [LW91] Larish, I. & Wickens, C. D. (1991). *Divided attention with superimposed and separated imagery: Implications for head-up displays* (Tech.Rep.ARL-91-4/NASAHUD-91-1). Savoy: University of Illinois Institute of Aviation
- [LW95] Lasswell, J. W. & Wickens, C. D. (1995). *The effects of display location and dimensionality on taxiway navigation* (Tech. Rep. No. ARL-95-5/NASA-95-2). Savoy: University of Illinois
- [LZZ09] Li, Z., Zhang, J. & Zhang, X. (2009). *A Dynamic Model for Aircraft Route Optimizing in Airport Surface Management*, 9<sup>th</sup> International Conference on

Electronic Measurements & Instruments

- [Mac50] Mackworth, N. H. (1950). *Researches in the Measurement of Human Performance*: Medical Research Council (MRC) Special Report #268. London: HMSO
- [Men07] Mensen, H. (2007). *Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen*. Springer Verlag, S. 704
- [MFA96] McCann, R. S., Foyle, D. C., Andre, A. D. & Battiste, V. (1996). *Advanced Navigation Aids in the Flight Deck: Effects on Ground Taxi Performance under Low Visibility Conditions*, SAE Transactions: Journal of Aerospace, vol. 105, S. 1419-1430
- [MHI06] Mohs, C., Hurtienne, J., Israel, J. H., Naumann, A., Kindsmüller, M. C., Meyer, H. A. & Pohlmeier, A. (2006). *IUUI – Intuitive Use of User Interfaces*. In T. Bosenick, M. Hassenzahl, M. Müller-Prove, M. Peissner (Hrsg.), Usability Professionals 06 (S. 130-133). Stuttgart: German Chapter der Usability Professionals' Association
- [MHR04] Midkiff, A. H., Hansman, R. J. & Reynolds, T. G. (2004). *Air Carrier Flight Operations*, International Center for Air Transportation Department of Aeronautics & Astronautics Massachusetts Institute of Technology Cambridge MA 02139 USA, Report No. ICAT-2004-3
- [MHV98] Martin, P., Hudgell, A., Vial, S. & Bouge, N. (1998). *FASTER: Future ATFM-AO-Airport Synergies Towards Enhanced Operations*, Eurocontrol EEC 332 Report
- [MJG08] Monroe, G. A., Jung, Y. C. & Tobias, L. (2008). *Analysis of Environmental Impact of Eliminating Arrival Hold Short Operations for Runway Crossings at Dallas/Ft. Worth Airport*, American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference and Exhibit, Honolulu, HI, 18-21 Aug. 2008
- [Mjo01] Mjos, K. (2001). *Communication and Operational Failures in the Cockpit*, Human Factors and Aerospace Safety, Vol. 1, No. 4, 2001, S. 323 –340
- [MK74] McRuer, D., T. & Krendel, E., S. (1974). *Mathematical Models of Human Pilot Behaviour*, AGARD AG 188, January 1974
- [MMP05] Mulder M., Mulder M., van Paassen M. M. & Abbink D. A. (2005). *Identification of Driver Car-Following Behaviour*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Hawaii, USA, pp. 2905-2910, October 2005
- [MP08] Murdoch, J. L. & Press, H. (2008). A Discussion of Human Factors Issues Related of the Next Generation Air Transportation System (NextGen). Unpublished manuscript, NASA Langley Research Center, Hampton, VA
- [MS94] Möhlenkamp, K. & Schänzer, G. (1994). *Automatic Control Steps for Aircraft Taxi Guidance*, Proceedings of the Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD) Meeting on Machine Intelligence in Air Traffic Management
- [MTS04] Ministry of Transport, Singapore. (2004). Final Report: Taxiing Accident involving Arrow Air APWP6L McDonnell Douglas DC8-62 Registration Mark: N1808E at Singapore Changi Airport on 28 February 2002. AIB/AAI/CAS.004

- 
- [MW97] Martin-Emerson, R. & Wickens, C. D. (1997). Superimposition, symbology, visual attention and the head-up display. *Human Factors*, 39. S. 581-601
- [NASA04] NASA/Jeff Caplan (2004). The cockpit of NASA's Gulfstream GV aircraft with experimental synthetic visions systems displays installed. <[http://www.nasa.gov/images/content/65835main\\_svs\\_cockpit\\_330x248.jpg](http://www.nasa.gov/images/content/65835main_svs_cockpit_330x248.jpg)> Stand: 11.11.2014
- [NATS10] National Air Traffic Services (NATS) (2010). *Heathrow ATC New Operator Introduction – BA Strike*. March 2010
- [New95] Newman, R. L. (1995). *Head-up displays: Designing the way ahead*. Aldershot, England: Ashgate.
- [OAA10] Oda, H., Adrian, P., Arriaga, M., Davies, L., Hille, J., Sheehan, T. & Shuter, E. T., (2010). *Safe Winter Operations*. Boeing AERO Magazine. Fourth Quarterly 2010
- [Oeh10] Oehme, A. (2010). WFF (Wettbewerbsfähiger Flughafen) Abschlusspräsentation: *Validierung Rollführung*. Recovered on Oct. 10<sup>th</sup> 2013 online at: <[https://www.dfs.de/dfs\\_homepage/de/Flugsicherung/Forschung%20&%20Entwicklung/Servicebereich/Download-Material/WFF/validierung\\_rollfuehrung\\_oehme.pdf](https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Flugsicherung/Forschung%20&%20Entwicklung/Servicebereich/Download-Material/WFF/validierung_rollfuehrung_oehme.pdf)>
- [Pic07] Pick, A. (2007). *Validation results of airport total operations planner prototype CLOU*. Proceedings of the Seventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2007)
- [PNK76] Posner, M. I., Nissen, M. J. & Klein, R. (1976). *Visual dominance: an information-processing account of its origins and significance*, *Psychological Review*, 83, S. 157-71
- [PR97] Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). *Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse*. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 39 (2), S. 230-253
- [PR04] Prinzel, L. J. & Risser, M. (2004). *Head-up displays and attention capture* (Tech. Rep. NASA/TM-2004- 213000). Hampton, VA: NASA – Langley Research Center
- [PSW00] Parasuraman, R., Sheridan, T. B. & Wickens, C. D. (2000). *A model for types and levels of human interaction with automation*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. S. 286-297
- [Rog98] Roger, C. (1998). *Crash de l'Airbus A320 à Habsheim 26 Juin 1988*. Rapport d'expert pour la défense de Michel Asseline
- [Roh73] Rohmert, W. (1973). *Psycho-Physische Belastung und Beanspruchung von Fluglotsen*. Schriftenreihe „Arbeitswissenschaft in der Praxis“ Band 30. Beuth-Vertrieb GmbH
- [RTCA02] Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA). (2002). DO-242A: Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). RTCA, Inc. June 25, 2002
- [Sar94] Sarter, N. B. (1994). „*Strong, Silent and Out-Of-The-Loop*“: *Properties of Advanced (Cockpit) Automation and their impact on Human-Automation interaction*. Dissertation, Ohio State University, Industrial and Systems

Engineering

- [Sat93] Satchell, P. (1993). *Cockpit Monitoring and Alerting Systems*, Aldershot, England: Ashgate, 1993
- [SBL10] Schlick, C. M., Bruder, R. & Luczak, H. (Hrsg.). (2010). *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg: Springer
- [SCN06] Sheridan, T. B., Corker, K. M. & Nadler, E. D. (2006). *Final Report and Recommendations for Research on Human-Automation Interaction in the Next Generation Air Transportation System*. Cambridge, MA: US Department of Transportation, John A. Volpe National Transportation Systems Center. Report No. DOT-VNTSC-NASA-06-05
- [SES08] SESAR Joint Undertaking (JU). (2008). *17 airlines, airports, air navigation service providers and manufacturers to test low-CO2-emission flight procedures*, ATC Network News 11/18/2008
- [She70] Sheridan, T. B. (1970). *On how often the supervisor should sample*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-6, S. 140-145
- [She95] Sheridan, T. B. (1995). *Human centred automation: oxymoron or common sense?* Intelligent Systems of the 21<sup>st</sup> Century. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995
- [Sin08] Sindlinger, A. (2008). *Ein Beitrag zur dreidimensionalen Darstellung von Nominal-Trajektorien in perspektivischen Flugführungsanzeigen*, Dissertation Technische Universität Darmstadt
- [Smi59] Smith, O.J.M. (1959). *A Controller to Overcome Dead-Time* ISA Journal, Heft 2, S.28-33
- [SMM05] Stuart, G. W., McAnally, K. I. & Meehan, J. W. (2005). *Head-up displays and visual attention*, Contemporary Issues in Human Factors and Aviation Safety, S. 25-46
- [SV78] Sheridan, T. B. & Verplank, W. L. (1978). *Human and Computer Control of Undersea Teleoperators*, MIT Man-Machine Systems Laboratory, Cambridge, MA, Tech. Rep., 1978
- [Tay90] Taylor, R. M. (1990). *Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design*. Proceedings of the Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD) AMP Symposium on Situational Awareness in Aerospace Operations, CP478. Seuilly-sur Seine: NATO AGARD
- [TBC08] The Boeing Company. (2008). *757/767 Flight Crew Training Manual*, Document Number FCT 757/767, Revision Number: 8, Revision Date: October 31, 2008
- [Tuk77] Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley.
- [UDK10] Urvoy, C., Drege, C. & Klingauf, U. (2010). *Concept for a Human Centered 4D Surface Guidance System*. Proceedings of the 29th EAAP Conference, Budapest: EAAP 2010
- [UA09] UK AIP. (2009). EGLL AD 2.1 – LONDON HEATHROW. Apr, 2009
- [UA10] UK AIP. (2010). EGKK AD 2.1 – LONDON GATWICK. Feb. 2010

- 
- [UOD10] Urvoy, C., Oehme, A., Drege, C., Sendobry, A. & Klingauf, U. (2010). *Conceptual Validation of Advanced Pilot Guidance-Systems – A field test report*. 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems (IFAC-HMS 2010)
- [Urv10] Urvoy, C. (2010). *Anforderungsanalyse für ein zukünftiges Rollführungs-system*. Studienbericht im Auftrag der DFS
- [VH00] Voss, W. R. & Hoffman, J. (2000). *Analytical Identification of Airport and Airspace Capacity Constraints*, 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar Napoli, June 2000
- [VUK08] Vernaleken, C., Urvoy, C. & Klingauf, U. (2008). *Simulator Evaluation of a Novel Surface Movement Awareness and Alerting System (SMAAS) for Runway Incursion Avoidance*. 26<sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2008), Anchorage, Alaska
- [VW00] Ververs, P. M. & Wickens, C. D. (2000). Designing head-up displays (HUDs) to support flight path guidance while minimizing effects of cognitive tunneling. In *Proceedings of the IEA 2000/HFES 2000 Congress*. Santa Monica, CA: HFES
- [WC95] Wickens, C. D. & Carswell, M. (1995). *The Proximity Compatibility Principle: Its Psychological Foundation and Relevance to Display Design*. *Human Factors*, 37(3), S. 473-494
- [WE92] Weintraub, D. J. & Ensing, M. (1992). *Human factors issues in head-up display design: The book of HUD* (SOAR, CSERIAC 92–2). Wright-Patterson Air Force Base, OH: Crew Station Ergonomics Information Analysis Center
- [Wic84] Wickens, C. D. (1984). *Processing Resources in Attention*. R. Parasuraman (Ed.). *Varieties of Attention* (S. 63-102). London: Academic Press
- [Wic97] Wickens, C. D. (1997). *Attentional processes in GA head-up display design* (Tech. Rep. ARL–97–8/FAA–97–3). Savoy: University of Illinois, Institute of Aviation Research Lab
- [Wic05] Wickens, C. D. (2005). *Attentional tunneling and task management*. Proceedings of the 13th International Symposium on Aviation Psychology. S. 620-625 Oklahoma City, OK
- [Wie88] Wiener, E. L. (1988). Cockpit Automation. *Human Factors in Aviation*, S. 433-461
- [Wie89] Wiener, E. L. (1989). *Human Factors of Advanced Technology ("Glass Cockpit") Transport Aircraft*. NASA Contractor Report 177528. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA
- [Wik11] Wikipedia online Enzyklopädie. (2011). *Artikel Boxplot*, <http://de.wikipedia.org>, 2011, (Stand 30.06.2011)
- [Wip05] Wipplinger, P. (2005). *Untersuchung des Pilotenverhaltens bei HALS/DTOP-Anflügen*, Dissertation Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag
- [WHF06] Williams, J. L., Hooey, B. L. & Foyle, D. C. (2006). 4-D taxi clearances: pilots' usage of time-and speed-based formats. *Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference 2006*
- [WMM97] Wickens, C., D., Mavor, A. S. & McGee, J., P. (Hrsg.). (1997). *Human Factors in Air Traffic Control – Flight to the Future*. Panel on Human Factors in Air

Traffic Control Automation, Committee on Human Factors, Commission on Behavioral and Social Sciences and Education, National Research Council. National Academy Press. Washington, D.C.

- [YD08] Yerkes R. M. & Dodson J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology* 18, S. 459-482

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luftfahrt-Nachfrage gegenüber den Flughafen Kapazitäten im Jahr 2030 [EC08a].....	1
Abbildung 2: Ursachen für verspätete Flüge an europäischen Flughäfen nach [CODA11].....	2
Abbildung 3: Speichernetz im Luftverkehr [AS07].....	2
Abbildung 4: Aufbau der Arbeit.....	3
Abbildung 5: Heutige Verfahren: First Come-First Served Trajektorie nach [BH07].....	5
Abbildung 6: Zukünftige Verfahren: 4D-Trajektorie nach [BH07].....	6
Abbildung 7: Freigabenpositionen [ICAO07b].....	7
Abbildung 8: Rollführungsprozess am Beispiel des Outboundverfahrens [Blu10].....	8
Abbildung 9: Aufgabenverteilung im Cockpit während der Rollphase [LDB09].....	9
Abbildung 10: Airport CDM Meilensteine [EC10].....	10
Abbildung 11: Zustände von Flugzeugen in der Rollphase nach [Köc09].....	10
Abbildung 12: Lösung des Tourenproblems [HP98].....	11
Abbildung 13: Taxi Verspätung Vergleich zwischen heutiger Operationen und SOAR Konzept im Dallas Flughafen für einen zukünftigen Verkehrsszenario [CYD04].....	12
Abbildung 14: Block Diagramm des SOAR Konzepts [CYF03].....	13
Abbildung 15: Flight-Deck Automation for Reliable Ground Operations (FARGO) HUD Pilotenschnittstelle für den vollautomatischen Modus [CAF09].....	13
Abbildung 16: Boeing 787 Cockpit mit Head-Up Displays [Bra07].....	14
Abbildung 17: Drive-Director im Ground Information and Navigation System [MS94].....	15
Abbildung 18: Advanced NextGen PFD und Taxi ND [FHK09].....	16
Abbildung 19: 4D-Taxi Clearances Displays [WHF06].....	16
Abbildung 20: FARGO HUD Pilotenschnittstelle [CAF09].....	17
Abbildung 21: Experimentelle FARGO HUD Pilotenschnittstelle [Che04].....	17
Abbildung 22: Blockschaltbild eines manuellen und eines automatisierten Systems nach [HT02].....	19
Abbildung 23: Blockschaltbild eines unterstütztes Systems [HT02].....	21
Abbildung 24: Klassifizierung von Automatisierung nach [PSW00].....	21
Abbildung 25: Automatisierungsspektrum nach [FKL07].....	21
Abbildung 26: Entwicklung der Flugzeug Automatisierung nach [Bil96].....	22
Abbildung 27: Yerkes-Dodson Gesetz.....	23
Abbildung 28: Endsleys Situationsbewusstseinsmodell [End95].....	24
Abbildung 29: Rollbahnbefuerung [Men07].....	27
Abbildung 30: Komponenten von A-SMGCS [EC03].....	28
Abbildung 31: Versuche am Frankfurter Flughafen mit dem WFF System [Oeh10].....	29
Abbildung 32: Segmentweise Anschaltung der Rollwegbefuerungselementen [ICAO04b].	30
Abbildung 33: Flugzeugflotte von Delta Air Lines nach Durchschnittsalter der Maschinen nach [DA10].....	33
Abbildung 34: Automatisierungsstufen für die Vollautomatisierung und für das vorgestellte Konzept. Darstellung nach [PSW00].....	34

Abbildung 35: Struktur der Verarbeitungsressourcen nach [Wic84] erweitert in [Ger09] .....	35
Abbildung 36: Möglichkeiten zur Anbringung von optischen Informationen im Cockpit. Grundbild: [NASA04] .....	37
Abbildung 37: Attention Capture dargestellt mittels des Spotlight-Modells von Lotze [Bak99] .....	38
Abbildung 38: Beispielhafte Darstellung von umweltgebundener Information. Der Kontrollturm und die Landebahn kommen direkt aus dem Außenblick, während das Billboard mit den instrumentellen Daten sowie die Kompassdaten auf dem Horizont virtuelle Informationen darstellen. [FKJ92].....	39
Abbildung 39: Anwendungsrahmen für Gebrauchstauglichkeit nach [EN99].....	41
Abbildung 40: Ebenen des Vorwissens nach [MHI06] .....	41
Abbildung 41: Zusammenfassung der Anforderungen.....	42
Abbildung 42: Zusammenfassung der Hypothesen .....	43
Abbildung 43: Prozentuale Verteilung von Abstandswerten zwischen Flugzeugpaaren am Flughafen Frankfurt. Nach [Böt08] .....	45
Abbildung 44: Eckwerte für den Abstand zwischen Flugzeugpaaren in A-SGMCS Systemen [ICAO04b].....	45
Abbildung 45: Sichtverhältnisse aus dem Cockpit eines Airbus A330 [Air11a] .....	46
Abbildung 46: Infrastrukturelemente einer AMDB [AIS08].....	48
Abbildung 47: Rollwegbefeuerungselement L852 LED Basiert (ADB).....	49
Abbildung 48: Architektur des Airfield Ground Lighting Automation Systems (AGLAS) [BP03].....	50
Abbildung 49: Geometrische Darstellung von Flugzeug und Befeuerungselementen [HSU10] .....	51
Abbildung 50: Automatisierungsstufen der zwei Ansätze – bereits veröffentlicht in [UDK10] .....	51
Abbildung 51: Allgemeine Architektur der 4D-Rollführungsfunktion .....	52
Abbildung 52: Blockschaltbild des Pilotenmodells [HSU11] .....	53
Abbildung 53: Blockschaltbild des Flugzeugmodells [HSU11].....	54
Abbildung 54: Blockschaltbild des gesamten Regelkreises [HSU10].....	54
Abbildung 55: Vergleich der Abweichung von der Solltrajektorie bei einer Steuerung und einer Regelung [HSU10] .....	55
Abbildung 56: Erfahrung mit dem „Follow the Greens“ System in London Heathrow.....	56
Abbildung 57: Darstellung der Szenarien für die Vorversuche – ES: blau, VS: gelb – Flughafenkarte aus Google Maps .....	57
Abbildung 58: Distanz zwischen Flugzeugposition und letzter angeschalteter Lampe für das Pilotenmodell (Simulation) und Pilot 2 (Experiment) [HSU11] .....	60
Abbildung 59: PID Regler mit Parametern [HSU11] .....	60
Abbildung 60: Regler mit Smith-Prädiktor [HSU11].....	61
Abbildung 61: Altersverteilung von Fluglinien-Verkehrspiloten in 2011 (Daten aus [FAA11]) .....	68
Abbildung 62: Gesamte Simulationsarchitektur für die Versuche .....	69
Abbildung 63: FSR Cockpit Simulator.....	70

---

Abbildung 64: Navigation Display (ND) mit Airport Moving Map (AMM).....	70
Abbildung 65: Außensichtbeispiel mit Aliza [Atr11b].....	71
Abbildung 66: ARISE Hauptfenster [Atr11a] .....	72
Abbildung 67: Eingesetzte Funktionen von SMAN für die Rollführung aus [Böt10] .....	73
Abbildung 68: Benutzerschnittstelle des Surface Guidance System Moduls.....	74
Abbildung 69: Die Hauptrollrichtungen am Flughafen Frankfurt [Böt08] .....	75
Abbildung 70: Szenarien der Versuche – S1: blau, S2: gelb, S3: grün – Flughafenkarte aus Google Maps.....	76
Abbildung 71: Bild aus dem Cockpit während der Simulator Versuche.....	80
Abbildung 72: Elemente eines Boxplots [Wik11] .....	81
Abbildung 73: Aktueller Flugzeugtyp der Probanden.....	82
Abbildung 74: Erfahrung der Probanden mit dem „Follow the Greens“ System in London Heathrow .....	82
Abbildung 75: Vertrautheit der Probanden mit dem Frankfurter Flughafen.....	83
Abbildung 76: Mittelwert der Positionsdifferenz in Meter nach Pilot für die Baseline Versuche.....	84
Abbildung 77: Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter nach Pilot für die Baseline Versuche .....	85
Abbildung 78: Mittelwert der Positionsdifferenz in Meter nach Pilot für die Versuche mit Steuerung.....	86
Abbildung 79: Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter nach Pilot für die Versuche mit Steuerung.....	86
Abbildung 80: Mittelwerte der Positionsdifferenz in Meter nach Pilot für die Versuche mit Regler.....	87
Abbildung 81: Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter für die Versuche mit Regler.....	87
Abbildung 82: Positionsdifferenz in Meter für Szenario 3 nach Systemart .....	89
Abbildung 83: Positionsdifferenz in Meter für Szenario 2 nach Systemart (Pilot 8) .....	89
Abbildung 84: Mittelwert und Standardabweichungen der Positionsdifferenz in Meter nach Systemart .....	90
Abbildung 85: Merkmale der Positionsdifferenz in Meter aller Versuche mit Steuerung oder Regelung.....	90
Abbildung 86: Mittelwert und Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter nach Systemart ohne Baseline.....	91
Abbildung 87: Maximalwert der Positionsdifferenz in Meter nach Systemart ohne Baseline	91
Abbildung 88: Median und Standardabweichung der Positionsdifferenz in Meter nach System ohne Baseline.....	92
Abbildung 89: Maximalwert der Positionsdifferenz in Meter nach System ohne Baseline ....	92
Abbildung 90: Mittelwert und Standardabweichung ohne Vorwissen .....	93
Abbildung 91: Einfluss des Vorwissens bei den Versuchen mit Regler – Mittelwert der Positionsdifferenz in Meter .....	93
Abbildung 92: Positionsdifferenz in Meter nach Versuch für Pilot 3 .....	94
Abbildung 93: Medianwert der Positionsdifferenz in Meter nach Szenario für die Versuche ohne Baseline.....	94

Abbildung 94: Median der Positionsdifferenz in Meter nach Versuchsnummer für die Versuche ohne Baseline.....	95
Abbildung 95: Median der Positionsdifferenz in Meter nach Versuch vor und nach der ersten Pause ohne Baseline .....	95
Abbildung 96: Bewertung des Systems mit und ohne Vorwissen anhand von MCHS .....	97
Abbildung 97: Bewertung des Systems nach Pilot anhand von MCHS .....	97
Abbildung 98: Bewertung des Systems von Piloten 2, 6, 8 und 15 anhand von MCHS.....	98
Abbildung 99: Bewertung der Benutzbarkeit des Systems anhand der SUS-Skala .....	99
Abbildung 100: Bewertung der Lernbarkeit des Systems anhand der SUS-Skala .....	99
Abbildung 101: Bewertung der Gesamtbeanspruchung mit dem System anhand der RTLX-Skala .....	100
Abbildung 102: Bewertung der geistigen Anforderung mit und ohne Vorwissen anhand der RTLX-Skala.....	100
Abbildung 103: Bewertung der empfundenen Aufgabenerfüllung mit Hilfe des Systems anhand der RTLX-Skala.....	101
Abbildung 104: Bewertung der empfundenen Frustration nach Systemart anhand der RTLX-Skala .....	101
Abbildung 105: Bewertung der Gesamtbeanspruchung mit dem System nach Pilot anhand der RTLX-Skala.....	102
Abbildung 106: Einzelne Bewertungen der Gesamtbeanspruchungen von Piloten 2, 13, 14 und 16 .....	103
Abbildung 107: Empfundenes Situationsbewusstsein nach Pilot während der Versuche ohne Baseline .....	103
Abbildung 108: Empfundenes Situationsbewusstsein nach Systemart für Piloten 7 und 13	104
Abbildung 109: Beurteilung des empfundenen Situationsbewusstseins .....	105
Abbildung 110: Empfundenes Situationsbewusstsein nach Systemart für Pilot 16 .....	105
Abbildung 111: Beurteilung der geforderten Aufmerksamkeit nach Systemart .....	106
Abbildung 112: Beurteilung der vorhandenen Aufmerksamkeit nach Systemart .....	106
Abbildung 113: Beurteilung des Verständnisses mit und ohne Vorwissen.....	107
Abbildung 114: Korrelation zwischen dem empfundenen Maß an Situationsbewusstsein und die bewertete Angemessenheit des Systems.....	107
Abbildung 115: Korrelation zwischen dem empfundenen Maß an Situationsbewusstsein und der bewerteten Gebrauchstauglichkeit des Systems.....	108
Abbildung 116: Konservative Enveloppe E1: +400/-200 Meter .....	112
Abbildung 117: Enveloppe E2: +300/-150 Meter .....	113
Abbildung 118: Enveloppe E3: +200/-100 Meter .....	113
Abbildung 119: Hot Spots (in rot) auf einer Flughafenkarte des Kansas City International Airport .....	117
Abbildung 120: Bremsenverschleiß nach aufgenommene Energie [DiS01] .....	118
Abbildung 121: Anhalte-Anweisung anhand von Rollwegbefeuerungselementen [Atr12] ..	118
Abbildung 122: Mögliche Bremsvorgang-Anweisung im GECO Simulator der DLR [Böt10] .....	119

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung 4D-Rollführungsunterstützungssysteme .....	18
Tabelle 2: Beispiel einer aktuellen MABA-MABA Liste aus [Hoy90] nach dem Prinzip aus [Fit51] .....	20
Tabelle 3: Ortungs- und Überwachungsquellen nach DO-242A [RTCA02].....	25
Tabelle 4: Abstand zwischen Rollwegbefeuerungselementen nach [ICAO04a].....	26
Tabelle 5: Wahrnehmungskanäle nach Informationsart im Cockpit .....	36
Tabelle 6: Bodensicht in Metern für verschiedene Flugzeugtypen – Daten aus den jeweiligen Airplane Characteristics for Airport Planning (ACAP) Dokumenten.....	46
Tabelle 7: Anforderungen an verfügbaren Daten aus [Urv10] .....	47
Tabelle 8: Anforderungen an Positionsdaten für die 4D-Rollführung.....	48
Tabelle 9: Szenarien für die Vorversuche.....	57
Tabelle 10: Ablauf der Vorversuche.....	58
Tabelle 11: Konstante Länge nach Cockpithöhe .....	58
Tabelle 12: Parameter des Pilotenmodells bei den Vorversuchen.....	59
Tabelle 13: Ausprägung der unabhängigen Variablen.....	63
Tabelle 14: Position der letzten Lampe nach Systemart.....	63
Tabelle 15: Klassifizierung der abhängigen Variablen.....	64
Tabelle 16: Dimensionen der SART-Skala.....	64
Tabelle 17: Gemessene Merkmale und Dimensionen in NASA-TLX nach [HS88] .....	65
Tabelle 18: Gemessene Dimensionen der SUS-Skala nach [LS09] .....	66
Tabelle 19: Zu untersuchende Dimensionen und Metriken .....	66
Tabelle 20: Zusammenfassung der Szenarien.....	77
Tabelle 21: Versuchsplanbeispiel .....	78
Tabelle 22: Taxianweisungen für die Versuche.....	79
Tabelle 23: Versuchsablauf.....	79
Tabelle 24: Statistisch relevante Parameter der aufgezeichneten Daten .....	83
Tabelle 25: Signifikanzniveau des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die Merkmale der Aufzeichnungen.....	88
Tabelle 26: Signifikanzniveau des Einflusses der unabhängigen Variablen auf die Fragebögen Ergebnisse.....	96
Tabelle 27: Zusammenfassung zusätzliche Parameter zur Berechnung der 4D-Solltrajektorie .....	115



# Anhang A: Eingangsfragebogen

## Personal Information

---

*Please provide us with your contact and some basic personal data. The personal data will be treated with strict confidence and are only used for statistical purposes.*

1) Name: \_\_\_\_\_

2) Company: \_\_\_\_\_

3) Address: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4) Email: \_\_\_\_\_

5) Phone/fax: \_\_\_\_\_

6) Age: \_\_\_\_ years

7) Gender:

male

female

## Operational Experience

---

Please provide us with some information regarding your professional experience!

### 8) Current Crew Position:

- Captain                       Senior First Officer                       First Officer

### 9) Current airline:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Lufthansa  | <input type="checkbox"/> British Airways |
| <input type="checkbox"/> Condor     | <input type="checkbox"/> Eurowings       |
| <input type="checkbox"/> TUI Fly    | <input type="checkbox"/> Martinair       |
| <input type="checkbox"/> Swiss      | <input type="checkbox"/> KLM             |
| <input type="checkbox"/> Air Berlin | <input type="checkbox"/> other           |

### 10) Years with current airline: \_\_\_\_\_ years

### 11) Current aircraft type:

Multiple selections possible - please check all aircraft for which you have a current type rating.

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Airbus A300B                  | <input type="checkbox"/> Boeing 747-400 |
| <input type="checkbox"/> Airbus A300-600/A310          | <input type="checkbox"/> Boeing 757     |
| <input type="checkbox"/> Airbus A318/A319/A320/A321/CJ | <input type="checkbox"/> Boeing 767     |
| <input type="checkbox"/> Airbus A330/A340              | <input type="checkbox"/> Boeing 777     |
| <input type="checkbox"/> Airbus A380                   | <input type="checkbox"/> MD-80          |
| <input type="checkbox"/> Boeing 727                    | <input type="checkbox"/> DC-10          |
| <input type="checkbox"/> Boeing 737-200/300/500        | <input type="checkbox"/> MD-11          |
| <input type="checkbox"/> Boeing 737-800/900/NG/BBJ     | <input type="checkbox"/> Canadair CRJ   |
| <input type="checkbox"/> Boeing 747-200                | <input type="checkbox"/> Avro RJ        |
| <input type="checkbox"/> other:                        |   |

### 12) Hours logged on current aircraft type: \_\_\_\_\_ hours

### 13) Hours logged in current position: \_\_\_\_\_ hours

### 14) Do you have any special function or other relevant flying experience (e.g. military, helicopter, bush flying etc.)?

- Test pilot                       Instructor  
 Technical Pilot                       other:

### 15) Total number of flight hours logged across your entire career in commercial aviation:

\_\_\_\_\_ hours

### 16) Other aircraft types previously flown: \_\_\_\_\_

---

## Other relevant experience

---

**17) What is your experience with the "Follow the Greens" system at London Heathrow?**

- Never heard of it.
- I have heard or read about it.
- I have already experienced it in London.

**18) Have you participated in research projects or product development before?**

- yes
- no

**19) If yes, please specify below:**

---

---

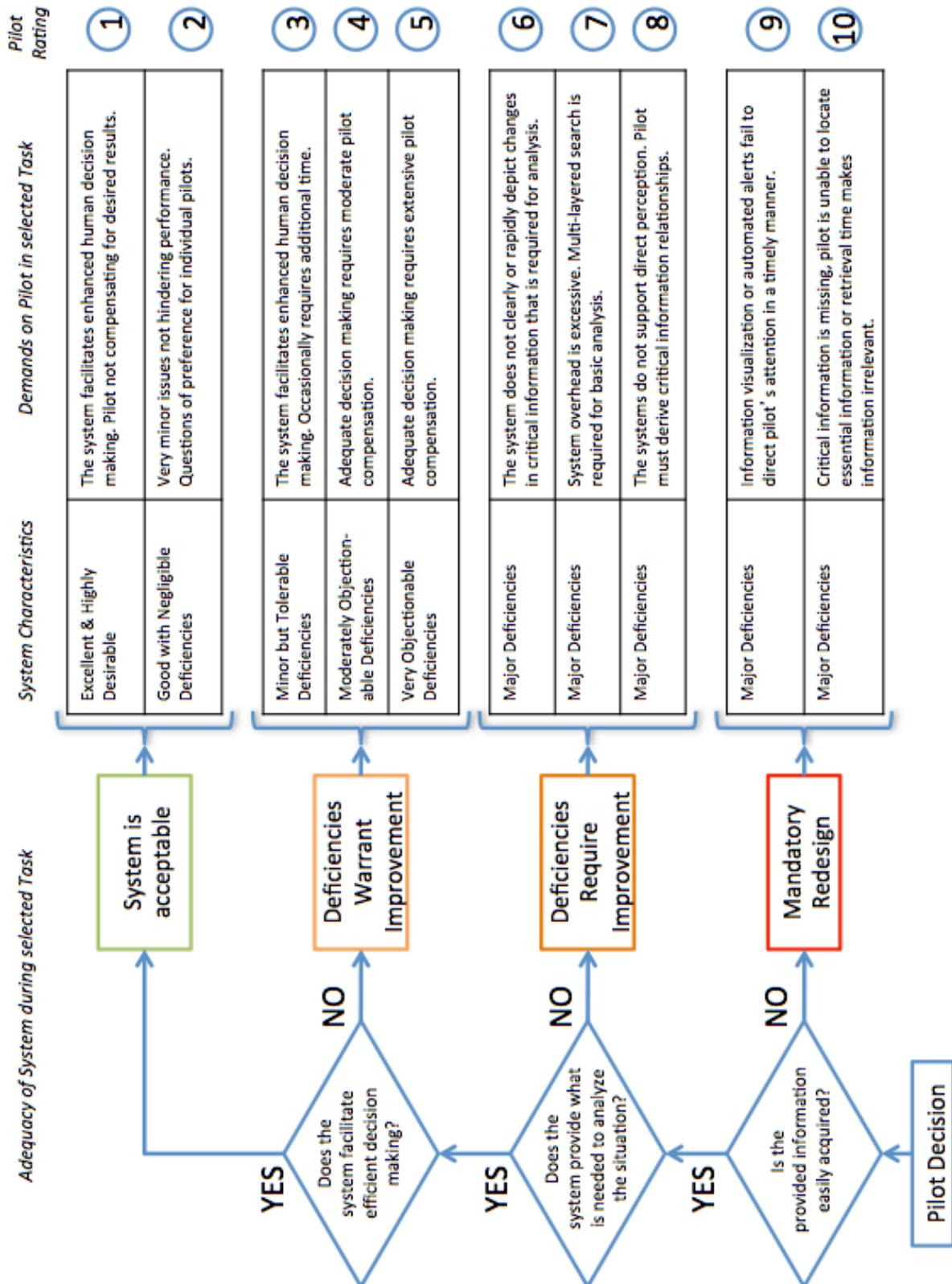
**20) How familiar are you with the airport EDDF?**

*Please check the box which best characterizes your familiarity with EDDF.*

- It is my first time here.
- I have been here several times before.
- My flights regularly bring me here.
- This airport is rather familiar to me.
- I know this airport very well.
- I know the layout of this airport almost better than that of my flat.



# Anhang B: Modified Cooper Harper Rating Scale (MCHS)





# Anhang C: System Usability Scale (SUS)

© Digital Equipment Corporation, 1986.

	Strongly disagree					Strongly agree
1. I think that I would like to use this system frequently	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
2. I found the system unnecessarily complex	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
3. I thought the system was easy to use	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
4. I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
5. I found the various functions in this system were well integrated	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
6. I thought there was too much inconsistency in this system	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
7. I would imagine that most people would learn to use this system very quickly	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
8. I found the system very awkward to use	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
9. I felt very confident using the system	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
10. I needed to learn a lot of things before I could get going with this system	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	







# Anhang E: Situation Awareness Rating Technique (SART)

## Instability of Situation

How changeable is the situation? Is the situation highly unstable and likely to change suddenly (High), or is it very stable and straightforward (Low)?



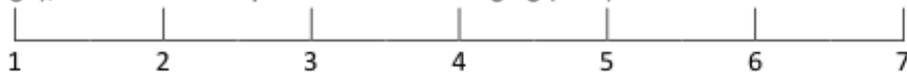
## Complexity of Situation

How complicated is the situation? Is it complex with many interrelated components (High), or is it simple and straightforward (Low)?



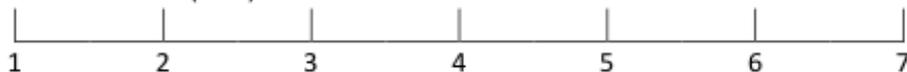
## Variability of Situation

How many variables are changing within the situation? Are there a large number of factors varying (High), or are there very few variables changing (Low)?



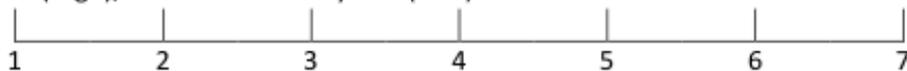
## Arousal

How aroused are you in the situation? Are you alert and ready for activity (High), or do you have a low degree of alertness (Low)?



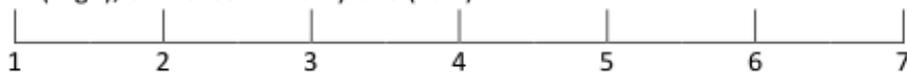
## Concentration of Attention

How much are you concentrating on the situation? Are you concentrating on many aspects of the situation (High), or focused on only one (Low)?



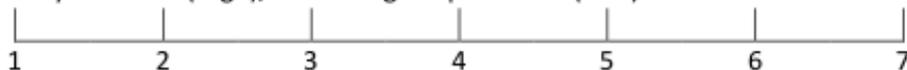
## Division of Attention

How much is your attention divided in the situation? Are you concentrating on many aspects of the situation (High), or focused on only one (Low)?



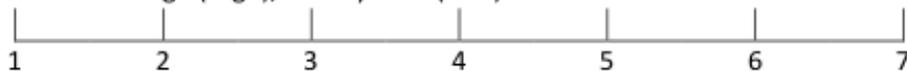
## Spare Mental Capacity

How much mental capacity do you have to spare in the situation? Do you have sufficient to attend to many variables (High), or nothing to spare at all (Low)?



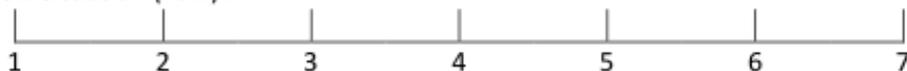
## Information Quantity

How much information have you gained about the situation? Have you received and understood a great deal of knowledge (High), or very little (Low)?



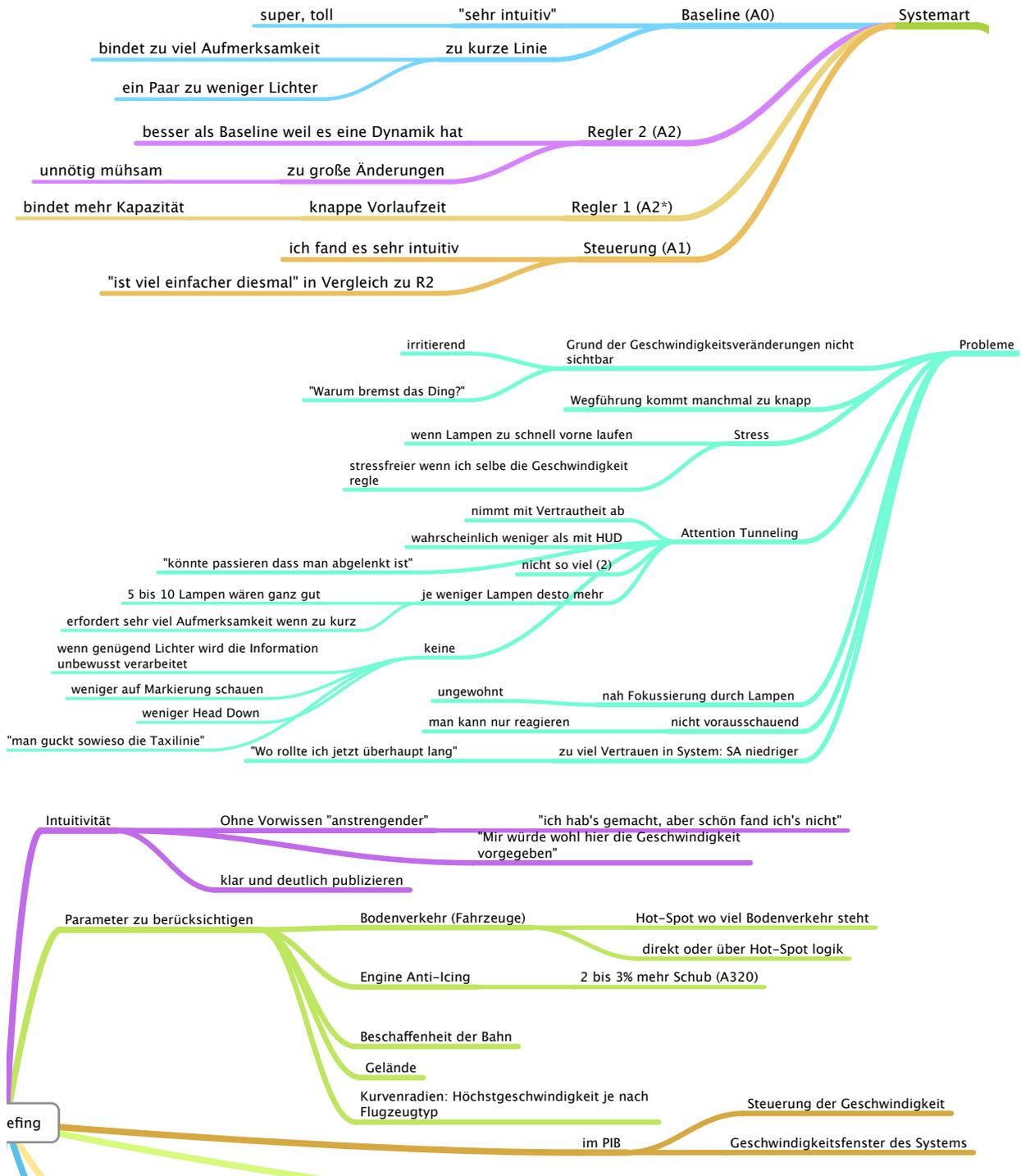
## Familiarity with Situation

How familiar are you with the situation? Do you have a great deal of relevant experience (High), or is it a new situation (Low)?

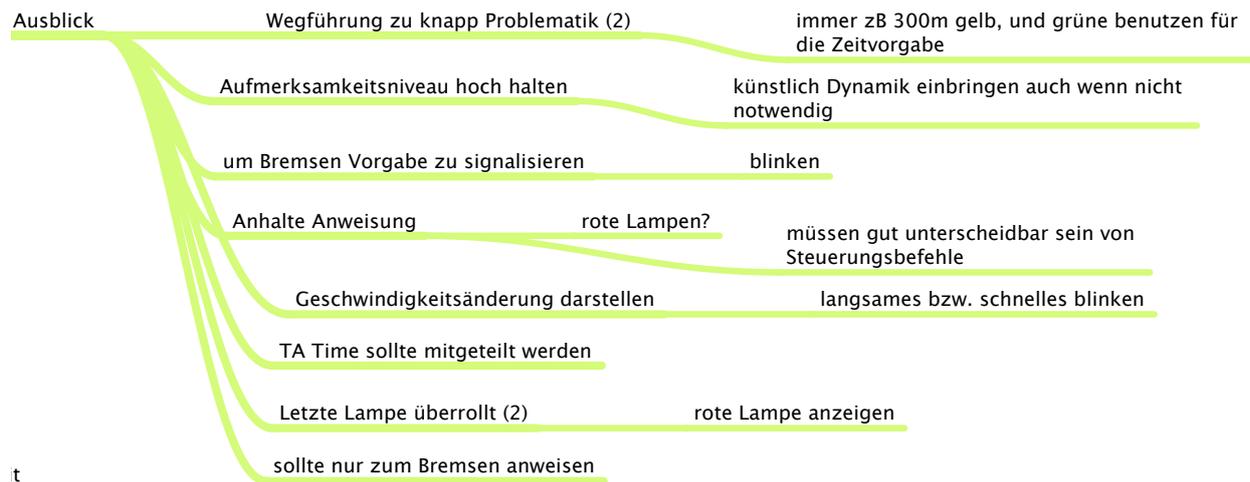




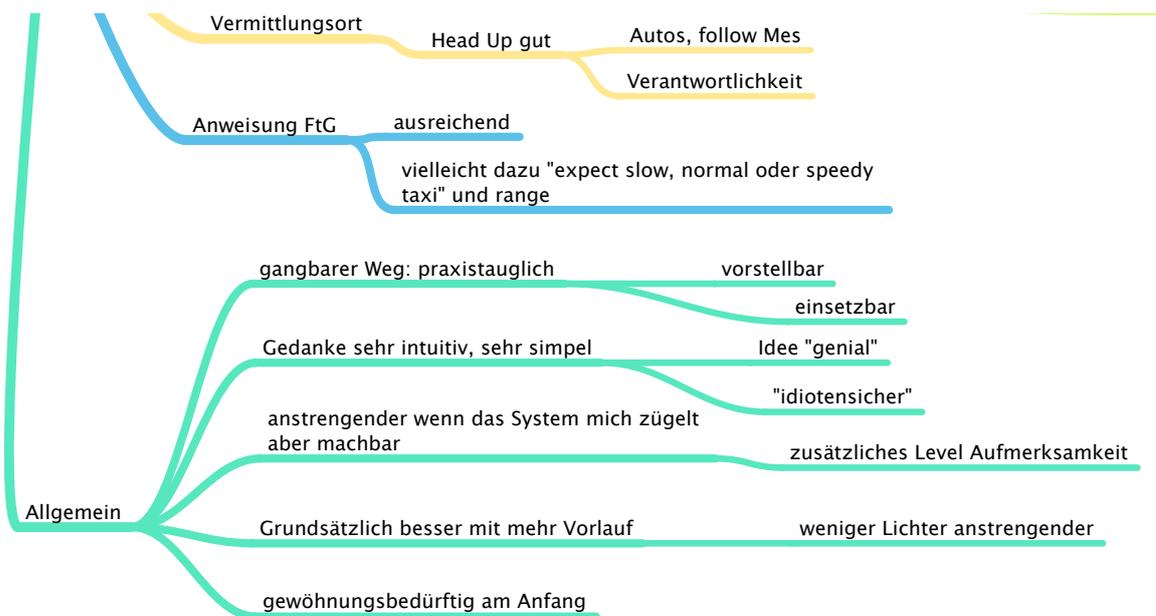
# Anhang F: Ergebnis Debriefing



## Anhang F: Ergebnis Debriefing



t



## Anhang G: Szenarien

### Scenario 1:

Betriebsrichtung	07	
Typ	Taxi Out	
Start Position	Nach Pushback von C8	
Start Geschwindigkeit	0 kts	
Taxi Route	N, L, 07L	
Taxi Zeit	ca. 10 min.	
Fremdverkehr 1	<b>Callsign</b>	AF277
	<b>Typ</b>	Taxi Out
	<b>Start Position</b>	Nach Pushback von V111
	<b>Taxi Route</b>	N, 18
Fremdverkehr 2	<b>Ereignis</b>	Rollt auf N vor Ownship mit 30 kts
	<b>Callsign</b>	LH203
	<b>Typ</b>	Taxi In
	<b>Start Position</b>	Landung auf 07R exit Gto
Fremdverkehr 3	<b>Taxi Route</b>	Gto, G, N, M1
	<b>Ereignis</b>	Kreuzung G, N vor ownship
	<b>Callsign</b>	LH207
	<b>Typ</b>	Taxi Out
	<b>Start Position</b>	Nach Pushback von F214
	<b>Taxi Route</b>	P, N, 18
	<b>Ereignis</b>	Kreuzung P, N nach ownship

### Scenario 2:

Betriebsrichtung	25	
Typ	Taxi Out	
Start Position	Nach Pushback auf Q	
Start Geschwindigkeit	0 kts	
Taxi Route	Q, A, D, 25R	
Taxi Zeit	ca. 10 min.	
Fremdverkehr 1	<b>Callsign</b>	AF277
	<b>Typ</b>	Taxi In
	<b>Start Position</b>	N level O
	<b>Taxi Route</b>	N, Gate F231
Fremdverkehr 2	<b>Ereignis</b>	Rollt auf N nach Ownship mit 25 kts
	<b>Callsign</b>	LH203
	<b>Typ</b>	Taxi In
	<b>Start Position</b>	Landung auf 25L exit Hto
Fremdverkehr 3	<b>Taxi Route</b>	Hto, H, N, P
	<b>Ereignis</b>	Kreuzung H, N vor ownship
	<b>Callsign</b>	LH205
	<b>Typ</b>	Taxi Out
	<b>Start Position</b>	Nach Pushback auf M
	<b>Taxi Route</b>	M, A, F
	<b>Ereignis</b>	Kreuzt M,A vor ownship und startet vor ownship

### Scenario 3:

<b>Betriebsrichtung</b>	25
<b>Typ</b>	Taxi Out
<b>Start Position</b>	Nach Pushback von V111
<b>Start Geschwindigkeit</b>	0 kts
<b>Taxi Route</b>	N, B, BEast, S, 18
<b>Taxi Zeit</b>	ca. 15 min.
<b>Fremdverkehr 1</b>	<b>Callsign</b> AF277
	<b>Typ</b> Taxi In
	<b>Start Position</b> Landung auf 25L
	<b>Taxi Route</b> ---
<b>Fremdverkehr 2</b>	<b>Ereignis</b> Ownship wird auf BEast abgebremst um ihn durchzulassen
	<b>Callsign</b> LH203 (Fracht)
	<b>Typ</b> Taxi Out
	<b>Start Position</b> Nach Pushback auf S5
<b>Fremdverkehr 3</b>	<b>Taxi Route</b> S5, S, 18
	<b>Ereignis</b> Kreuzung S5, S vor ownship
	<b>Callsign</b> LH205 (Fracht)
	<b>Typ</b> Taxi Out
	<b>Start Position</b> Nach Pushback auf S3
	<b>Taxi Route</b> S3, S, 18
	<b>Ereignis</b> Kreuzung S3, S nach ownship

---

## Lebenslauf

Carole Urvoy  
geboren am 12. Juni 1981  
in Saint-Etienne (Frankreich)  
Familienstand verheiratet

### Studium

- 2006 Doppel-Diplom im Rahmen des TIME Netzwerks (Top Industrial Managers for Europe)
- 2003 - 2005 Informatik Hauptstudium an der Technische Universität Darmstadt
- 2001 - 2003 Allgemeinbildende Hauptstudium an der Elitehochschule Ecole Centrale de Nantes

### Berufserfahrung

- Seit 2011 Software Ingenieurin und Leiterin der Software Entwicklung Abteilung Lynx Technik AG
- 2006 - 2011 Wissenschaftliche Mitarbeiterin,  
Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik, Fachbereich Maschinenbau  
Technische Universität Darmstadt

### Ausgewählte Veröffentlichungen

- 2010 C. Urvoy, C. Drege, S. Heusel, U. Klingauf: Concept for a human centered 4D Surface Guidance System - In: *Proceedings of the 29th Conference of the European Association for Aviation Psychology 20-24 September 2010, Budapest, Hungary, pp. 77-82*
- 2010 C. Urvoy, A. Oehme, C. Drege, A. Sendobry, U. Klingauf: Conceptual Validation of Advanced Pilot Guidance-Systems – A field test report - In: *11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems (IFAC-HMS 2010), Valenciennes, France, August 31 – September 3, 2010*
- 2010 C. Urvoy, C. Drege, S. Heusel, U. Klingauf: Konzept zur 4D-Verkehrsführung durch automatisierte Rollwegbefeuerung - In: *Bericht zum 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 24. – 26. März 2010*
- 2008 C. Vernaleken, C. Urvoy, U. Klingauf: Simulator Evaluation of a Novel Surface Movement Awareness and Alerting System (SMAAS) for Runway Incursion Avoidance - In: *26th International Congress of the Aeronautical Sciences ICAS 2008, September 2008, Anchorage, Alaska*