

**Konzeptioneller Entwurf der agentenbasierten Simulation zur  
Untersuchung des Formationsfluges in der zivilen Luftfahrt unter  
Zugrundelegung des biologischen Schwarmverhaltens**

**Dissertation**

zur Erlangung des Doktorgrades

der Naturwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Inf. Yousef Farschtschi

aus Teheran/Iran

genehmigt von der an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Maschinenbau  
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung  
28.01.2015

Dekan  
Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Dix

Betreuer  
Prof. Dr.-Ing. Dietmar P.F. Möller

Gutachter  
Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick  
Prof. Dr. Jörg P. Müller



## Zusammenfassung

Der Formationsflug wird in der Natur von Zugvögeln zur Einsparung von Energie während des Fluges eingesetzt, um Distanzen von mehreren Tausend Kilometer am Stück zu fliegen. Hierbei wird durch das Anfliegen der Wirbelschleppes des vorausfliegenden Tieres der Luftwiderstand reduziert und somit müssen weniger Flügelschläge getätigt werden. Dieses Phänomen wurde vor Jahrzehnten von der Luftfahrt erkannt und soll zur Senkung von Treibstoffverbrauch und Emissionen genutzt werden.

Diese Arbeit untersucht den Formationsflug mit Hilfe eines selbstentwickelten agentenbasierten Simulationsmodells. Dabei ist der Fokus auf die Algorithmen zur Bildung, des Haltens, der Rotation und der Rekonfiguration der Formationen gerichtet. Mit Hilfe eines adaptierten Flugleistungsmodells, das für den Formationsflug und den Alleinflug berücksichtigt wird, werden anhand eines Relativvergleichs Aussagen über die Effizienz der Algorithmen getroffen. Darüber hinaus wird ein Beitrag zur Entwicklung eines für den Formationsflug ausgerichteten Lufttransportsystems gegeben. Flugpläne können im XML-Format mit den entsprechenden Formationsinformationen an das Simulationsmodell übergeben werden, um Flugzeuge in der Simulation zu initialisieren.

## Abstract

Migratory birds fly in formation to conserve precious energy during flight, to fly distances of several thousand miles at one piece. Holding the position in the vortex of the preceding bird allows reducing wing hit rate. This phenomenon was recognized decades by the aviation industry and should be used to reduce fuel consumption and emissions.

This thesis investigates the formation flight using an implemented agent-based simulation model. The focus is on the algorithms to build, hold, rotate and reconfigure the formations. An adapted fuel calculation model has been used to conclude the efficiency of the algorithms on the basis of a relative comparison of formation flight and solo flight. In addition, a contribution to develop an air transportation system for formation flight is given. Flight plans can be transferred in XML format with the corresponding formation information to the simulation model to initialize aircrafts in the simulation.

## Vorwort

Nach dem Abschluss der Diplomarbeit auf dem Gebiet des Air Traffic Management bot sich mir die Möglichkeit in dem Spitzencluster Projekt „Effizienter Flughafen 2030“ als wissenschaftlicher Mitarbeiter weiter zu forschen. Im Rahmen meiner Projektstätigkeit erlaubte mir mein Doktorvater Herr Prof. Dr.-Ing. Dietmar P. F. Möller, dem mein besonderer Dank gilt, mir ein Forschungsgebiet zu suchen. Durch die Synergie des Forschungsclusters lernte ich meinen Zweitgutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick kennen, dem auch ein besonderer Dank gilt. Ohne die Inspiration dieser Koryphäen der Simulation bzw. Modellierung und der Luftfahrt hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen im Arbeitsbereich Technische Informatik Systeme bedanken: Dr. Berhanu Beyene, Michael Borchers, Klaus-Dieter Florstedt, Dr. Werner Hansmann, Dr. Kai Himstedt, Steven Köhler, Janis Schönefeld, Daniel Sitzmann, Carola Tenge, Prof. Dr.-Ing. Jochen Wittmann und meinem Kollegen und Freund Marc Widemann. Ich möchte mich an dieser Stelle bei einigen Mitarbeitern von Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Gollnick bedanken, die mich als Nicht-Luftfahrer unterstützt haben: Niclas Dzikus, Florian Linke, Alexander Lau, Klaus Lütjens und Tobias Marks. Ich danke auch den Kollegen aus dem Spitzenclusterprojekt für ihre Unterstützung: Jan Binebesel, Christian Blank, Axel Dengler, Sonja Löwa und Prof. Dr.-Ing. Dieter Scholz. Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei Andy Williams und Sanjiv Mooneeram vom Airbus Future Office in Bristol bedanken.

Ich möchte mich auch bei meiner Familie bedanken, vor allem bei meiner Mutter Azadeh Ahmadi Olia, meinem Vater Prof. Dr.-Ing. Ali Farschtschi, meinem Bruder Mohammad Farschtschi und meinem Schwiegervater Karsten Dziadek.

Zum Schluss möchte ich dem Menschen danken, der mich über die Jahre immer unterstützt hat, immer für mich da war und vor wenigen Monaten unsere Tochter Niki zur Welt brachte, meine Frau Lilian Farschtschi.

Diese Arbeit möchte ich meiner Tochter Niki widmen und ihr mitgeben, dass man alles im Leben erreichen kann.

Yousef Farschtschi  
Hamburg, im Januar 2015



# INHALTSVERZEICHNIS

1. Einführung .....	1
1.1. Allgemeine Problemstellung .....	1
1.2. Stand der Technik .....	3
1.4. Aufbau der Arbeit .....	4
1.3. Ziele der Arbeit .....	5
2. Theoretische Grundlagen .....	7
2.1. Grundlagen des Schwarmverhaltens .....	7
2.1.1. Grundlagen des biologischen Schwarmverhaltens .....	7
2.1.1.1. Negative Rückkopplung .....	9
2.1.1.2. Positive Rückkopplung .....	10
2.1.1.3. Stigmergie .....	10
2.1.2. Insekten .....	11
2.1.3. Vögel .....	12
2.2. Schwarmverhalten von Flugzeugen im Formationsflug .....	14
2.2.1. Stand der Forschung .....	15
2.2.2. Theoretische Grundlagen des Formationsflugs .....	19
2.2.2.1. Grundlagen der Aerodynamik .....	19
2.2.2.2. Wirbelschleppen .....	22
2.2.2.2.1. Entstehung und Aufbau .....	23
2.2.2.2.2. Leistungersparnis im Formationsflug .....	26
2.2.2.2.3. Klassifizierung von Flugzeugen .....	28
2.2.2.3. Flugleistung .....	30
2.2.3. Routenplanung am Beispiel der Nord Atlantik Route .....	33
2.2.3.1. Zuteilung der Flugrouten nach OTS .....	33
2.2.3.2. Aufteilung von NATS in Slots .....	35
2.2.4. Formationstypen .....	37

---

2.2.4.1. V-Formation .....	38
2.2.4.1.1. Formationsbildungsalgorithmus.....	39
2.2.4.1.2. Formationsrotationsalgorithmus.....	41
2.2.4.2. Echelon-Formation .....	42
2.2.4.2.1. Formationsbildungsalgorithmus.....	43
2.2.4.2.2. Formationsrotationsalgorithmus.....	44
2.2.4.3. Umgekehrte V-Formation.....	46
2.2.4.3.1. Formationsbildungsalgorithmus.....	48
2.2.4.3.2. Formationsrotationsalgorithmus.....	51
2.2.4.4. Rauten-Formation .....	54
2.2.4.4.1. Formationsbildungsalgorithmus.....	55
2.2.4.4.2. Formationsrotationsalgorithmus.....	57
2.2.4.5. Delta-Formation.....	58
2.2.4.5.1. Formationsbildungsalgorithmus.....	59
2.2.4.5.2. Formationsrotationsalgorithmus.....	60
2.2.4.6. Notfallsituationen eines Flugzeugs in Formation .....	61
2.3 Zusammenfassung .....	69
3. Konzeptueller Entwurf für die agentenbasierten Modellierung zur Untersuchung des zivilen Formationsfluges .....	73
3.1. Begriffliche und methodische Grundlagen.....	73
3.1.1. UML Aktivitätsdiagramme zur Beschreibung des Agentenworkflows.....	75
3.1.2. Software Frameworks für agentenbasierte Modellierung.....	77
3.2. Formationsflug.....	79
3.2.1. CPACS Datenstruktur zur Übergabe von Input-Parametern .....	80
3.2.2. Flugleistungsmodell für den Formationsflug.....	83
3.2.2.1. Adaptierter Entwurf aus dem BADA-Projekt.....	83
3.2.2.2. Validierung und Verifikation des adaptierten Entwurfs .....	86
3.2.3. Agentenverhalten .....	90



---

3.2.3.1. Gesamtworkflow .....	90
3.2.3.2. Positionierung der Agenten innerhalb der Formation.....	97
3.3. Zusammenfassung .....	100
4. Prototypische Umsetzung .....	103
4.1. Framework zur Modellierung des Formationsflugs .....	103
4.1.1. Implementierte CPACS-Struktur für die agentenbasierte Simulation .....	103
4.1.2. Main-Klasse .....	104
4.1.3. Agentenklasse .....	107
4.1.4. Experimentelle Ergebnisse.....	117
4.2. Zusammenfassung .....	123
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	125
5.1. Zusammenfassung .....	125
5.2. Ausblick.....	126
LITERATUR.....	129
APPENDIX .....	137
A.1. Software Agent .....	137
A.2. Klassendiagramm Flugleistungsmodell.....	141
A.3. CPACS-Struktur .....	142
A.4. Missionsergebnisse .....	144

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1 Emissions- und Geräuschziele verschiedener internationaler Einrichtungen .....	2
2.2 Verschiedene Kategorien des Helferverhaltens .....	9
2.3 Beispiel für negative Rückkopplung .....	10
2.4 Beispiel für negative und positive Rückkopplung .....	10
2.5 Logistischer Anstieg der Ameisen zwischen Nahrungsquelle und Ameisenbau .....	12
2.6 Kraniche im Formationsflug .....	13
2.7 Relative Leistungersparnis.....	16
2.8 Wirbel eines McDonnell Douglas F/A-18 Kampfflugzeugs.....	17
2.9 Anstellwinkel während des Horizontalflugs .....	21
2.10 Kräftebeziehung an einem Flugzeug im Horizontalflug.....	22
2.11 Wirbelschleppe.....	23
2.12 Prandtls Aeroplantheorie.....	24
2.13 Angenäherte Tangentialgeschwindigkeiten eines Wirbels nach Hallock Burnham .....	26
2.14 Wirbelschleppe um ein Flugzeug.....	26
2.15 Wirbelausbreitung in einer Echelon-Formation.....	27
2.16 Aerodynamik des führenden Flugzeugs.....	27
2.17 Aerodynamik des hinteren Flugzeugs .....	28
2.18 ICAO Flugzeugklassifizierung.....	30
2.19 Full und flat rated thrust .....	31
2.20 Schichtung der Atmosphäre .....	32
2.21 Flugsicherungen für den Nordatlantik.....	34
2.22 Beispiel für den OTS.....	35
2.23 Abstände im OTS .....	35
2.24 Aufteilung von NATS in Slots .....	37
2.25 Positionierung in einer V-Formation.....	39
2.26 Formationsbildung - V-Formation .....	40
2.27 Rotation einer V-Formation .....	42
2.28 Positionierung in einer rechtsseitigen Echelon-Formation .....	43

---

2.29	Bildung einer Echelon-Formation.....	44
2.30	Rotation einer Echelon-Formation.....	45
2.31	Positionierung in einer umgekehrten V-Formation.....	46
2.32	Bildung einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 1.....	48
2.33	Bildung einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 2.....	50
2.34	Rotation einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 1.....	52
2.35	Rotation einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 2.....	53
2.36	Positionierung in einer Rauten-Formation.....	54
2.37	Bildung einer Rauten-Formation.....	57
2.38	Rotation einer Rauten-Formation.....	58
2.39	Positionierung in einer Delta-Formation.....	59
2.40	Bildung einer Delta-Formation.....	60
2.41	Rotation einer Delta-Formation.....	61
2.42	Rekonfiguration einer V-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs.....	63
2.43	Rekonfiguration einer Echelon-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs.....	64
2.44	Rekonfiguration einer umgekehrten V-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs (nach Konzept 1).....	65
2.45	Rekonfiguration einer umgekehrten V-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs (nach Konzept 2).....	66
2.46	Rekonfiguration einer Rauten-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs.....	67
2.47	Rekonfiguration einer Delta-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs.....	68
2.48	V- und umgekehrte V -Formation nach Ning et al.....	70
3.1	Von-Neumann- und Moor-Nachbarschaft.....	74
3.2	Schwarm von Boids nach Reynolds.....	75
3.3	Verwendete Symbole für UML-Aktivitätsdiagramme.....	76
3.4	Beispiel für einen zyklischen Prozess.....	77
3.5	Schwierigkeit der Modellierung gegenüber der Mächtigkeit eines Simulationsframeworks.....	78
3.6	UML Verteilungsdiagramm des Gesamtsystems.....	80
3.7	Koordinaten einer linearen Wirbelschlepe.....	82
3.8	Kraftstoffverbrauch eines Airbus A340-600 und A380-841 auf der Formationsstrecke.....	89

---

3.9	Gesamtworflow der Agenten von Start bis Landung .....	92
3.10	Verschiedene Positionierungen der Flugzeuge in einer V-Formation und deren durchschnittliche Luftwiderstandsreduzierungen .....	98
3.11	Entscheidungsbaum für das Branch-and-Bound Verfahren .....	99
3.12	Zusammenfassung von Agentenpaaren zur Anwendung des Branch-and-Bound Verfahrens.....	99
3.13	Optimale Formationsposition nach Regel 3.1 .....	100
4.1	UML-Diagramm der CPACS-Struktur .....	104
4.2	GIS-Umgebung des Formationsflugs in ArcMap .....	105
4.3	Simulationsoberfläche des Formationsfluges.....	106
4.4	Zustandsdiagramm der Agentenklasse Aircraft (alle Subsysteme).....	109
4.5	Zustandsdiagramm der Agentenklasse Aircraft Start bis Treffpunkt.....	110
4.6	Zustandsdiagramm der Agentenklasse.....	111
4.7	Zustandsdiagramm der Agentenklasse.....	112
4.8	Zustandsdiagramm der Agentenklasse.....	113
4.9	Zustandsdiagramm der Agentenklasse.....	114
4.10	Bestimmung des Simulationsabstandes innerhalb der Formation.....	116
4.11	Kostensparnis in der Formationsstrecke .....	119
4.12	Treibstoffersparnis in der Formationsstrecke mit Flugzeugmix .....	120
4.13	Treibstoffersparnis in der Formationsstrecke ohne Flugzeugmix.....	121
5.1	Verteilte Strukturierung der Simulation .....	128
A.1.1	Kategorien von Software-Agenten nach Nwana .....	138
A.1.2	Einfacher Reflex-Agent nach Russell und Norvig .....	139
A.1.3	Modellbasierter Reflex-Agent nach Russell und Norvig .....	139
A.1.4	Zielbasierter Agent nach Russell und Norvig .....	140
A.2.1	Klassendiagramm des Flugleistungsmodells.....	141
A.4.1	Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix .....	144
A.4.2	Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix .....	145
A.4.3	Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix.....	146
A.4.4	Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix .....	147

---

A.4.5 Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation ohne Rotation und ohne Flugzeugmix .....	148
A.4.6 Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation mit Rotation und ohne Flugzeugmix .....	149
A.4.7 Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation ohne Rotation und ohne Flugzeugmix ..	150
A.4.8 Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation mit Rotation und ohne Flugzeugmix.....	151
A.4.9 Mission CDGtoBOS3478 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix .....	152
A.4.10 Mission CDGtoBOS3478 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix .....	153
A.4.11 Mission CDGtoBOS3478 in V-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix.....	154
A.4.12 Mission CDGtoBOS3478 in V-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix .....	155
A.4.13 Mission AMStoJFK5634 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix .....	156
A.4.14 Mission AMStoJFK5634 in Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix .....	157
A.4.15 Mission AMStoJFK5634 in V-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix.....	158
A.4.16 Mission AMStoJFK5634 in V-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix .....	159



## TABELLENVERZEICHNIS

2.1	Wake Turbulence Separation Minima.....	29
3.1	Gegenüberstellung von Repast Symphony und AnyLogic .....	78
3.2	Annahmen zur Reduzierung der Luftwiderstandskraft .....	83
3.3	Parameter und Variablen des Flugleistungsmodells .....	86
3.4	Erläuterungen zu FLM .....	87
3.5	Erläuterungen zu ZEF .....	93
3.6	Erläuterungen zu ROT <sub>zeit</sub> und ROT.....	95
3.7	Erläuterungen zu POK .....	96
3.8	Erläuterungen zu REK .....	96
3.9	Erläuterungen zu FED.....	97
4.1	Zuordnungen für den Formationsflug .....	118
4.2	Versuchsmatrix für den Formationsflug .....	119
A.3.1	CPACS Struktur .....	142





## Glossar

ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
AFF	Autonomous Formation Flight
AUW	All Up Weight
BADA	Base of Aircraft Data
CFF	Close Formation Flight
CPACS	Common Parametric Aircraft Configuration Schema
EFF	Extended Formation Flight
EU	Europäische Union
EUROCONTROL	European Organisation for Safety of Air Navigation
FFIS	Formation Flight Instrumentation System
FMC	Flight Management Computers
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
ICAO	International Civil Aviation Organization
ISA	International Standard Atmosphere
MTOW	Maximum Take-Off Weight
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NATS	North Atlantic Track System
NLA	New Large Aircrafts
OAC	Oceanic Control Centre
OTS	Organized Track System
TCAS	Traffic-Alert and Collision Avoidance System
TSFC	Thrust Specific Fuel Consumption
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCLA	University of California, Los Angeles
WGS	World Geodetic System
ZA	Zellular Automat



# 1. Einführung

In dieser Arbeit wird gezeigt, wie mit Hilfe von Schwarmverhalten die Luftfahrt optimiert werden kann. Der Fokus dieser Arbeit ist auf den Formationsflug von Passagierflugzeugen gerichtet. Zu dessen Untersuchung wird ein neuartiges Konzept zur agentenbasierten Modellierung vorgestellt und dessen prototypische Implementierung präsentiert.

Im Folgenden wird der Aufbau der Arbeit vorgestellt.

## 1.1. Allgemeine Problemstellung

Die Luftfahrt muss seit der Weltwirtschaftskrise von 2008/2009 von sinkenden Passagierzahlen ausgehen. Deutschlands größter Flughafen in Frankfurt erwartet, aufgrund der schwachen europäischen Wirtschaftskraft, für das aktuelle Jahr (2013) eine Stagnation der Passagierzahlen [AIR13]. Vor diesem Hintergrund ist die Bereitschaft der Fluggesellschaften zu finanziellen Einsparungen groß.

Die europäische Organisation zur Koordination des Luftverkehrs (engl. „European Organisation for Safty of Air Navigation“; kurz EUROCONTROL) fasst in ihrem letzten Bericht (März 2013) zusammen, dass europaweit für das aktuelle Jahr (2013) mit einer Abnahme der Flugbewegungen um 1,3% gegenüber dem letzten Jahr zu rechnen ist. Trotzdem geht der Bericht davon aus, dass in Europa in den nächsten Jahren wirtschaftliches Wachstum zu erwarten ist. Für die kommenden Jahre wird ein jährliches Wachstum der Flugbewegungen um ca. 3% angenommen [EUR13]. Der Rohölpreis (der Sorte West Texas Intermediate) kostete im Jahre 2012 im Durchschnitt ca. \$94 pro Barrel [INFD12] und Vorhersagen für 2013 sagen, dass er die \$100 Marke übersteigen wird. Der europäische Luftfahrtforschungverbund "Advisory Council for Aeronautics Research in Europe" (ACARE), der aus dem 7. EU-Rahmenprogramm für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration (FP7) entstanden ist, erklärte eine 80% bzw. 50% Reduzierung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) bzw. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) Emissionen als kurzfristiges Ziel bis zum Jahr 2020 für die Europäische Union (EU) ([ACA01], [ACA10]). Die EU fordert in ihrer Agenda, dem sogenannten „Flightpath 2050“, eine Reduzierung der Emissionen NO<sub>x</sub> und CO<sub>2</sub> um 90% bzw. 75% als längerfristiges Ziel für den Zeitraum 2050 [EUC11]. In Abbildung 1.1 werden die internationalen Ziele zur Reduzierung der Emissionen und des Lärmpegels in der Luftfahrt dargestellt.

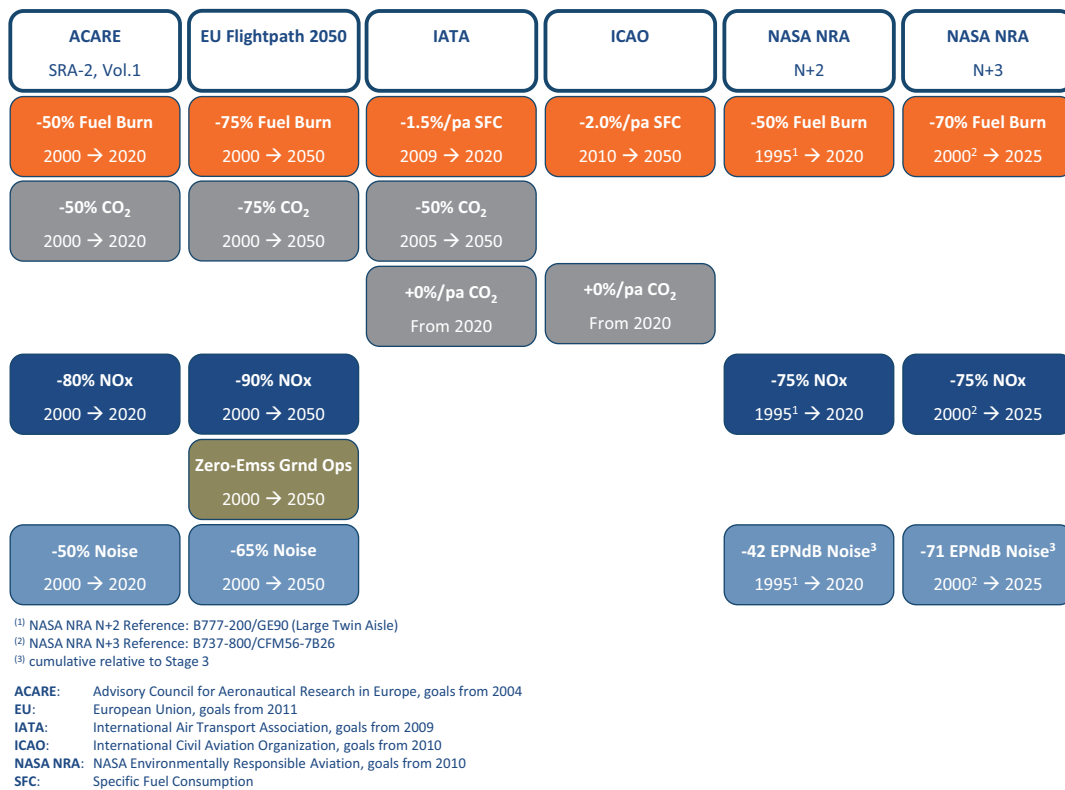


Abbildung 1.1 Emissions- und Geräuschziele verschiedener internationaler Einrichtungen  
(Quelle Arne Seitz - Bauhaus Luftfahrt)

Vor dem Hintergrund der zu erreichenden Ziele und der preislichen Entwicklung des Rohöls gilt hinsichtlich der Kosten/Nutzen Relation, vorhandene Strukturen weiter zu optimieren und teure Großprojekte genauestens zu prüfen. Fluggesellschaften setzen verstärkt auf effizientere Flugzeugtypen in ihren Flotten, so dass die Flugzeugbauer bewährte Flugzeugmodelle mit effizienteren Triebwerken ausstatten müssen wie beim geplanten A320 Neo und B737 Max. Der Trend zu effizienteren Flugzeugen zeigt sich auch an Boeings Entscheidung die B787 Dreamliner zu entwickeln anstatt in direkter Konkurrenz zum Airbus Superjumbo A380 zu treten. Die Fertigung größerer Flugzeugtypen wie der A380-900, der eine ca. 7m längere Version der A380-800 ist, wurde dagegen aufgrund der geringen Nachfrage von 2015 auf 2020 verschoben [AIR13a].

Das Phänomen Formationsflug und die daraus entstehende Energieeinsparung würde aus ökonomischer und ökologischer Sicht für die zivile Luftfahrt langfristig eine Möglichkeit sein. Flugzeuge, die unterschiedliche Start- und Zielpunkte haben, können wie in der Natur einen gemeinsamen Teil der Strecke in Formation zurücklegen. So würden beispielsweise Flugzeuge, die von verschiedenen Flughäfen in Europa starten und zu verschiedenen Zielen nach Nordamerika möchten, eine Formation an einem Treffpunkt bilden und die gemeinsame

Nordatlantikroute im Verbund fliegen. An einem entsprechenden Punkt würden sich diese Flugzeuge wieder trennen und den letzten Teil der Strecke alleine weiterfliegen.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die algorithmische Seite des Formationsfluges und untersucht den Ablauf für beliebig viele Flugzeuge (teilweise veröffentlicht in [FAR12] und [FAR13]). Hierzu werden konzeptuell die Algorithmen zur Bildung, zur Rotation, des Haltens der Position und der Rekonfiguration nach einem Ausfall für die V-, Echelon-, umgekehrte V-, Rauten- und Delta-Formation entwickelt und untersucht. Als weitere innovative Neuheit wurde in dieser Arbeit eine agentenbasierte Simulation als Testumgebung entwickelt, um die Algorithmen der verschiedenen Formationen zu untersuchen. Mithilfe eines adaptierten Flugleistungsmodells werden die V- und Echelon-Formationen in einem Relativvergleich zwischen Allein- und Formationsflug untersucht.

Im folgenden Abschnitt wird der Stand der Technik grob dargestellt.

## 1.2. Stand der Technik

Schwarmverhalten ist durch Aggregation einer Vielzahl von Individuen und einer daraus resultierenden Verhaltensstruktur gekennzeichnet. In der Luft kann das für Passagierflugzeuge gelten.

Das Phänomen Formationsflug wird in der Natur bei Zugvögeln beobachtet, um Energie während der zu überwindenden großen Distanzen einzusparen. Der Formationsflug wird seit langem in der militärischen Luftfahrt eingesetzt, mit dem Ziel, operationelle Vorteile wie den Feuerschutz und den gebündelten Angriff zu nutzen. Der Effekt der Einsparung von Flugleistung und folglich Kraftstoff während des Formationsfluges wurde bereits 1916 von Wiselsberger [WIE1916] beschrieben und jetzt in der Luftfahrtindustrie weiter verfolgt [ABS13d]. Die Vorteile des Formationsflugs beruhen auf der Wirbelschlepe, die an einer Flügelspitze entstehen und von einem dahinter fliegenden Flugzeug genutzt werden können, um den Auftrieb an dem entsprechenden Flügel zu erhöhen und den Schub bei gleicher Geschwindigkeit des entsprechenden Triebwerks bzw. Triebwerke zu reduzieren.

Bisherige Arbeiten, die auch genauer in Kapitel 2 vorgestellt werden, beschäftigen sich zumeist mit den aerodynamischen Vorteilen des Formationsflugs. Reynolds [REY87] bildete bereits mit Hilfe sogenannter Boids Schwärme ab, die zur Darstellungen von Animationen genutzt werden. Andere Forschungsarbeiten, wie die von Knoll und Beck [KNO06] beschreiben den Formationsflug für den komplett autonomen Flug, indem unbemannte Flugzeuge durch entsprechende Entscheidungsprozesse Formationen bilden. Reynolds Ansatz, der sich nur auf „mach was dein Nebenmann macht“ beschränkt, wurde für den komplexen Ablauf des Formationsfluges ziviler Passagierflugzeuge erweitert. Im Gegensatz

zu Knoll und Beck nutzt der Ansatz dieser Arbeit die aktuelle Ist-Situation des Flugbetriebs. Es wird unter anderem analysiert wie der Formationsflug organisiert werden müsste. Der Fokus liegt dann auf die Algorithmen zur Bildung der Formationen und dem weiteren Ablauf, wie z.B. der Rotation und der Rekonfiguration nach einem Ausfall. Somit werden in dieser Arbeit Algorithmen entwickelt, die zur Abbildung des Formationsflugs in dieser Form bisher noch nicht entwickelt wurden und somit einen Beitrag für die Luftfahrt und die Informatik sind.

Es werden verschiedene Formationen wie V-, Echelon, umgekehrte V-, Rauten- und Delta-Formation konzeptionell beschrieben. Der implementierte Prototyp berücksichtigt z.Z. die V- und Echelon- bzw. Staffel-Formation und bildet den Formationsflug über dem Nordatlantik ab, indem bereits zeitlich synchronisierte Flugzeuge, die an verschiedenen Flughäfen in Europa gestartet sind, an einem Treffpunkt (z.B. über der Irischen See) eine Formation bilden und die gemeinsame Route, hier die Nordatlantikroute (engl. „Nord Atlantik Track System“; kurz NATS), bis zum Formationsende (über Neufundland) zusammen fliegen. Danach löst sich die Formation auf und die Strecke bis zum Ziel wird unabhängig voneinander fortgesetzt. Im nächsten Abschnitt werden die Ziele der Arbeit kurz dargestellt.

### 1.3. Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es anhand des adaptierten Flugleistungsmodells, das den Formationsflug und den Alleinflug in Echtzeit berücksichtigt, einen Relativvergleich herzustellen und somit die neuartigen Algorithmen für die entsprechenden Formationsarten zu validieren.

Das adaptierte und implementierte Flugleistungsmodell berechnet für jeden Flug anhand triebwerkspezifischer Daten und mit bzw. ohne den reduzierten Luftwiderstandskraft den Kraftstoffverbrauch für den Formationsflug bzw. Alleinflug. Damit kann, vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen, eine Aussage über individuelle Formationen getroffen werden. So zeigt sich anhand der durchgeführten Szenarioanalyse, dass die V-Formation neben dem kleineren Lufttransportlot mit einer durchschnittlichen Kraftstoffersparnis von 6,62% am effizientesten ist.

Dieses Simulationsmodell wurde mit Hilfe der auf Java basierenden Simulationsumgebung AnyLogic [XJT13] für den Formationsflug implementiert. Als Eingangsparameter werden flugzeugspezifische Informationen (u.a. Flugzeugmaße, aerodynamische Daten und Wirbelschleppendaten), missionsspezifische Daten (u.a. Wegpunkte mit entsprechenden Trajektorien) sowie formationsspezifische Angaben (u.a. Missionsnamen der Formationsteilnehmer und Formationstyp) in der vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) entwickelten CPACS-Struktur [DLR12] (kurz für „Common Parametric

---

Aircraft Configuration Schema“) an die Simulationsumgebung übergeben. Diese Struktur basiert auf „eXtensible Markup Language“ (XML) und ist zur Erfassung von Flugzeugdaten vorgesehen, womit auf bereits vorhandenen Strukturen und Daten aufgesetzt werden konnte. Im Rahmen der Arbeit werden verschiedene Formationstypen wie V-, Echelon-, umgekehrte V-, Rauten- und Delta-Formation und Algorithmen zum Aufbau sowie zur Rotation vorgestellt, bei der sich alle Flugzeuge sich an der Spitze abwechseln und zur Rekonfiguration, so dass im Falle eines Ausfalls die Formation wieder geschlossen werden kann.

Der Aufbau der Arbeit wird im nächsten Abschnitt dargestellt.

#### 1.4. Aufbau der Arbeit

Im nächsten Kapitel werden theoretische Grundlagen der Arbeit vorgestellt, untersucht und entwickelt. Hierzu werden zunächst die Grundlagen des Schwarmverhaltens, die zur Optimierung der luftfahrtbezogenen Probleme benutzt werden, dargestellt. Die grundsätzlichen Phänomene werden im Zusammenhang mit den Arten wie Insekten, Säugetiere und Vögel dargestellt. Darüber hinaus werden Grundlagen des Formationsflugs betrachtet. Neben dem Stand der Forschung auf diesem Gebiet werden theoretische Grundlagen vorgestellt. Hierzu werden Grundlagen der Aerodynamik, der Wirbelschleppen und der Flugleistung behandelt. Danach wird die Routenplanung am Beispiel vom NATS vorgestellt und die Erweiterung diesen für den Formationsflug entwickelt. Der Schwerpunkt dieses Kapitels sind Algorithmen zum Bilden, Rotieren und Rekonfigurieren der verschiedenen Formationstypen.

In Kapitel 3 wird ein konzeptueller Entwurf zur agentenbasierten Modellierung des Formationsflugs entwickelt. Dazu werden in diesem Kapitel wichtige Grundlagen der Agentensimulationen vorgestellt. Danach werden die „Unified Modeling Language“ (UML), Aktivitätsdiagramme und deren Erweiterung beschrieben. Der Schwerpunkt dieses Kapitels ist die konzeptuelle Modellierung des Formationsflugs einschließlich der Beschreibung der CPACS Datenstruktur, des Entwurfs eines Flugleistungsmodells und dem Agentenverhalten.

Die prototypische Implementierung wird in Kapitel 4 vorgestellt. Hierbei werden zu jedem Simulationsmodell die jeweiligen Simulationsergebnisse diskutiert.

Abschließend wird ein Ausblick für weitere Forschungsarbeiten in diesen Gebieten aufgezeigt.





## 2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen des Formationsflugs vorgestellt. Diese unterteilt sich in zwei Abschnitte, die sich mit den Grundlagen des Schwarmverhaltens und dem Schwarmverhalten im Formationsflug beschäftigen. Die Grundlagen des Schwarmverhaltens umfassen dabei die biologischen Aspekte. Das Schwarmverhalten des Formationsflugs umfasst neben dem Stand der Technik des Formationsflugs, theoretische Aspekte der Flugzeugaerodynamik, Grundlagen der Routenzuweisung und eine entwickelte Erweiterung für den Formationsflug. Der Fokus dieses Abschnittes liegt auf den entwickelten Algorithmen zur Bildung, zum Halten, zur Rotation und zur Rekonfiguration der verschiedenen Formationstypen.

### 2.1. Grundlagen des Schwarmverhaltens

Der Formationsflug, der bereits erfolgreich in der militärischen Luftfahrt eingesetzt wird, zeigt Potential für den Einsatz in der zivilen Luftfahrt. Ähnlich wie bei Zugvögeln können Passagierflugzeuge innerhalb einer Formation Energie einsparen dadurch, dass ihr Auftrieb durch die Wirbelschleppe eines vorausfliegenden Flugzeugs erhöht wird. Für solch ein Vorhaben müssen die Algorithmen zur Bildung, zum Halten und Rotieren der Formation entwickelt werden. Das Phänomen des Formationsflugs ist in der Natur bei Zugvögeln zu beobachten und dieses mutualistische Verhalten ist für das Fliegen weiter Strecken obligatorisch.

In diesem Kapitel wird vor dem Hintergrund des Formationsflugs das aus der Biologie bekannte Schwarmverhalten anhand biologischer Phänomene und verschiedener Tierarten kurz vorgestellt und der Bezug zur Luftfahrt hergestellt.

#### 2.1.1. Grundlagen des biologischen Schwarmverhaltens

Schwarmverhalten ist ein aus der Biologie stammender Begriff, der das Verhalten aggregierender Individuen kennzeichnet. Die Individuen sind im klassischen Sinne Fische, Vögel und Insekten, aber auch Säugetiere und auch Neuronen des Gehirns weisen derartiges Verhalten auf, beispielsweise bei Tieren während der Nahrungssuche und als Schutzmechanismus vor Fressfeinden. Sardinen (*Sardina pilchardus*) bilden große Schwärme, um sich vor Fressfeinden zu schützen. Hierbei halten die Fische mittels des Seitenlinienorgans genaue Abstände zu anderen Artgenossen und erwecken den Eindruck eines größeren Organismus.

Schwarmintelligenz bezeichnet die kognitive Wahrnehmungskraft, wohingegen Schwarmverhalten die daraus resultierende Handlung umfasst. Dieser Begriff wurde von Beni

und Wang [BEN93] im Zusammenhang mit zellularen robotischen Systemen eingeführt, ist jedoch auch von Francis Galton bereits 1907 in einem Experiment zur Schätzung des Gewichts eines Ochsen eingeführt worden [GAL1907]. In der Literatur gibt es jedoch keine allgemeinen Definitionen dieser Begrifflichkeiten, weshalb in dieser Arbeit die Definition von Jens Krause et. al [KRA10] verwendet wird, die Schwarmintelligenz wie folgt definiert.

Definition 2.1: *Schwarmintelligenz*

*"Two or more individuals independently, or at least partially independently, acquire information and these different packages of information are combined and processed through social interaction, which provides a solution to a cognitive problem in a way that cannot be implemented by isolated individuals."*

*(zitiert aus [KRA10], S. 28)*

Ein weiterer begrifflicher Terminus, der in diesem Rahmen relevant ist, sind selbstorganisierende Systeme. Dieser umfasst sowohl das Verhalten als auch die Intelligenz eines Schwarms und beschreibt das System als Ganzes. Dies ist laut Camazine et al. wie folgt definiert:

Definition 2.2: *Selbst-Organisation:*

*"Self-organization is a process in which pattern at the global level of a system emerges solely from numerous interactions among the lower-level components of the system. Moreover, the rules specifying interactions among the system's components are executed using only information, without reference to the global pattern. "* (zitiert aus [CAM01], S. 8)

Bei näherer Betrachtung der Definitionen 2.1 und 2.2 kann eine gewisse Ähnlichkeit festgestellt werden. Jedoch ist die Betrachtungsweise der Definitionen unterschiedlich, da die erste sich auf das Individuum und die zweite sich auf das System bzw. den Schwarm bezieht. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie Tiere sich untereinander verhalten können. In Abbildung 2.2 werden die zugehörigen Begriffe aus der Verhaltensforschung anhand von Beispielen erläutert. Mutualismus bezeichnet den egoistischen gemeinsamen Gewinn von Fitness. Ein Löwenrudel jagt gemeinsam und auch rangniedrige Tiere profitieren von der Jagt, obwohl sie beim Verzehr der Nahrung warten müssen. Dabei beziehen sich die Verhaltenskategorien auf die biologische Fitness. Obligater Altruismus bezeichnet den vollständigen Verlust von Fitness durch die Unterordnung des Individuums dem Kollektiv.

Honigbienenarbeiter stellen beispielsweise ihr Wohl hinter dem Schwarm. Fakultativer Altruismus bezeichnet den temporären Verlust von Fitness. Das Beispiel der Buschhähler zeigt, dass Jungtiere lange Jahre bei den Eltern bleiben und beim Nestbau helfen und diesen sogar erben können. Reziprozität bezeichnet den verzögerten Gewinn der Fitness, der sich beispielsweise bei Vampirfledermäusen durch das Teilen von Nahrung mit weniger erfolgreichen Artgenossen zeigt. Der Begriff Fitness wird nach Kappeler wie folgt definiert.

Definition 2.3: *Fitness*:

*"Die Fitness charakterisiert letztendlich den Gesamtfortpflanzungserfolg eines Individuums. Sie berücksichtigt dabei die Auswirkungen individueller Variabilität auf den relativen Anteil der zugrundeliegenden genetischen Information für den Genpool der nächsten Generation."* (Quelle S.32 [KAP12])

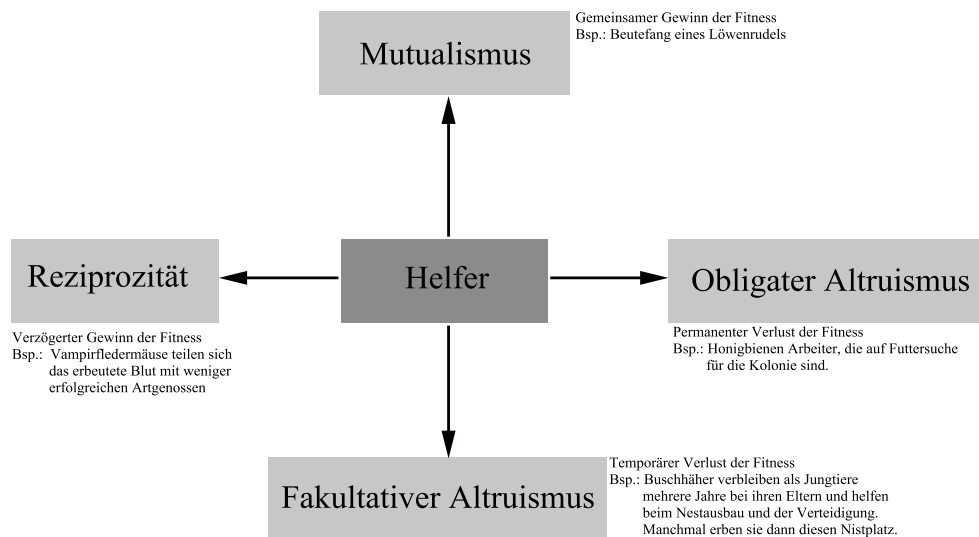


Abbildung 2.2. Verschiedene Kategorien des Helferverhaltens (vgl. [ALC05] S.443)

Neben den Verhaltenskategorien der Individuen (Abbildung 2.2) zueinander gibt es verschiedene Phänomene, die für die Selbst-Organisation der Arten zuständig sind. In den folgenden Unterkapiteln werden einige dieser Phänomene kurz erläutert, die grundlegende Mechanismen darstellen, die zur Simulation des Formationsflugs berücksichtigt werden können.

#### 2.1.1.1. Negative Rückkopplung

Dieses Phänomen wirkt entgegenwirkend, so reguliert sich beispielsweise die Population einer Tierart, indem durch die steigende Population und gleichzeitiger Verminderung des Nahrungsvorkommens das Wachstum dieser Art verlangsamt wird.

Abbildung 2.3 zeigt, wie die Größe eines Flugzeugs die Wirbelschleppengröße beeinflusst und somit die Effizienz der Formation erhöht (siehe auch Abschnitt 2.2).

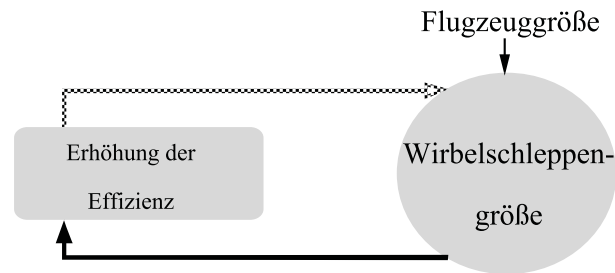


Abbildung 2.3 Beispiel für negative Rückkopplung (Quelle: [CAM01])

### 2.1.1.2. Positive Rückkopplung

Die positive Rückkopplung wirkt sich verstärkend aus und ist in vielen biologischen Systemen zu finden. Hier gilt die Regel: "Ich mache, was du machst". Viele Vogelarten wie Seemöwen oder Amseln werden von größeren Kolonien als Nistplatz angezogen, um sich vor Räubern zu schützen oder um schneller Futter zu finden.

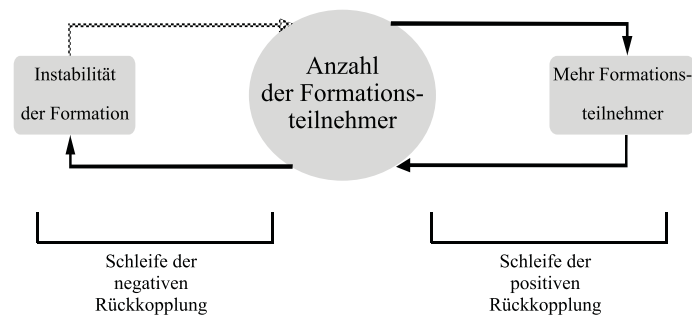


Abbildung 2.4 Beispiel für negative und positive Rückkopplung (Quelle: [CAM01])

Abbildung 2.4 veranschaulicht die Kombination der positiven und negativen Rückkopplung. So steigt beispielsweise die Anzahl der Formationsteilnehmer und somit die Formationsgröße und gleichzeitig sinkt die Stabilität der Formation. In einem weiteren Beispiel würde jedes Flugzeug sich z.B. nach dem vorausfliegenden Flugzeug richten und dieselben Manöver versetzt fliegen (siehe auch Abschnitt 2.2).

### 2.1.1.3. Stigmergie

Der Begriff Stigmergie ist auf den französischen Biologen Pierre-Paul Grassé [GRA59] zurückzuführen, der mit diesem Begriff das rekursive Verhalten von Termiten beim Nestbau beschreibt. Stigmergie kann nach Grassé wie folgt definiert werden.

---

**Definition 2.4: Stigmergie**

*Information aus lokalen Umgebungen und sich in Arbeit befindliche Tätigkeiten ("work-in-progress") können zu neuen Aktivitäten führen. Stigmergie beschreibt keine direkte Kommunikation, sondern ist das Produkt von zuvor getätigter Arbeit und führt zu neuen Arbeiten. (vgl. [CAM01], [GRA59])*

Beispielsweise verhalten sich Termiten beim Nestbau rekursiv, d.h. sie reagieren auf die Tätigkeit anderer Termiten. Hierbei versehen Termiten Erdpartikel, die sie zum Bau verwenden, mit Pheromonen, die weitere Termiten anziehen.

Im Kontext des Formationsflugs würde ein Konzept verfolgt, indem z.B. Formationsrouten autark gesucht und bewertet werden.

In diesem Abschnitt wurden einige Phänomene der Natur vorgestellt, die Grundlagen des Schwarmverhaltens sind. In den folgenden Abschnitten werden diese im Zusammenhang mit relevanten Tierarten beschrieben.

## 2.1.2. Insekten

Schwarmverhalten ist bei Insekten ein notwendiges Phänomen. Insekten verhalten sich zumeist altruistisch, d.h. sie ordnen sich dem Kollektiv obligatorisch unter. So hat das Individuum einen permanenten Verlust von Fitness im Gegensatz zum Schwarm (siehe Definition 2.3). In diesem Abschnitt soll anhand von zwei Beispielen gezeigt werden, wie sich Insekten mit der Hilfe der Grundlagen aus Abschnitt 2.1.1 im Schwarmverhalten bzw. sich selbst organisieren.

Ameisen sind ein klassisches Beispiel für das Schwarmverhalten in der Biologie. Bei der am weitesten in Europa vertretenen Ameisenart, der Schwarzen Wegameise (*Lasius niger*), ist das am einfachsten zu beobachtende Verhalten die Nahrungssuche, bei der Kundschafter ausschwärmen, um Nahrungsquellen zu finden. Wird eine Nahrungsquelle gefunden, kann im Laufe der Zeit beobachtet werden, dass sich immer mehr Ameisen auf einem unsichtbaren Pfad zu dieser Nahrungsquelle bewegen ([HOE90], [TRA95]). Hierbei kommt unter anderem die Stigmergie aus Definition 2.4 zum Tragen. Ameisen geben bei der Aufnahme der Nahrung, der Ankunft am Bau und der erneuten Wiederaufnahme der Pheromonspur zur Nahrungsquelle Pheromone ab, die diesen Pfad markieren. Andere Ameisen greifen auf diesen Informationsfluss zu und je nach Intensität dieser Pheromonspur wird der entsprechende Pfad genutzt. Die Kurve aus Abbildung 2.5 zeigt in einem Feldversuch mit einer Population von *Lasius niger* und einer in der Nähe des Baus platzierten Zuckerquelle den Anstieg der Ameisenanzahl auf dem Pfad zu dieser Nahrungsquelle.

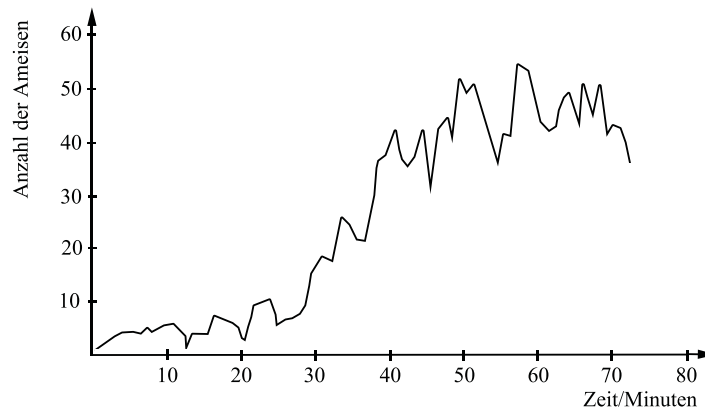


Abbildung 2.5 Logistischer Anstieg der Ameisen zwischen Nahrungsquelle und Ameisenbau  
(Quelle: [CAM01])

Das Individuum richtet sich im Laufe der Zeit nach der Entscheidung der Masse und diese Entscheidung verstärkt den entsprechenden Pfad. Es kann aber auch davon ausgegangen werden, dass sich der Ameisenschwarm auch als eine dichte heterarchische Struktur betrachten lässt, in der Individuen nicht nur auf Tätigkeiten anderer, sondern auch auf Reize im Verhalten reagieren [WIL88].

Dieses Beispiel verdeutlicht, wie sich ein Individuum eines Insektenschwarms und der Schwarm verhalten. Insektenschwärme können nicht linguistisch miteinander kommunizieren, weshalb sie sich verschiedene Phänomene zu eigen gemacht haben, um sich als Schwarm zu organisieren. So ist die Stellung einer Ameisen- bzw. Bienenkönigin nur heterarchisch zu sehen, da jedes Individuum im Schwarm seiner Aufgabe nachgeht und nur mit der Umgebung und in der Nähe befindlichen Individuen interagiert.

Dieses Phänomen kann bei der Festlegung der Flugrouten genutzt werden.

### 2.1.3. Vögel

Schwarmverhalten bei Vögeln wird gerade bei Zugvögeln während der Wanderphasen beobachtet, dabei fliegen Zugvögel in Formation, um Energie zu sparen. Wieselsberger untersuchte bereits 1916 anhand von Beobachtungen den Formationsflug [WIE1916] (in dieser Arbeit Winkelflug genannt) von Zugvögeln. Zunächst beschrieb er die Formationsrotation bei einer V-Formation, die anhand von Beobachtungen festgestellt wurde. Laut Wieselsberger sind die geringsten Vorteile an der Spitze und an beiden Enden der V-Formation festzustellen. Diese Aussage versuchte er anhand einer theoretischen Berechnung zu begründen. Hierfür nutzt er die Prandtsche Aeroplantheorie, die in Kapitel 2.2 genauer vorgestellt wird. Aufbauend auf Wieselsberger Arbeit führte Hummel eine theoretische Analyse des Formationsflugs [HUM78] durch, dabei untersuchte er die Flügel der Vögel, die unmittelbar in der V-Formation einen reduzierten Luftwiderstand hatten und stellte dabei fest,

dass durch das Fliegen in Formation durch eine gewisse Überlappung der Flügelspitzen und durch eine geringe Höhenstaffelung die Leistungersparnis maximiert werden kann. So konnte er zusammenfassend sagen, dass die Vögel beim Formationsflug die energetischen Vorteile spüren und dass sie sich bei Abwesenheit von äußeren Störungen im Verband so anordnen, dass ein Optimum an Energieersparnis für jedes Individuum auftritt. Abbildung 2.6 zeigt Kraniche (*Grus grus*) in V-Formation, dabei wurde festgestellt, dass sogar Vögel außerhalb der Formation positiv beeinflusst werden, d.h. auch Tiere, die nicht direkt in der V-Formation eingeordnet sind, haben einen reduzierten Luftwiderstand (siehe auch [BEU86], [HUM89]).



Abbildung 2.6 Kraniche im Formationsflug

Cutts et al. [CUT94] konnten anhand von Photographien von Kurzschnabelgänsen (*Anser brachyrhynchus*) im Formationsflug ein theoretisches Modell erstellen, um Aussagen über den reduzierten Leistungsbedarf zu treffen. Anhand dieses Modells konnte eine Aussage getroffen werden, dass eine Energieeinsparung von ca. 2,4% bei den Tieren innerhalb der Formation vorherrschen muss.

Dieses Ergebnis wurde von Weimerskirch et al. anhand eines Versuchs bestätigt [WEI01]. Im Senegal (Djoudj National Park) wurden acht Rosapelikane (*Pelecanus onocrotalus*) trainiert, in Formation hinter einem fahrenden Motorboot zu fliegen. Jedes Tier wurde mit einem Herzfrequenzmessgerät ausgestattet, um die Herzfrequenz als Indiz für den Energieverbrauch beim Flug in V-Formation zu messen. Mit Hilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests, ein statistischer Test, in dem anhand von zwei gepaarten Stichproben die Gleichheit geprüft wird, konnten Testreihen miteinander verglichen werden. Dabei wurde festgestellt, dass Vögel im Formationsflug 11,4 - 14,5% geringere Herzfrequenz haben. Manche Vögel haben zwar gerade an der hintersten Position der Formation Probleme, in Formation zu bleiben, jedoch ist zu beobachten, dass auch diese Energie sparen, da ihre Flügelschlagfrequenz deutlich geringer

ist. Durch den ständigen Flügelschlag und Gleitflug ist eine Energieeinsparung von 1,7 - 3,4% festzustellen, diesen nähern sich Cutts et al. theoretischen Berechnungen der Energieeinsparung der Gänse mit 2,4% sehr gut an.

Der Vorteil des Formationsflugs bei Vögeln besteht in der Einsparung von Energie. Deshalb wissen die Vögel gerade bei inhomogenen Formationen, in denen nicht nur Tiere einer Art teilnehmen, wo sie sich innerhalb der Formation positionieren. Deshalb gelten bei der Formationsbildung die Mechanismen der positiven und negativen Rückkopplung. So stellte Hummel [HUM83] fest, dass es homogene und inhomogene Formationen gibt und dass manche Arten in der Formation nicht gewünscht sind, da sie beispielsweise manchmal zu groß sein können und dies gerade für kleinere Tiere zur Gefahr werden kann. Beispielsweise kann die Formation aufgeteilt werden, d.h. die Vögel werden von Artgenossen und Vögeln ähnlichem Ausmaß angezogen (positive Rückkopplung) und die Instabilität der Formation führt zu einer Aufteilung der Formation (negative Rückkopplung).

In dieser Arbeit wird Schwarmverhalten der Passagierflugzeuge untersucht, da anhand des Formationsflugs bei Zugvögeln messbare Vorteile dieses biologischen Verhaltens aufgezeigt werden kann. Formationsflug wird bereits bei militärischen Flugzeugen eingesetzt und kann auch bei zivilen Passagierflugzeugen eingesetzt werden, um Energie einzusparen.

Schwarmverhalten während des Formationsflugs wird im nächsten Abschnitt genauer vorgestellt. Hier wird beschrieben, welche Aspekte des Formationsflugs mit Hilfe des Agentenmodells simuliert werden können und welchen Nutzen die Luftfahrt daraus ziehen kann.

## 2.2 Schwarmverhalten von Flugzeugen im Formationsflug

Formationsflug wird bereits seit Jahrzehnten in der militärischen Luftfahrt eingesetzt. Hierbei liegt der Schwerpunkt in den verbesserten Operationsmöglichkeiten, wie dem Feuerschutz des Geschwaders oder dem Angriff im Verband, aber auch in der Kraftstoffersparnis, die bereits 1942 von Schlichting [SCHL42] untersucht wurde und im nächsten Abschnitt genauer beschrieben wird. In der militärischen Luftfahrt wird der sogenannte nahe Formationsflug (engl. Close Formation Flight; CFF) geflogen, der auf die Aerodynamik kleinerer Flugzeuge zurückzuführen ist. Abschnitt 2.1.3 verdeutlichte, dass die Natur das Phänomen Formationsflug nutzt, um Energie einzusparen. Dies ist bei Zugvögeln unerlässlich, um Distanzen über 1000 km ohne Pause zurücklegen zu können. Dieses Phänomen kann von Flugzeugen genutzt werden, indem ein Flugzeug den Auftrieb einer Wirbelschlepe eines vorausfliegenden Flugzeugs nutzt und dadurch die Triebwerksleistung seiner entsprechenden Tragfläche reduziert.



---

Das Schwarmverhalten von Flugzeugen im Formationsflug benötigt entsprechende Algorithmen zur Bildung einer Formation an einem Treffpunkt, zum Rotieren der Flugzeuge, damit beispielsweise alle Flugzeuge in einer V-Formation sich an der Spitze abwechseln und zur Rekonfiguration der Formation, falls beispielsweise die Kommunikation mit einem Flugzeug ausfällt.

Das Phänomen Formationsflug ist Schwerpunkt dieser Arbeit und wird in diesem Kapitel technisch beschrieben. Zunächst wird der aktuelle Stand der Forschung auf dem Gebiet des Formationsflugs vorgestellt, danach werden die theoretischen Grundlagen verdeutlicht und hiernach werden die verschiedenen formationsspezifischen Algorithmen vorgestellt.

### 2.2.1. Stand der Forschung

Schlichting [SCHL42] konnte aufbauend auf Wieselsbergers [WIE1916] Arbeit und der finalen Form von Prandtls Aeroplanentheorie (siehe auch Abschnitt 2.2.2.1) einen theoretischen Ansatz zum Beweis der Leistungersparnis im Formationsflug darlegen. In seiner Arbeit wurden drei verschiedene Formationstypen untersucht: V-Formation (siehe Abbildung 2.25), umgekehrte V-Formation (siehe Abbildung 2.31) und Linienformation. Er fasste zusammen, dass die V-Formation praktikabler und mit einer Leistungersparnis von ca. 14% auch am effektivsten sei.

Beukenberg und Hummel ([BEU86], [BEU90]) bewiesen im Jahre 1986 mit Hilfe von zwei Dornier Do 28 Skyservant in CFF, dass das nachfliegende Flugzeug innerhalb einer Staffelformation bzw. Echelon-Formation (siehe Abbildung 2.7) durchschnittlich bis zu 10,24% an Energie einsparen kann. Im Versuch wurde das nachfliegende Flugzeug mit entsprechenden Sensoren und zwei Bordcomputern ausgestattet. Die Testflüge wurden in den Sommermonaten und Flughöhen von 1800 und 2100 m durchgeführt, um Turbulenzen der Herbst- und Wintermonaten und den Einsatz der Enteisungsanlage zu meiden. Es wurde zunächst anhand von Prandtls Aeroplanentheorie (siehe Definition 2.9) ein mathematisches Modell zur Berechnung der Leistungersparnis entwickelt und dieses anhand der gemessenen Ergebnisse validiert (siehe Abbildung 2.7).

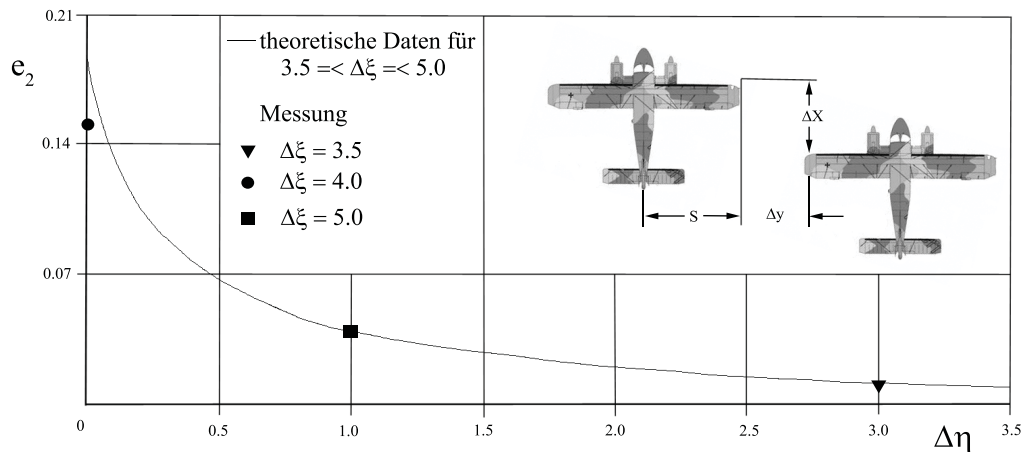


Abbildung 2.7 Relative Leistungersparnis  $e_2 = (N_0 - N_2)/N_0$  des hinteren Flugzeugs in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand  $\Delta\eta = \Delta y/s$  für verschiedene Längsabstände  $\Delta\xi = \Delta x/s$ . Vergleich von Theorie und Messungen für zwei Flugzeuge DO-28 ( $N_0 =$  Leistung im Alleinflug,  $N_2 =$  Leistung im Verbandsflug). (Zitiert aus [BEU86])

Beukenberg und Hummel konnten anhand des Feldversuchs feststellen, dass eine Verringerung des seitlichen Abstands  $\Delta y$  zu einer erhöhten Treibstoffeinsparung führt.

Ein weiterer Feldversuch wurde 2002 von Ray et. al [RAY02] von der „National Aeronautics and Space Administration“ (NASA) Dryden Flight Research Center in Edwards (Kalifornien, USA) durchgeführt. In diesem Projekt, „Autonomous Formation Flight“ (AFF) wurde unter anderem ein von der Universität Kalifornien in Los Angeles (UCLA) entwickelter Autopilot zur autonomen Formationsbildung ("Formation Flight Instrumentation System"; FFIS) getestet. Das FFIS, das in den F/A-18 Kampffjets installiert wurde, prüft ca. 20- bis 30-mal pro Sekunde die Position eines Flugzeugs. Bei ersten Tests wurde innerhalb der Formation Positionsgenauigkeiten von ca. 30 cm festgestellt. Innerhalb dieses Projekts wurden auch die Vorteile des Formationsflugs im CFF ermittelt. Beispielsweise wurde bei einem Versuchsflug mit zwei F/A-18 Kampffjets in einer Flughöhe von 25.000 Fuß (ca. 7620 Meter) und einer Geschwindigkeit von Mach 0,56 eine Reduzierung des Luftwiderstands von ca. 20% und eine Treibstoffersparnis von ca. 18% festgestellt. Abbildung 2.8 zeigt die Wirbelschlepe eines vorausfliegenden F/A-18 Hornet Kampffjets in einem Abstand von ca. 112,5 Fuß (34,29 m) zum hinteren Flugzeug. Im dunkelblauen Bereich der Wirbelschlepe ist der höchste Auftrieb und der daraus resultierende effizienteste Kraftstoffverbrauch festzustellen und ab dem gelben Bereich wird ein nachteiliger Effekt erreicht. Darüber hinaus wurden anhand der Daten Langstreckenflüge bei Mach 0,8 und einer Flughöhe von 40.000 Fuß simuliert, was der Flughöhe eines Passagierflugzeugs entspricht (der sogenannten Reiseflughöhe). Hierbei wurden unter denselben Voraussetzungen Leistungersparnisse von ca. 14% erreicht.

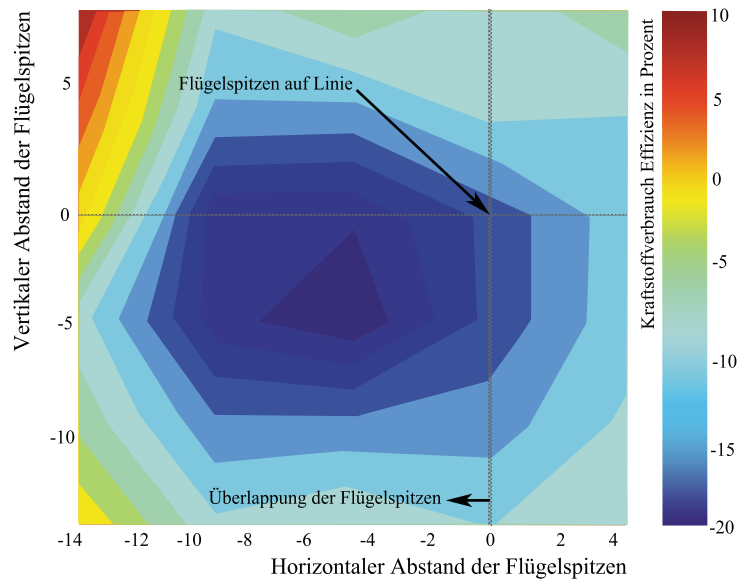


Abbildung 2.8 Wirbel eines McDonnell Douglas F/A-18 Kampfflugzeugs. Der horizontale und vertikale Abstand ist das Verhältnis zur Spannweite (37,5 Fuß = 11,43 m)

Dieses Ergebnis entspricht Schlichtings Ergebnis.

Iannotta fasste über das AFF Projekt zusammen:

*"The AFF team members are quick to point out the potential benefits of formation flight. A 10% reduction in drag on a commercial airliner traveling daily between New York and Los Angeles would translate into a savings of half a million dollars a year per aircraft, according to data supplied by Cobleigh. Emissions of carbon dioxide and nitrous oxide greenhouse gases could be reduced by 10% and 15%, respectively." (zitiert aus [LAN02]).*

Aktuellere Arbeiten wie von Pahle et al. [PAH12] untersuchten die Luftwiderstandsreduzierung des C-17 Militärtransportflugzeugs, das auf Grund seines Gewichts (maximum take off weight - MTOW 263 T) und Größe (Länge 53 m; Spannweite 50 m) Passagierflugzeugen wie dem Airbus A330 entspricht. In Testflügen mit Geschwindigkeiten von 509 km/h, Flughöhen von ca. 7600 m und longitudinalen Abständen von 1000 bis 3000 Fuß (304 bis 914m) konnte eine Luftwiderstandsreduzierung von etwas mehr als 10% gemessen werden.

Knoll und Beck [KNO06] beschreiben in ihrer Arbeit den Formationsflug in der zivilen Luftfahrt nicht im Bezug der Kraftstoffeinsparung, sondern zur allgemeinen autonomen Regulierung des Luftraums. Hierzu werden die Entscheidungsfindungsprozesse aufgezeigt und beschrieben. Darüber hinaus wird die Verringerung des Flugdurchsatzes auf den Flugstrecken hervorgehoben. Jenkinson et al. [JEN95] betrachten in ihrer Arbeit die

operationelle Seite des Formationsflugs. Dabei werden unter dem Gesichtspunkt der Erhöhung des Passagierdurchsatzes pro Lufttransportslot sogenannte "New Large Aircrafts" (NLA), die beispielsweise dem heutigen Airbus A380 entsprechen, dem Formationsflug gegenüber gestellt. Die Autoren schlagen vor, dass auf verkehrsreichen Routen sich Flugzeuge zuvor zu einer Formation zusammenschließen, um diese Route gemeinsam in Formation zu fliegen. Hierdurch würde sich ebenfalls der Passagierdurchsatz pro Lufttransportslot erhöhen, da eine Formation von der Flugsicherung als eine Flugbewegung angesehen werden kann. Um die Sicherheit des Formationsflugs zu gewährleisten, schlagen die Autoren die Nutzung des Kollisionswarnsystems "Traffic-Alert and Collision Avoidance System" (TCAS) (siehe [HAR89], [KUC07]) vor. TCAS wird bereits seit 1993 in den USA verpflichtend eingesetzt und aufgrund dessen mussten alle Fluggesellschaften, die US-amerikanischen Luftraum anfliegen wollten, dieses System nutzen. Es wird von den Autoren angemerkt, dass die Interdependenzen zwischen den verschiedenen Flugzeugsystemen näher untersucht werden müssen, um die Auswirkungen von Ausfällen von anderen Systemen vorherzusagen. Es muss dabei erwähnt werden, dass bei der Nutzung von TCAS die Abstände zu groß wären und es keine resultierende Kraftstoffeinsparung geben würde.

Systeme wie das sogenannte "Formation Flight Design System", das von Richardson et al. [RIC91] in der Firma IBM entwickelt wurde und Piloten bei der Bildung von Formationen unterstützt, zeigt, dass es bereits Systeme gibt, die für den zivilen Formationsflug adaptiert werden könnten. Dieses System wird in der US Armee bereits bei Helikoptern und Kampffjets eingesetzt und wurde auch für die Luftbetankung von Kampffjets adaptiert. Es nutzt das GPS/INS (Global Positioning System/Inertial Navigation System) Navigationskonzept, das ein INS für den Kurzzeitbereich mittels eines GPS für den Langzeitbereich kalibriert, um genauere Positionen während des Formationsfluges zu haben.

Huffaker et al. [HUF70] und Baker et al. [BAK74] beschreiben in ihren Arbeiten ein Laser-Doppler-Anemometer, das eine Wirbelschlepe, die an den Flügelspitzen eines Flugzeugs entsteht, erkennt und die Geschwindigkeiten innerhalb dieser Wirbelschlepe erfasst. Ein Laser-Doppler-Anemometer bietet die Möglichkeit eines berührungslosen optischen Messverfahrens. Dieses Verfahren könnte zur Positionierung innerhalb einer Wirbelschlepe eines vorausfliegenden Flugzeugs genutzt werden. Jedoch sind z.Z. keine Angaben über die abzuschätzenden Kosten zu finden.

Im Gegensatz zu Technologien zur Erfassung von Wirbelschleppen beschreiben Ning et al. [NIN10] einen erweiterten Formationsflug (Extended Formation Flight; EFF), der eine sichere Alternative für die zivile Luftfahrt sein soll und durch das Einhalten von bestimmten

Abständen den Einfluss der Wirbelschlepe eines vorausfliegenden Flugzeugs auf das hintere Flugzeug garantieren soll. Da die Flugzeugabstände im CFF deutlich geringer sind und dies für gewöhnliche Passagierflugzeuge zu gefährlich ist, soll laut den Autoren EFF eine sichere Alternative sein. Diese Arbeit schätzt die Einsparungen des induzierten Luftwiderstands von verschiedenen Flugzeugformationen im Zusammenhang mit unscharfen Modellparametern, wie beispielsweise Wellenausbreitung und Wellenzerfall, den Variationen der atmosphärischen Eigenschaften und Einschränkungen von Positionsgenauigkeiten ab. Dabei werden bei zwei Flugzeugen in Abständen von weniger als 10 bis 40 Flugzeugspanweiten und moderaten bis geringen atmosphärischen Turbulenzen eine Reduzierung des induzierten Luftwiderstands des Verbands um 30 +/- 3% und bei drei Flugzeugen eine Reduzierung um 40 +/- 6% festgestellt. Es wird zusammengefasst, dass EFF praktikabel sein kann bei geringen bis moderaten Turbulenzen und bei Abständen in Strömungsrichtung von 40 Spanweiten. Bei größeren Abständen können turbulente Böen eine dominante Rolle spielen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Annahmen getroffen, die dem EFF entsprechen (siehe Abschnitt 3.2.1). Anhand dieser Arbeiten wurde ein Überblick über dieses Forschungsgebiet geschaffen. Dabei wurden auch ökonomische und ökologische Vorteile des Formationsflugs ersichtlich, die zur Validierung des in Kapitel 3 vorgestellten Konzepts genutzt werden. Im nächsten Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen des Formationsflugs vorgestellt und erläutert.

### 2.2.2. Theoretische Grundlagen des Formationsflugs

In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen und Voraussetzungen des Formationsflugs vorgestellt, die für die konzeptuelle Modellierung in Kapitel 3 relevant sind. Zunächst werden einige Grundlagen der Aerodynamik zusammengefasst. Einen wesentlichen Schwerpunkt dieses Abschnitts nehmen die Wirbelschleppen ein, die, wie bereits im Abschnitt 2.1.3 erwähnt, obligatorisch für den Formationsflug sind.

#### 2.2.2.1. Grundlagen der Aerodynamik

Schub, Luftwiderstand, Auftrieb und Gewicht sind Kräfte, die während des Flugs auf ein Flugzeug einwirken. In diesem Abschnitt werden diese Kräfte anhand des unbeschleunigten Horizontalflugs beschrieben, da das adaptierte Flugleistungsmodell, das in Kapitel 3 genauer vorgestellt wird, nur diese Flugphase berücksichtigt.

**Definition 2.5: Schub**

*Der Schub ist eine nach vorne gerichtete Kraft, die durch ein Triebwerk oder einen Propeller erzeugt wird. Er überwindet dabei den vorherrschenden Luftwiderstand und wirkt im horizontalen Flug parallel zur Längsachse. (vgl. [FAA08] S. 66)*

Damit ein Flugzeug fliegen kann, muss die Schubkraft ( $F$ ) mindestens so groß sein wie die Luftwiderstandskraft ( $W$ ) und um eine konstante Fluggeschwindigkeit beizubehalten (Formel 2.2), müssen Schubkraft und Luftwiderstandskraft gleich groß sein. Ist die Schubkraft geringer als die Luftwiderstandskraft, verringert sich die Geschwindigkeit des Flugzeugs bis es sich nicht mehr in der Luft halten kann (engl. stall; Strömungsabriss). Daher kann der Schub im unbeschleunigten Horizontalflug wie in Definition 2.5 beschrieben werden.

$$F = W \quad (2.1)$$

**Definition 2.6: Luftwiderstand**

*Der Luftwiderstand ist eine rückwärtsgerichtete Verzögerungskraft, die durch die Störung des Luftstroms um den Flügel, den Rotor, den Rumpf und anderen vorstehenden Objekten verursacht wird. Der Luftwiderstand wirkt entgegengesetzt zum Schub und parallel zur relativen Windrichtung. (vgl. [FAA08] S. 66)*

Der Luftwiderstand ist die Kraft, die entgegen der Flugrichtung eines Flugzeugs wirkt. Es gibt nach [FAA08] zwei Arten von Luftwiderstand: den parasitären und den induzierten Luftwiderstand. Der Unterschied dieser beiden Luftwiderstände ist, dass der induzierte Luftwiderstand einen Aufwind an den Tragflächen im Gegensatz zum parasitären Luftwiderstand verursacht. Der Luftwiderstand kann wie in Definition 2.6 betrachtet werden. Der parasitäre Luftwiderstand setzt sich aus dem Formwiderstand, Interferenzwiderstand und dem Oberflächenwiderstand zusammen. Der Formwiderstand bezieht sich auf die Form eines Flugzeugs, d.h. er entsteht durch die Luftmassen, die sich an der Vorderseite einer Flugzeugfläche aufteilen und dahinter wieder aufeinandertreffen und Verwirbelungen verursachen. Der Interferenzwiderstand resultiert durch Flächen, die senkrecht zueinander gerichtet sind. So entsteht dieser an den Verbindungsstücken des Rumpfes und der Tragflächen, indem Luftströme um den Rumpf mit Luftströmen um die Tragflächen kollidieren und sich so ein neuer Strom bildet, der sich anders verhält als die beiden anderen Luftströme. Hierbei können beispielsweise Turbulenzen entstehen. Der

Oberflächenwiderstand wird durch den Kontakt von strömender Luft mit der Flugzeugoberfläche verursacht.

Definition 2.7: *Auftrieb*

*Der Auftrieb wirkt entgegen der nach unten gerichteten Kraft und wird durch den dynamischen Effekt der Luft auf die Tragflächen erzeugt. Er wirkt senkrecht zur Flugbahn durch das Zentrum des Auftriebs. (vgl. [FAA08] S. 66)*

Definition 2.7 beschreibt den Auftrieb. Dieser kann vom Piloten genutzt werden, um die Geschwindigkeit zu verändern, indem der Anstellwinkel verändert wird (siehe Abbildung 2.9). Der Auftriebserzeugung geht eine aerodynamische Widerstandserzeugung voraus. Um ein Flugzeug beispielsweise effizienter zu entwerfen, muss das Verhältnis von Auftrieb zu Luftwiderstand ( $L/W$ ) maximiert werden. Dieser Quotient beschreibt den Auftrieb in Abhängigkeit zum Luftwiderstand, der an den Tragflächen erzeugt wird.



Abbildung 2.9 Anstellwinkel während des Horizontalflugs ist ca. 3°

Definition 2.8: *Gewicht*

*Gewicht ist die kombinierte Belastung des Flugzeugs selbst, der Besatzung, des Kraftstoffs und des Gepäcks bzw. der Fracht. Durch die Schwerkraft wird das Flugzeug nach unten gezogen. Diese Gewichtskraft wirkt entgegengesetzt zum Auftrieb und durch den Flugzeugschwerpunkt vertikal nach unten. (vgl. [FAA08] S. 66)*

Definition 2.8 beschreibt die Gewichtskraft eines Flugzeugs. Hierbei hat der Schwerpunkt eines Flugzeugs eine wichtige Bedeutung. So werden flugzeugspezifisch Gepäck, Fracht und Passagiere eines nicht ausgebuchten Flugzeugs zum Austarieren genutzt, damit dessen Schwerpunkt im zulässigen Bereich bleibt.

Die Beziehung der Schub-, Luftwiderstands-, Auftriebs- und Gewichtskraft ist in Abbildung 2.10 zusammengefasst.

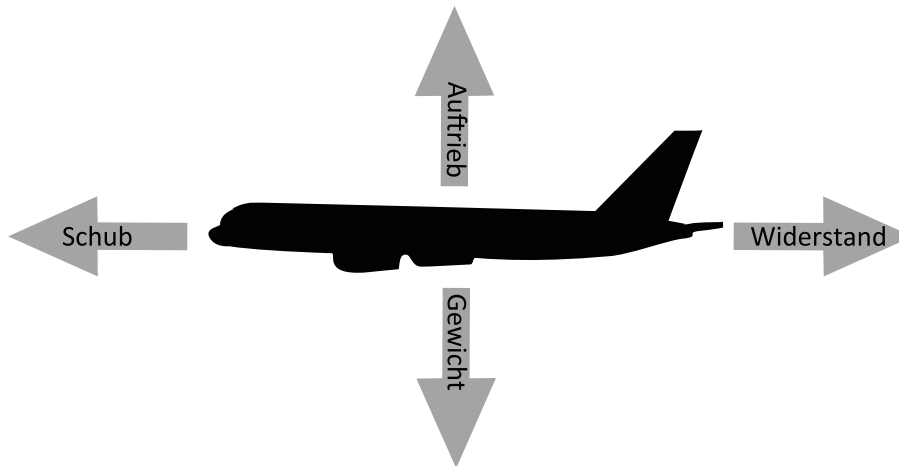


Abbildung 2.10 Kräftebeziehung an einem Flugzeug im Horizontalflug

Befindet sich ein Flugzeug im Steig- oder Sinkflug, wirken die Kräfte Schub, Luftwiderstand, Auftrieb und Gewicht nicht mehr genau senkrecht zum Schwerpunkt, d.h. ist ein Flugzeug beispielsweise im Steigflug, wirkt ein Teil des Gewichts verstärkend auf den Luftwiderstand und Formel 2.1 gilt nicht mehr, da der zu fliegende Anstellwinkel mehr Schub erfordert. Auch das Verhältnis von Auftrieb zum Gewicht verändert sich hierbei, denn ein Teil des Schubs wirkt sich als Auftrieb aus.

Im nächsten Abschnitt wird die Entstehung von Wirbelschleppen und deren Auswirkung auf den Formationsflug beschrieben.

#### 2.2.2.2. Wirbelschleppen

Wirbelschleppen, die an den Flügelspitzen eines Flugzeugs entstehen, sind Luftwirbel, die bei einem nachfliegenden Flugzeug zu Turbulenzen, aber auch zu mehr Auftrieb führen können. Diese sind Grundvoraussetzung für den Formationsflug und werden in diesem Abschnitt noch genauer beschrieben. Zunächst werden die Entstehung und der Aufbau der Wirbelschleppe und danach die Reduzierung der Flugleistung erläutert, bis dann schließlich eine Klassifizierung von Flugzeugen anhand ihrer Wirbelschleppen präsentiert wird.



## 2.2.2.2.1. Entstehung und Aufbau

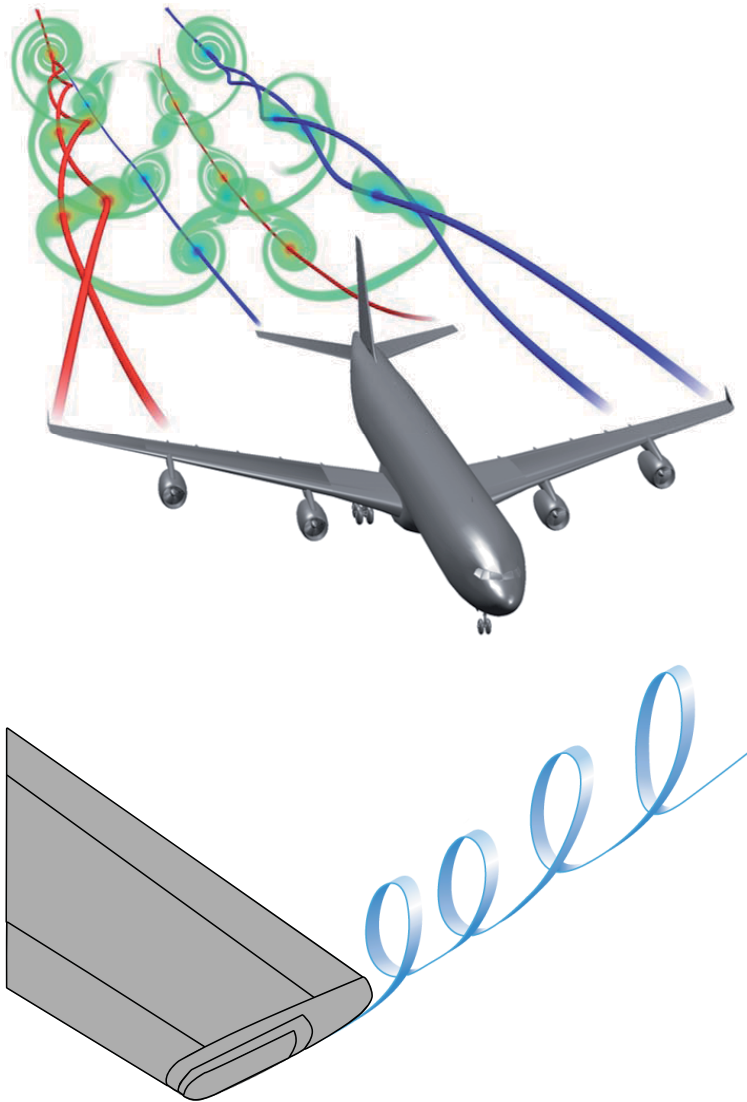


Abbildung 2.11 Wirbelschleppe a) eines Flugzeugs (oben) [DAE11] b) an der Flügelspitze (unten) (vgl. S.73 [FAA08])

Wenn sich die Tragfläche unter einem positiven Anstellwinkel befindet, besteht eine Druckdifferenz zwischen der oberen und unteren Oberfläche der Tragfläche. Der Druck über dem Flügel ist kleiner als der Atmosphärendruck und der Druck unterhalb des Flügels ist größer oder gleich dem atmosphärischen Druck.

Da sich Luft immer vom höheren Druck zum niedrigeren Druck bewegt und der Weg des geringsten Widerstands in Richtung der Flügelspitzen liegt, bewegt sich die Luft entlang der Tragflächen nach außen um die Flügelspitzen. Dieser Luftstrom erzeugt einen Überlauf über die Flügelspitzen, der einen Wirbel bildet (siehe Abbildung 2.11b), die sogenannte Wirbelschleppe ([SCHL67], [SCHL69]). In Abbildung 2.11a wurden die Wirbelschleppen mit Hilfe einer Simulation erkenntlich gemacht. So entstehen diese nicht nur an den Flügelspitzen, sondern auch an den Spitzen des Höhenleitwerks. Jeder Wirbel hat eine

Zirkulationsstärke  $\Gamma$  (siehe auch Abbildung 2.12). Prandtl als Pionier der Aerodynamik untersuchte bereits 1912 anhand von sogenannten Flüssigkeitsbewegungen unter anderem auch die Strömungen in der Umgebung von Tragflächen, die Wirbelschlepe. Er fasste seine Erkenntnisse in den Prandtlischen Aeroplantheorie (oder Tragflügeltheorie) zusammen (siehe Definition 2.9). Wieselsberger beschrieb sie wie folgt:

*"Nach der Prandtlischen Auffassung kann die Strömung in der Umgebung einer Tragfläche ausreichend genau dargestellt werden durch Überlagerung der horizontalen Fluggeschwindigkeit mit einer aus drei geradlinigen Wirbeln von gleicher Intensität erzeugten zyklischen Strömung. Dabei ist unter Zirkulation  $\Gamma$  der Wert des Linienintegrals  $\Gamma = \int \vec{\omega} \cdot \vec{ds}$  längs einer geschlossenen, den Wirbel einschließenden Kurve zu verstehen." (zitiert aus [WIE1916]; der Vektor  $\vec{\omega}$  beschreibt Wirbelstärke und  $\vec{ds}$  das Bogenelement)*

#### Definition 2.9: Prandtlische Aeroplantheorie

*„Bei einem allseitig von der Flüssigkeit umgebenen Körper, z. B. einem Aeroplan, ist eine Bewegung mit Zirkulation  $\Gamma$  nur möglich, wenn von beiden Enden des Körpers Wirbelfäden ausgehen, deren Zirkulation mit der Bewegung um den Körper übereinstimmt. Die beiden Wirbelfäden bilden in einiger Entfernung vom Aeroplan ein Wirbelpaar, das sich mit der Geschwindigkeit  $\frac{\Gamma}{2\pi d}$  abwärts bewegt; die Distanz  $d$  ist dabei ungefähr gleich der Spannweite des Aeroplans.“ (zitiert aus [PRA1912] S. 112, siehe auch; siehe Abbildung 2.12)*

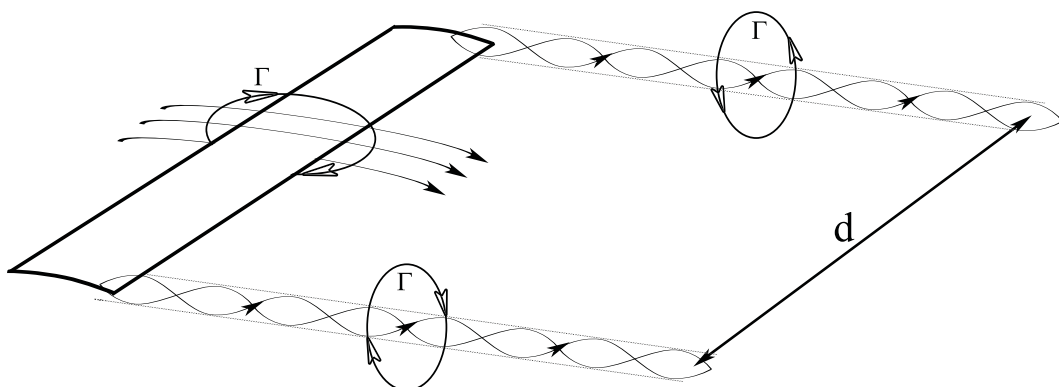


Abbildung 2.12 Prandtl's Aeroplantheorie

Es gibt verschiedene Modelle zur Annäherung der Tangentialgeschwindigkeit einzelner Wirbel. Im Folgenden werden einige Modelle aufgeführt:

#### Rankine:

$$v_{\theta} = \frac{\Gamma_0}{2\pi r_c} \frac{r}{r_c} \quad \text{für } r \leq r_c$$

$$v_{\theta} = \frac{\Gamma_0}{2\pi r_c} \quad \text{für } r > r_c$$

**Lamb-Oseen:**

$$v_{\theta} = \frac{\Gamma_0}{2\pi r_c} \left\{ 1 - e^{-1,2526 \left(\frac{r}{r_c}\right)^2} \right\}$$

**Hallock-Burnham:**

$$v_{\theta} = \frac{\Gamma_0}{2\pi r_c} \frac{r^2}{r^2 + r_c^2}$$

Alle Modelle berücksichtigen die anfängliche Zirkulation  $\Gamma_0$  (siehe Formel 2.2), den Abstand zum Wirbelzentrum  $r$  und den Kernradius  $r_c$  der Wirbelschlepe. In Abbildung 2.13 werden die Tangentialgeschwindigkeiten verschiedener Flugzeugtypen in Abhängigkeit zum Abstand  $r$  dargestellt.

$$\Gamma_0 = \frac{2mg}{\rho \frac{\pi}{4} B V_{TAS}} \quad (2.2)$$

Hierzu wurde die anfängliche Zirkulation  $\Gamma_0$  vor dem Hintergrund des maximalen Abfluggewichts (MTOW)  $m$  und der Spannweite  $b$  laut Hersteller ([ABS13b], [ABS13a], [ABS13c]), einer konstanten Geschwindigkeit  $V_{TAS}$  („True Air Speed“; TAS) von 890 km/h, der Luftdichte  $\rho$  in einer Flughöhe von 11.000 m und der Annahme der Größe des Kernradius  $r_c$  von 4 m bei den Flugzeugentypen A330, A340 und A380 berechnet.

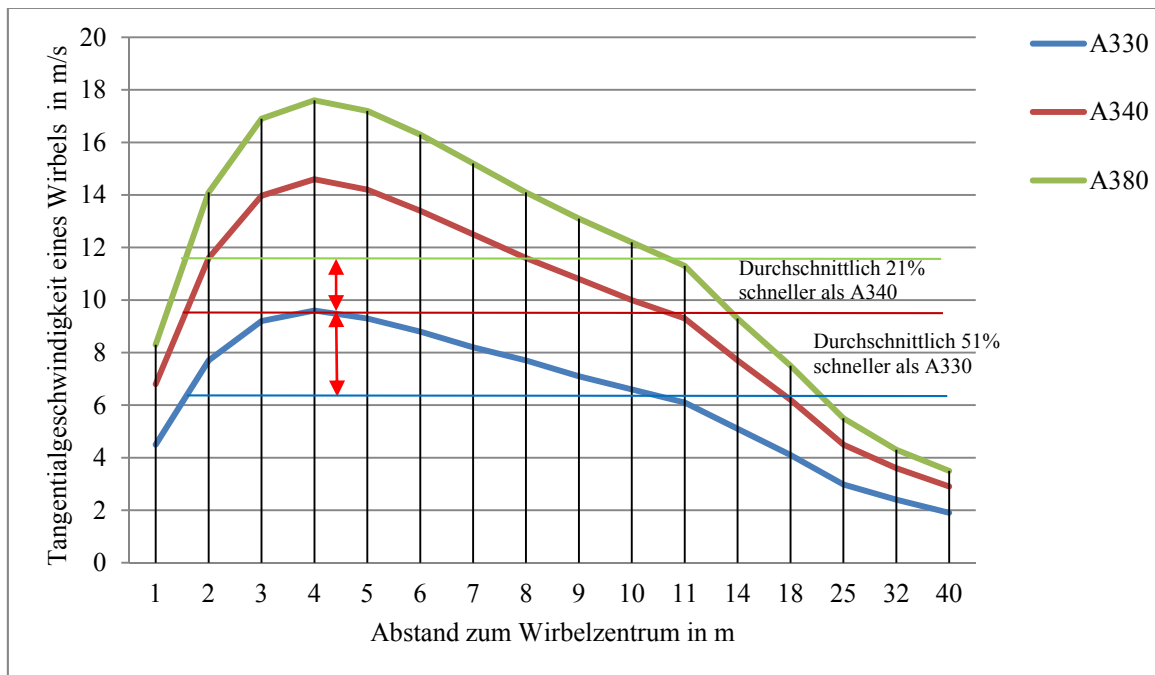


Abbildung 2.13 Angenäherte Tangentialgeschwindigkeiten eines Wirbels nach Hallock Burnham – Geschwindigkeitsverlauf (Kurve) und Durchschnittsgeschwindigkeit (Gerade)

Die Geraden stellen die durchschnittlichen Tangentialgeschwindigkeiten in dem berechneten Intervall dar. Mit Hilfe dieses Modells können Unterschiede der Wirbelschleppen aufgezeigt werden.

Anhand der beschriebenen Eigenschaften von Wirbelschleppen kann die Leistungersparnis im Formationsflug im nächsten Abschnitt beschrieben werden.

#### 2.2.2.2. Leistungersparnis im Formationsflug

Vor dem Hintergrund der Grundlagen der Aerodynamik und Eigenschaften von Wirbelschleppen kann die Reduzierung des Luftwiderstands beim Formationsflug beschrieben werden (siehe auch [RAY02], [NAN07]).

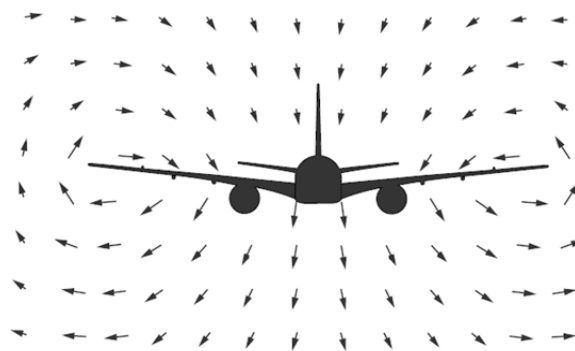


Abbildung 2.14 Wirbelschleppe um ein Flugzeug (aus [MCL05])

Eine Wirbelschleife induziert eine aufwärts abweichende Strömung (siehe Abbildung 2.14). Ein Flugzeug in entsprechender vertikaler bzw. horizontaler Ausrichtung zu einem vorausfliegenden Flugzeug kann diese Strömung nutzen, um den induzierten Luftwiderstand zu verringern bzw. den Auftrieb zu erhöhen. Der Abbildung 2.15 kann auch die horizontale Staffelung der Flugzeuge innerhalb einer Echelon-Formation entnommen werden.

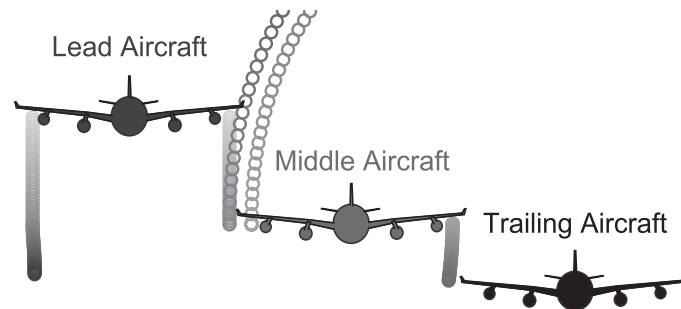


Abbildung 2.15 Wirbelausbreitung in einer Echelon-Formation (Quelle: [NIN10])

In Abbildung 2.16 beschreibt  $U_{\text{flow}}$  die Strömungsgeschwindigkeit eines führenden Flugzeugs in einer Formation. Der vom Flügel erzeugte Auftrieb verursacht eine Abtriebsgeschwindigkeit ( $v_{\text{downwash}}$ ).

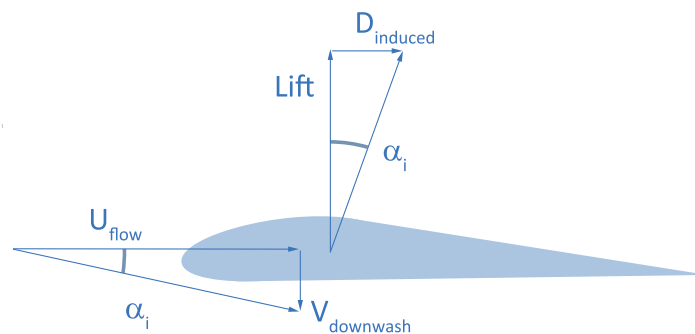


Abbildung 2.16 Aerodynamik des führenden Flugzeugs: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit  $U_{\text{flow}}$ ; Abtriebsgeschwindigkeit  $v_{\text{downwash}}$ ; resultierender Luftwiderstand  $D_{\text{induced}}$  (aus [WIE11])

Ungeachtet des herrschenden Kraftvektors, der auf eine Tragfläche einwirkt, wirkt die resultierende Kraft senkrecht auf die abgewichene Strömungsgeschwindigkeit und zusätzlich auf einen nach hinten gerichteten Luftwiderstandsvektor ( $D_{\text{induced}}$ ) senkrecht zum Auftriebsvektor (Lift). Wird wie in Abbildung 2.17 ein Flügel eines nachfliegenden Flugzeugs in das Auftriebsfeld dieser Wirbelschleife platziert, reduziert die Auftriebsgeschwindigkeit ( $v_{\text{upwash}}$ ), die vom vorderen Flugzeug erzeugt wird, das Abweichen der Strömung zur resultierenden Abtriebsgeschwindigkeit ( $v_{\text{result}}$ ). Dies hat auch zur Folge,

dass der induzierte Luftwiderstand ( $D_{\text{induced}}$ ) kleiner wird, während der Auftrieb (Lift) konstant bleibt.

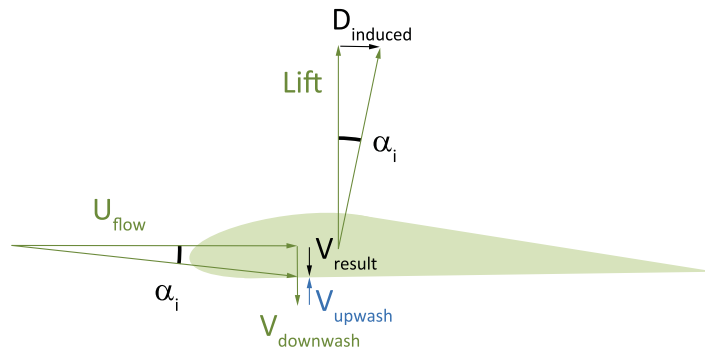


Abbildung 2.17 Aerodynamik des hinteren Flugzeugs: Reduzierte Strömungsgeschwindigkeit  $U_{\text{flow}}$ ; die neue resultierende Abtriebsgeschwindigkeit  $v_{\text{result}} = v_{\text{downwash}} - v_{\text{upwash}}$  und resultierender Luftwiderstand  $D_{\text{induced}}$  (aus [WIE11])

Anhand der Wirbelschleppeneigenschaften der verschiedenen Flugzeugtypen können diese klassifiziert werden.

#### 2.2.2.2.3. Klassifizierung von Flugzeugen

Passagierflugzeuge werden aufgrund ihrer Wirbelschleppeneigenschaft klassifiziert, um Abstände bei Starts und Landungen, aber auch in der Luft festzulegen. Wie aus den vorherigen Abschnitten abgeleitet werden konnte, haben größere Flugzeuge aufgrund ihrer Aerodynamik größere Wirbelschleppen, die bei dahinter startenden, landenden oder fliegenden Flugzeugen positive Effekte wie einen erhöhten Auftrieb oder negative Effekte wie Turbulenzen hervorrufen können. So gab es am 12. November 2001 den ersten schweren Zwischenfall, der auf das Durchfliegen einer Wirbelschlepe zurückzuführen ist (Unfallbericht siehe [OCA05]). Der American Airlines Flug 587 (Airbus A-300) durchflog kurz nach dem Start die Wirbelschlepe einer zuvor gestarteten Boeing 747, dabei kam es zu heftigen Turbulenzen. Der Copilot, der gerade das Kommando hatte, führte daraufhin heftige Vollausschläge des Seitenleitwerks durch, die schließlich zum Abbrechen des Seitenleitwerks und später der Triebwerke führten. Das Flugzeug stürzte über dem New Yorker Stadtteil Queens ab. Nach dem Unfallbericht ist die Ursache ein Pilotenfehler, da der Copilot das Seitenruder nicht in wechselnden Richtungen bis zum Maximum ausschlagen durfte. Anhand dieses Unfalls kann jedoch abgeleitet werden, welche enormen Kräfte durch eine Wirbelschlepe verursacht werden können.

In diesem Abschnitt soll die Klassifizierung von Flugzeugen nach der "International Civil Aviation Organization" (ICAO; Deutsch: Internationale Zivilluftfahrtorganisation) und ihre Bedeutung für den Formationsflug erläutert werden.

Die ICAO fasst vier Klassen, die in Tabelle 2.1 aufgeführt sind, zusammen: Leicht (light), medium, schwer (heavy) und super. Der Airbus A380 ist größer und schwerer (Spannweite: 79,75 m und MTOW: 590 t) als die Boeing B747 (Spannweite: 68,45 m und MTOW: 448 t), deshalb hat die ICAO eine neue Klasse "super" eingeführt. Dabei bedeutet die Abkürzung MTOW "Maximum take-off weight" und bezeichnet in der Luftfahrt das Höchstabfluggewicht eines Flugzeugs. Untersuchungen des DLRs zeigten, dass es zwischen der A380 und der B747 keine signifikanten Unterschiede gibt, jedoch wurden bei Starts und Landungen die zu haltenden Abstände entsprechend angepasst [KIR06]. Vor dem Hintergrund der verschiedenen aerodynamischen Eigenschaften der Flugzeugtypen ist in Tabelle 2.1 erkennbar, dass beispielsweise hinter größeren Flugzeugtypen wie beim Airbus A380 oder bei der Boeing B747 gleich große Flugzeugtypen in kürzeren und kleineren Flugzeugtypen in größeren Abständen fliegen müssen.

Tabelle 2.1 Wake Turbulence Separation Minima (deutsch: Mindestabstände von Flugzeugen; vgl. [EUR12b])

vorausgeh. Flugzeug		folgendes Flugzeug	Abstand – Radar in nautische Meilen (NM)	Abstand - Zeit	Beispiel
<b>L</b>	Light (MTOW <7 t)	light	3 NM	N/A	Dornier Do 28 ← Dornier Do 28
		medium	3 NM	N/A	Cessna 182 ← Boeing 737
		heavy	3 NM	N/A	Dornier Do 28 ← Boeing 747
<b>M</b>	Medium (MTOW 7 t bis 136 t)	light	5 NM	3 min	Boeing 737 ← Cessna 172
		medium	3 NM	N/A	Boeing 737 ← Airbus A320
		heavy	3 NM	2 min	Airbus A320 ← Boeing 747
<b>H</b>	Heavy (MTOW >136 t)	light	6 NM	3 min	Boeing 747 ← Cessna 182
		medium	5 NM	2 min	Boeing 747 ← Boeing 737
		heavy	4 NM	N/A	Boeing 747 ← Boeing 747
<b>J</b>	Super (A380)	light	8 NM	3 min	Airbus A380 ← Cessna 182
		medium	5 NM	2 min	Airbus A380 ← Boeing 737
		heavy	4 NM	2 min	Airbus A380 ← Boeing 747
		super	4 NM	N/A	Airbus A380 ← Airbus A380

In Abbildung 2.18 ist eine genauere Klassifizierung der Flugzeugtypen nach ICAO dargestellt:

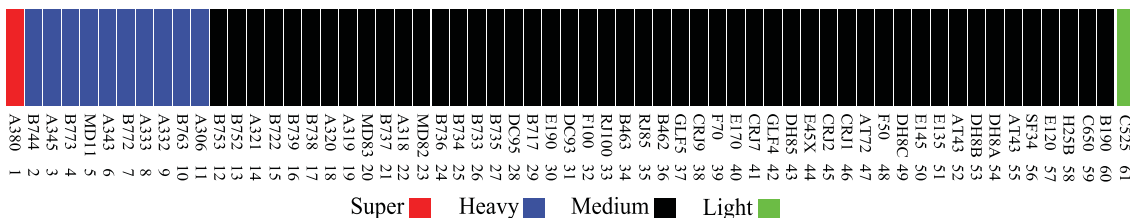


Abbildung 2.18 Flugzeugklassifizierung; Bezeichnung der Flugzeugvarianten ist in der Codierung beinhaltet: bsp.: B744 heißt B747-400 (Quelle: [EUR11])

Im folgenden Abschnitt werden einige Grundlagen zur Bestimmung der Flugleistung vorgestellt.

### 2.2.2.3. Flugleistung

Um den Vorteil des Formationsfluges zu erkennen, wurde bei den Feldversuchen von Beukenberg und Hummel [BEU86] und Ray et al. [RAY02] die Treibstoffersparnis errechnet. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Abschnitt einige theoretische Grundlagen zur Bestimmung der Flugleistung erläutert.

Die allgemeine Berechnung der Flugleistung wird vor jedem Linienflug vom Piloten mit Hilfe des "Flight Management Computers" (FMC) ermittelt [SPI06]. Anhand dessen kann die zu tankende Treibstoffmenge bestimmt werden, um die Effizienz eines Flugs so hoch wie möglich zu halten. Denn je größer die Masse eines Flugzeugs ist, desto mehr Energie wird für einen Flug benötigt. Es ist festzuhalten, dass normalerweise das festgelegte Landegewicht nicht überschritten werden darf. Ist dies der Fall, kann Kerosin abgelassen werden (dieser Prozess wird "Fuel Dumping" genannt). Ist die Landung mit einem höheren zulässigen Gewicht erfolgt, sind teure Inspektionen nötig, obwohl moderne Passagierflugzeuge darauf ausgelegt sind, auch mit ihrem Startgewicht zu landen. Deshalb sind die Fluggesellschaften bemüht, die benötigte Kraftstoffmenge annähernd genau zu bestimmen. Während des Flugs wird der aktuelle Verbrauch bei modernen Passagierflugzeugen im Kraftstoff-Durchfluss-Messer angezeigt.

Zur Bestimmung der Flugleistung sind nach Scheiderer folgende Flugphasen zu segmentieren (zitiert aus [SCHEI08] Kap.1 S.2):

- Start (take-off) und Start-Steigflug (take-off climb)
- Steigflug (climb)
- Reiseflug (cruise)
- Sinkflug (descent)
- Anflug (approach), Landung (landing), Durchstarten (go around) und



- Flug zum Ausweichflughafen.

Dabei gibt es einen fließenden Übergang zwischen diesen Phasen, so kann beispielsweise nach Scheiderer ab einer Flughöhe von 15 bis 35 Fuß (ca. 4,5 bis 10 m), je nach aktueller Beschaffenheit der Startbahn, davon ausgegangen werden, dass sich ein Flugzeug nicht mehr in der Startphase befindet. Die für die Flugleistung relevanten Parameter werden im Folgenden exemplarisch für den unbeschleunigten Horizontalflug aufgelistet:

- Aktuelle Gesamtmasse: Treibstoffmasse, Flugzeugmasse mit Besatzung, Passagieren und Gepäck bzw. Fracht (engl. all-up weight; AUV)
- Flughöhe: Luftdruck, Luftdichte
- Lufttemperatur
- Spannweite
- Neigungswinkel
- Geschwindigkeit

Hinzu kommen noch weitere Parameter, die in Abschnitt 3.2.2 im Rahmen des entworfenen Flugleistungsmodells genauer vorgestellt werden. Während des Flugs sinkt, je nach eingestelltem Schub, die Masse an Treibstoff, weshalb eine Interpolation des Kraftstoffdurchflusses erforderlich ist, da mit geringerer Masse auch ein geringerer Schub nötig ist, um das Flugzeug mit konstanter Geschwindigkeit zu fliegen.

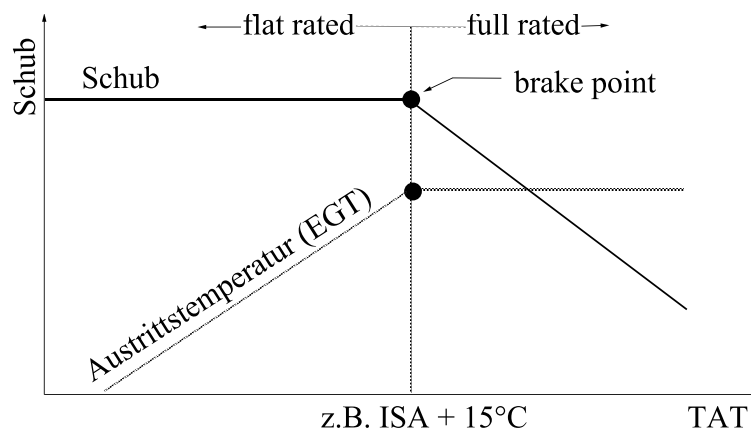


Abbildung 2.19 Full und flat rated thrust (zitiert aus [SCHEI08] S. 81)

Darüber hinaus ist die Luftdichte als Funktion von Temperatur und Luftdruck ein signifikanter Einflussfaktor auf Schub und Flugleistung. So ist nach Scheiderer [SCHEI08] der Luftmassendurchfluss im Triebwerk bei dünner Luft kleiner als bei dichter Luft. Der Einfluss der Temperatur kann dann gering gehalten werden, indem die Triebwerke bis zu einer bestimmten Temperatur den vollen Schub zur Verfügung stellen (auch „flat rated“

genannt) und ab einem bestimmten Punkt („brake point“ z.B. ISA 15°C) nimmt mit steigender Temperatur dann der benötigte Schub kontinuierlich ab (siehe Abbildung 2.19). ISA ist dabei die Abkürzung für „International Standard Atmosphere“ und ist eine von ICAO eingeführte standardisierte internationale Bezugsgröße, die keine genaue Aussage über die aktuellen Verhältnisse der Atmosphäre trifft [BAT00]. Dagegen verhält sich die Austrittstemperatur („exhaust gas temperature“; EGT) umgekehrt, da sie im „full rated“ Bereich konstant ist und im „flat rated“ Bereich mit sinkender Temperatur ebenfalls sinkt. In diesem Zusammenhang werden die relevanten Schichtungen der Atmosphäre, wie in Abbildung 2.20 dargestellt, eingeführt. Die für Passagierflugzeuge relevante Schicht ist die Troposphäre und deren Grenzschicht, die Tropopause. Die Troposphäre ist die vom Wetter geprägte unterste Schicht der Erdatmosphäre. Die Tropopause trennt diese Schicht von der stets stabilen Schicht der Stratosphäre und ist durch eine deutliche Temperaturänderung geprägt [REX69].

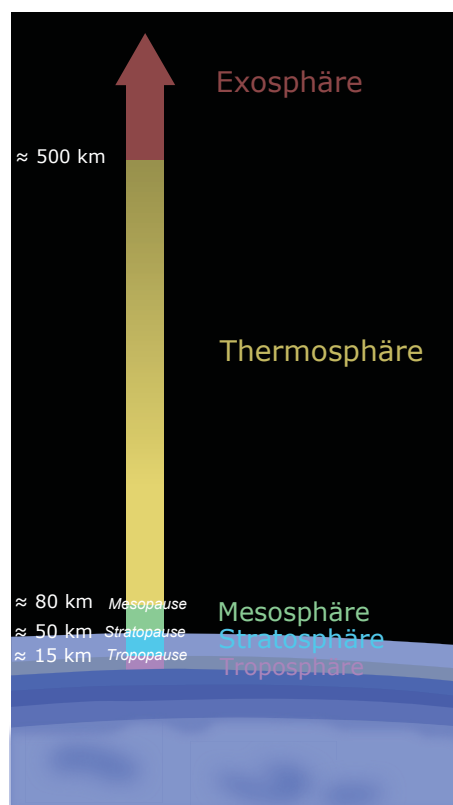


Abbildung 2.20 Schichtung der Atmosphäre (Quelle: [KRA07])

Zur Implementierung eines Flugleistungsmodells müssen diese Parameter in Relation gesetzt werden, um daraus den Treibstoffverbrauch („fuel flow“; FF) zu berechnen. Dieser Parameter trifft eine Aussage über den Verbrauch einer Treibstoffmenge pro Zeiteinheit und hat in der Regel die metrische Dimension [kg/min].

---

In Abschnitt 3.2.2 wird ein einfaches Flugleistungsmodell auf der Basis des "Base of Aircraft Data" (BADA) Projekts [EUR09] vorgestellt.

Mithilfe der theoretischen Grundlagen dieses Abschnitts wird im nächsten Abschnitt die Routenplanung anhand der Nord Atlantik Route vorgestellt.

### 2.2.3. Routenplanung am Beispiel der Nord Atlantik Route

Die Nord Atlantikroute ist für Europa noch immer die wichtigste Flugroute, deshalb wird in dieser Arbeit darauf bezugnehmend das Schwarmverhalten untersucht.

Seit bereits 1930 gibt es Transatlantikflüge, die aufgrund der damals beschränkt mitzuführenden Treibstoffmenge auf Zwischenlandungen angewiesen waren. Ab 1938 schlossen sich Irland, Großbritannien und Kanada zusammen, um meteorologische Daten zu sammeln und diese für die Nordatlantikflüge zur Verfügung zu stellen. Daraufhin bot Pan American World Airways (Pan Am) ab 1939 erste regelmäßige Transatlantikflüge an. Durch die Zunahme des Luftverkehrs in den 1960er Jahren über dem Nordatlantik war eine Strukturierung notwendig, das sogenannte "North Atlantic Track System" (NATS) wurde eingeführt. NATS ist eine über dem Atlantik führende Struktur, die auch als "Organized Track System" (OTS) bezeichnet wird.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Organisation der Nordatlantikroute erläutert. Danach wird bezugnehmend auf den Formationsflug ein erster Ansatz vorgestellt, wie die vorhandene Struktur erweitert werden könnte.

#### 2.2.3.1. Zuteilung der Flugrouten nach OTS

Der Luftverkehrsstrom zwischen Europa und Nordamerika setzt sich aus einem westwärts und einem ostwärts fließenden Verkehrsstrom zusammen, die von der lokalen Zeitzone und Nachtflugregelungen abhängen [ICA09].

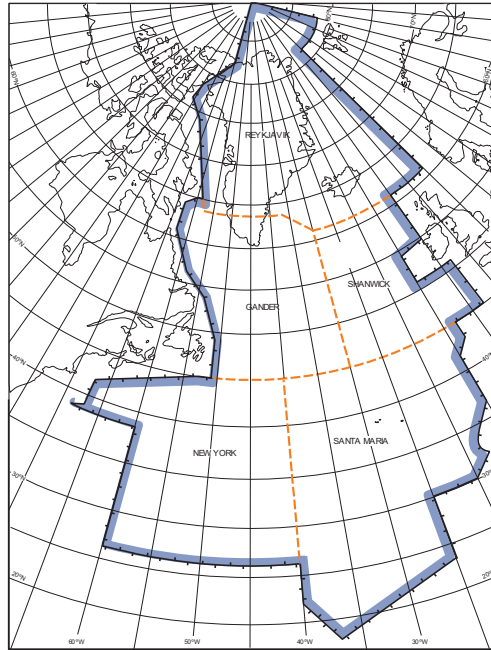


Abbildung 2.21 Flugsicherungen für den Nordatlantik (aus [ICA09] S.1)

Es gibt keine festen Flugrouten über dem Nordatlantik wie über dem Festland, da diese wetterabhängig festgelegt werden. Feste Routen würden aufgrund der unklaren Wetterverhältnisse zu variierendem Spritverbrauch und variierender Reisezeit, aber auch zu Gefahren führen. Es gibt verschiedene Flugsicherungen im Nordatlantik, die sogenannten "Oceanic Control Centre" (OAC) (siehe Abbildung 2.21). Shanwick OAC in Irland ist für die Erstellung der Westroute zuständig und Gander OAC in Kanada ist für die Erstellung der Ostroute zuständig. Diese werden alle 12 Stunden je nach Flugaufkommen und Wetterbedingungen erstellt und gelten für die Westroute von 11:30 UTC bis 19:00 UTC bei 30°W (siehe Abbildung 2.22 a) und für die Ostroute von 01:00 UTC bis 08:00 UTC bei 30°W (siehe Abbildung 2.22 b). Die Abkürzung UTC bezeichnet dabei die koordinierte Weltzeit, die sogenannte "Universal Time Coordinated". Diese Zeit bezieht sich auf den dreißigsten Längengrad West.

Die Nutzung von OTS ist optional (Zugriff unter [FAA12]), weshalb nur etwas mehr als die Hälfte der Flüge über dem Nordatlantik über den OTS stattfinden.

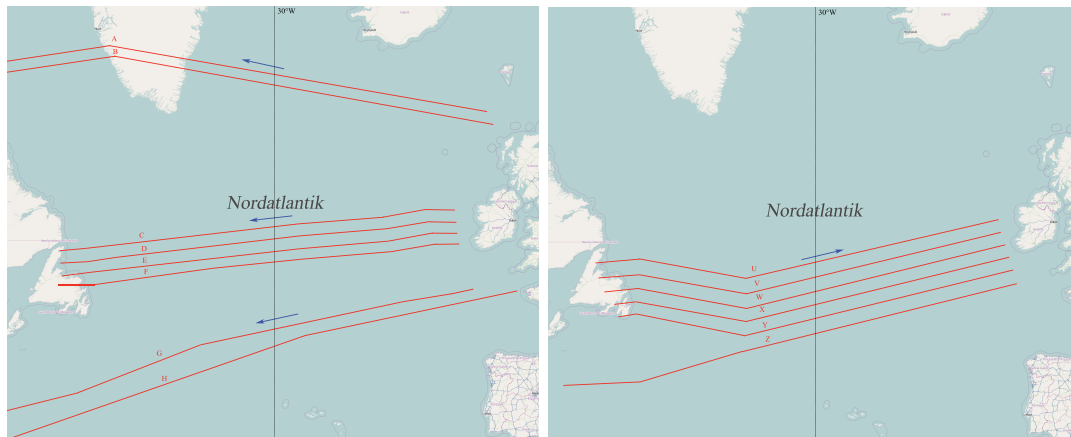


Abbildung 2.22 Beispiel für den OTS a) Westroute b) Ostroute (mit OpenStreetMap gezeichnet)

Abbildung 2.22 a) kann entnommen werden, dass auch die Routen nach Mittel- und Südamerika im OTS enthalten sind.

Zur Gewährleistung der Sicherheit sind feste Abstände festgelegt worden, die in Abbildung 2.23 dargestellt sind.

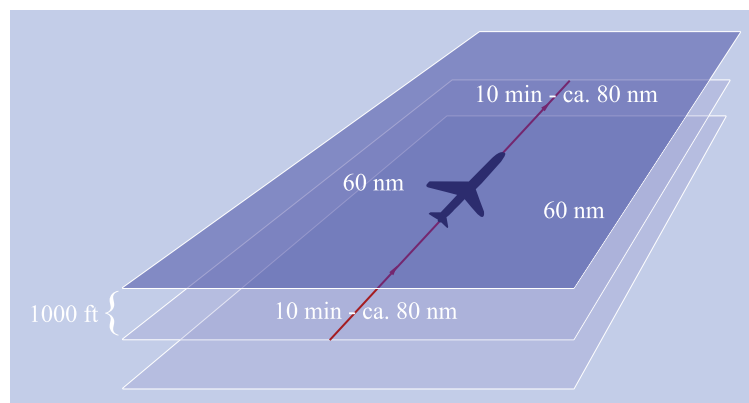


Abbildung 2.23 Abstände im OTS (Nautische Meilen(nm) für die Längen- und Seitenabstände und Fuß (ft) für die Höhenabstände)

So sind die Abstände nach vorne und hinten heutzutage auf 10 Minuten bzw. 80 nm (Nautische Meilen) und seitlich auf 60 nm festgelegt. Die horizontalen Abstände sind bei 1000 ft (Fuß) festgeschrieben.

Anhand dieser Regelungen werden die Koordinaten der Trajektorien festgelegt. Der Begriff Trajektorie bezeichnet die Flugbahn eines Körpers und beschreibt in der Luftfahrt deren Koordinaten, wie Höhe, Längen- und Breitengrad.

### 2.2.3.2. Aufteilung von NATS in Slots

In diesem Abschnitt wird eine Möglichkeit vorgestellt, wie vor dem Hintergrund des Formationsflugs die Nutzung des OTS gewährleistet werden kann. Die Organisation des

Formationsflug verlangt einheitliche Regelungen auf den entsprechenden Flughäfen, damit teilnehmende Flugzeuge keinen örtlichen Verzögerungen ausgesetzt sind. In Abschnitt 2.2.2.3 wurde bereits erwähnt, dass die Kraftstoffmenge im Voraus berechnet wird und die Überschreitung des Landegewichts zu höheren Kosten führt. Beim Formationsflug muss der reduzierte Kraftstoffverbrauch berücksichtigt werden, da dieser Gewinn ansonsten entweder durch "Fuel Dumping" oder entsprechenden Inspektionen zunichte gemacht würde.

Vor diesem Hintergrund sind eine Priorisierung der an einem Formationsflug teilnehmenden Flüge und eine Synchronisierung der Flugpläne unter Rücksichtnahme der zu fliegenden Trajektorien nötig, um zeitnahes Erreichen des Treffpunkts zu gewährleisten. Für einen reibungslosen Ablauf des Formationsflugs sind auf der Seite der Flugsicherung Mechanismen zu entwickeln, die den Formationsflug regeln. Die Möglichkeit, die in Abbildung 2.24 dargestellt ist, zeigt, dass eine Flugroute in Slots aufgeteilt und den entsprechenden Formationen zugeteilt werden kann. Jeder Formationsteilnehmer muss innerhalb eines entsprechenden Zeitfensters ( $\Delta t$ ) am Treffpunkt sein, dabei prüft jeder Formationsteilnehmer kurz vor dem Treffpunkt, ob das  $\Delta t$  eingehalten werden kann, falls dies der Fall ist und nicht alle Flugzeuge gleichzeitig am Treffpunkt angekommen sind, kann mit einer reduzierteren Geschwindigkeit die Formationsbildung beginnen und die nachrückenden Flugzeuge schließen dann entsprechend auf. Im anderen Fall wird die Formation starten und die Flugzeuge, die diese Formation verpasst haben, können entweder einem anderen Slot zugewiesen werden oder alleine den Flug fortsetzen. Für NATS wäre ein Treffpunkt über der Irischen See für den westwärts fliegenden Schwarm (Abbildung 2.24 a) bzw. über Neufundland für den ostwärts fliegenden Schwarm (Abbildung 2.24 b) zu berücksichtigen, da die Formationsbildung ein kritischer Abschnitt ist und Ausweichflughäfen von diesen Punkten schneller zu erreichen wären.



Abbildung 2.24 Aufteilung von NATS in Slots a) (oben) Westroute b) (unten) Ostroute (mit OpenStreetMap gezeichnet)

Darüber hinaus könnten Ausweichrouten definiert werden, um Flugzeuge, die ihre zugeweilte Formation verpasst haben, auf diese zu lotsen. Diese Routen können dann entweder von der jeweiligen Flugsicherung dem Flug durchgegeben werden oder können im Voraus geplant und dem Flug bekannt sein.

Im nächsten Abschnitt werden die verschiedenen Formationstypen und deren Algorithmen zur Formationsbildung, Rotation und Rekonfiguration vorgestellt.

#### 2.2.4. Formationstypen

In diesem Abschnitt werden verschiedene Formationstypen vorgestellt und dabei Algorithmen beschrieben, wie Passagierflugzeuge diese Formationen bilden und während des Flugs gleichzeitig rotieren können. Anschließend werden Notfallsituationen diskutiert und

entsprechende Algorithmen zur Rekonfiguration der Formationen im Falle eines Ausfalls vorgestellt.

Bei allen Formationstypen wird vorausgesetzt, dass die an der Formation teilnehmenden Flugzeuge vor der Formationsbildung bekannt sind. Der Formationsführer ist bei allen Formationen für die Navigation entlang der Formationsroute zuständig. Die anderen Flugzeuge sollen jeweils ihrem Vordermann folgen und dabei die effizienteste Position innerhalb dessen Wirbelschleppe einnehmen. Eine Ausnahme hierzu ist die umgekehrte V-Formation in Abschnitt 2.2.4.3, denn hier gibt es entweder zwei Formationsführer an der Spitze oder einen am Ende der Formation. Während des Flugs sollen alle Positionen gehalten werden. Nur im Falle einer optionalen Rotation oder eines Ausfalls muss jedes Flugzeug im Stande sein, als neuer Formationsführer die aktuellen Trajektoriendaten oder die Wirbelschleppeneigenschaften des neuen Vordermanns sofort zu erfassen. Die Wirbelschleppeneigenschaften sollen anhand von Technologien erfasst werden oder mit ihren Daten bereits bekannt sein. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Formationsbildungsalgorithmen müssen auch während des Fluges nach einer gewissen Zeit ausgeführt werden, um die Positionierung zu korrigieren.

Zu allen Formationstypen gibt es keine veröffentlichten Berichte bezüglich ihrer Effizienz, deshalb wird im nächsten Abschnitt (2.3) eine erste Einschätzung getroffen, inwieweit die Formation in der Realität genutzt werden könnte.

#### 2.2.4.1. V-Formation

Im Abschnitt 2.1.3 wurde das Schwarmverhalten von Vögeln beschrieben. Dabei wurde in Abbildung 2.6 gezeigt, dass Kraniche in einer sogenannten V-Formation fliegen. Dieser Formationstyp gewährleistet den Vögeln schnell einen großen Verband zu bilden. Während des Flugs wird die Position an der Formationsspitze regelmäßig gewechselt, damit auch der Vogel an der Spitze Energie einsparen kann. Die V-Formation wird bereits in der militärischen Luftfahrt seit den 1930er eingesetzt, wobei hier die bereits bekannten aerodynamischen Effekte einen sekundären Stellenwert hinter den taktischen Möglichkeiten einnehmen. So haben Kampfflugzeuge in V-Formation und einer entsprechenden horizontalen Staffelung einen hohen taktischen Vorteil, da zwei Flanken gesichert werden können.

Durch die Bewährtheit dieses Formationstyps beim Militär und den Untersuchungen, die in diesem Kapitel bezüglich CFF [RAY02] und EFF [NIN10] vorgestellt wurden, kann die V-Formation als eine der bekanntesten Formationen bezeichnet werden.



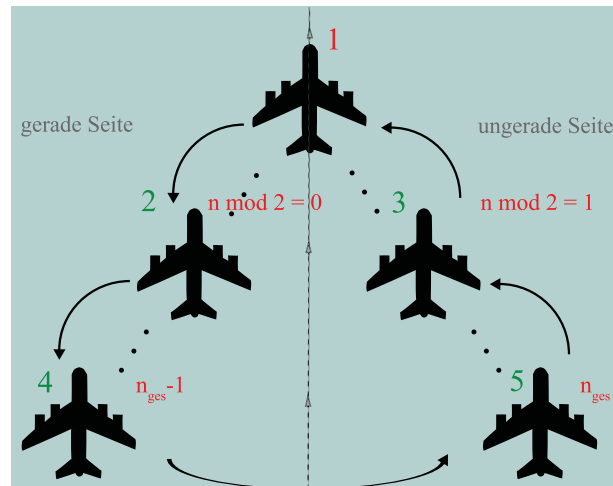


Abbildung 2.25 Positionierung in einer V-Formation ( $n_{\text{ges}}$  entspricht der Formationslänge)

Anhand der Verteilung der Positionsnummern aus Abbildung 2.25 weiß jedes Flugzeug mittels Regel 2.1 auf welcher Formationsposition sein Vorgänger ist. Somit wird gewährleistet, dass jedes Flugzeug anhand der eigenen Positionsnummer die Positionsnummer des vorausfliegenden Flugzeugs bestimmen kann.

Regel 2.1 : Bestimmung des Vorgängers in einer V-Formation

```

falls Flugzeug auf gerader Formationsposition
    falls Flugzeugposition = 2
        Vorgänger = Formationsposition-1
    sonst
        Vorgänger = Formationsposition-2
falls Flugzeug auf ungerader Formationsposition
    Vorgänger = Formationsposition-2

```

Diese Regel wird für die folgenden Algorithmen benötigt.

#### 2.2.4.1.1. Formationsbildungsalgorithmus

Die Formationsbildung wird in Abbildung 2.26 dargestellt. Die Positionierung der Flugzeuge muss dabei vorher festgelegt sein. Dies könnte entweder vorher anhand der festgelegten Flugzeugklassifizierung oder nach ihrer Ankunft am Treffpunkt festgelegt werden.

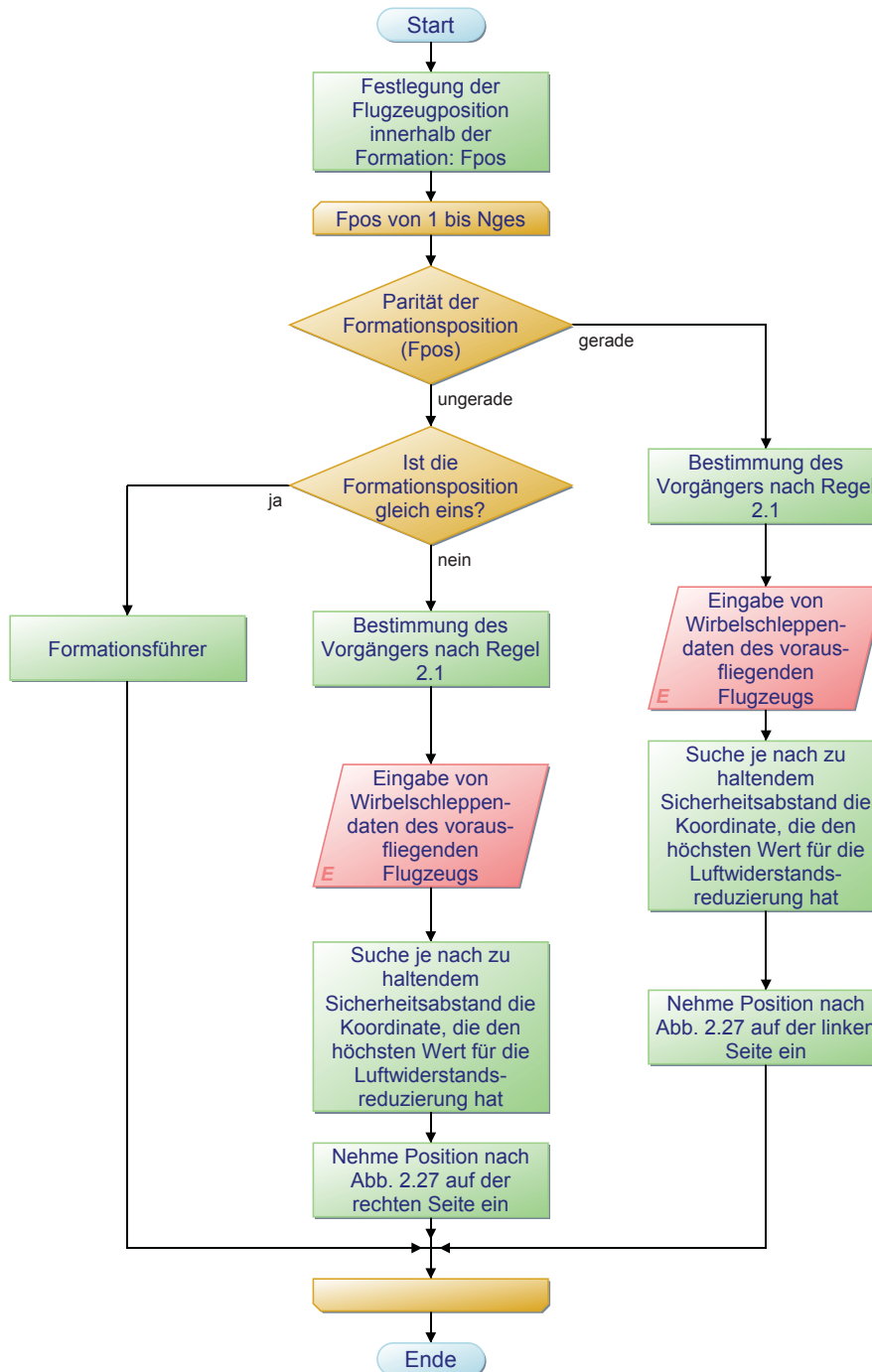


Abbildung 2.26 Formationsbildung - V-Formation ( $F_{pos}$ : Position des aktuellen Flugzeugs;  $N_{ges}$ : Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer)

Die einzunehmende Position hängt von der Wirbelschleppe des vorausfliegenden Flugzeugs ab. Dabei sind auch festgelegte Sicherheitsabstände zu berücksichtigen. Hierzu werden in Abschnitt 3.2.3.2 Ansätze zur Positionierung innerhalb der Formation vorgestellt. Innerhalb der Schleife wird für jedes Flugzeug der Algorithmus individuell ausgeführt. Ist die Parität der Formationsposition gerade, so wird der Formationsvorgänger nach Regel 2.1 bestimmt und dessen Wirbelschleppinformationen werden übertragen. Anhand dieser Daten und des

---

zu haltenden Sicherheitsabstands wird die relative Position zum vorausfliegenden Flugzeug bestimmt, die optimal ist, d.h die höhere Luftwiderstandsreduzierung hat. Dann wird diese Position auf der linken Seite der Formation (siehe Abbildung 2.25) eingenommen. Bei ungeraden Parität wird geprüft, ob die Formationsposition eins ist. Ist dies der Fall handelt es sich um den Formationsführer, der die entsprechende Route abfliegen muss. Bei Zahlen größer eins wird analog zur geraden Parität vorgegangen, wobei die Position auf der rechten Seite eingenommen wird (siehe Abbildung 2.25). Dieser Algorithmus muss während des Flugs zur Korrektur der Position aufgerufen werden.

#### 2.2.4.1.2. Formationsrotationsalgorithmus

Bei der Rotation einer V-Formation müssen zunächst die Rotationszeitpunkte bestimmt werden. Dafür muss die Länge der Formationsstrecke durch die Anzahl der Formationsteilnehmer geteilt werden. Die Rotationsrichtungen können im und gegen den Uhrzeigersinn verlaufen. Im ungeraden Fall wird zunächst die Parität geprüft. Ist diese gerade befindet sich das Flugzeug auf der linken Flanke. Hat dieser keinen Nachfolger muss es die Position hinter dem letzten Flugzeug auf der rechten Flanke einnehmen. Hat dieser einen Nachfolger, wird die Position vom hinteren Flugzeug eingenommen. In beiden Fällen muss der Formationsbildungsalgorithmus ausgeführt werden. Im ungeraden Fall wird analog verfahren, jedoch wird hier der Nachfolger des Formationsführer diese Position einnehmen und die entsprechenden Trajektorien abfliegen. Der alte Formationsführer nimmt dann die Position auf der rechten Seite innerhalb der Formation ein und muss wie alle Formationsteilnehmer den Formationsbildungsalgorithmus ausführen. Die Rotation muss bei allen Flugzeugen zeitgleich geschehen. Dieser Algorithmus wird in Abbildung 2.27 als Flow-Chart beschrieben.

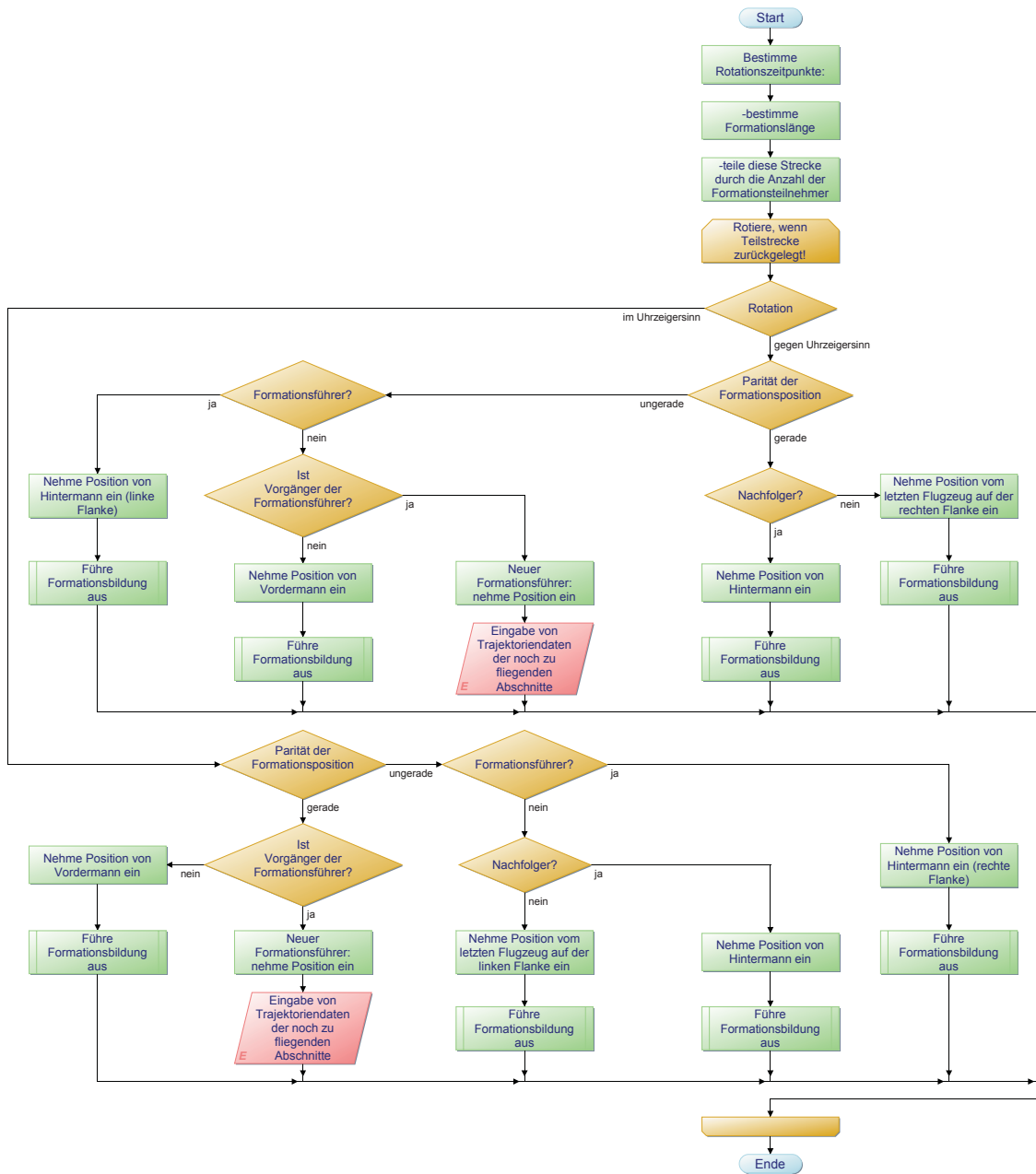


Abbildung 2.27 Rotation einer V-Formation

### 2.2.4.2. Echelon-Formation

Die "Echelon"-Formation oder auch Staffelformation ist im Grunde eine halbe V-Formation und hat auch einen militärischen Ursprung. Dabei liegt der große Vorteil darin, eine Flanke im großen Formationsverband zu schützen. Die Flugzeuge können sich entweder rechts oder links hinter einem Flugzeug formieren. In Abbildung 2.28 ist eine rechtsseitige Echelon-Formation dargestellt.

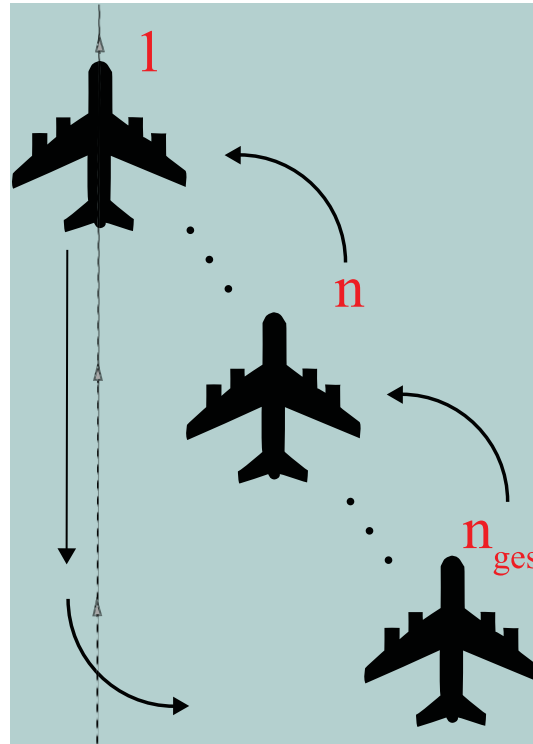


Abbildung 2.28 Positionierung in einer rechtsseitigen Echelon-Formation ( $n_{ges}$  entspricht der Formationslänge)

In der Natur kann diese Formation aufkommen, so wird sie meist bei kleineren Gruppen oder Vogelpaaren beobachtet. Die Bestimmung des Vorgängers ist trivial und wird in Regel 2.2 beschrieben.

Regel 2.2 : Bestimmung des Vorgängers in einer Echelon-Formation

Vorgänger = Formationsposition-1

#### 2.2.4.2.1. Formationsbildungsalgorithmus

Die Formationsbildung einer Echelon-Formation basiert zum größten Teil auf der V-Formation, die in Abbildung 2.29 dargestellt ist. Ein Flugzeug muss auch hier selbstständig die geeignete Position in der Wirbelschlepe des vorausfliegenden Flugzeugs einnehmen. Es kann dabei eine rechtsseitige bzw. linksseitige Staffelung gebildet werden. Nach der Festlegung der Formationspositionen wird geprüft, ob es sich um den Formationsführer handelt. Ist es der Formationsführer muss dieser die Trajektorien abfliegen. Im anderen Fall müssen die Formationsteilnehmer nach Regel 2.2 den Vorgänger bestimmen und dessen Wirbelschlepeninformationen übertragen. Anhand dieser Daten und des zu haltenden Sicherheitsabstands wird die relative Position zum vorausfliegenden Flugzeug bestimmt, die optimal ist, d.h. die höhere Luftwiderstandsreduzierung hat. Dann wird diese Position auf der

rechten (siehe Abbildung 2.25) bzw. linken Seite der Formation eingenommen. Zur Korrektur der aktuellen Position muss dieser Algorithmus während des Flugs aufgerufen werden.

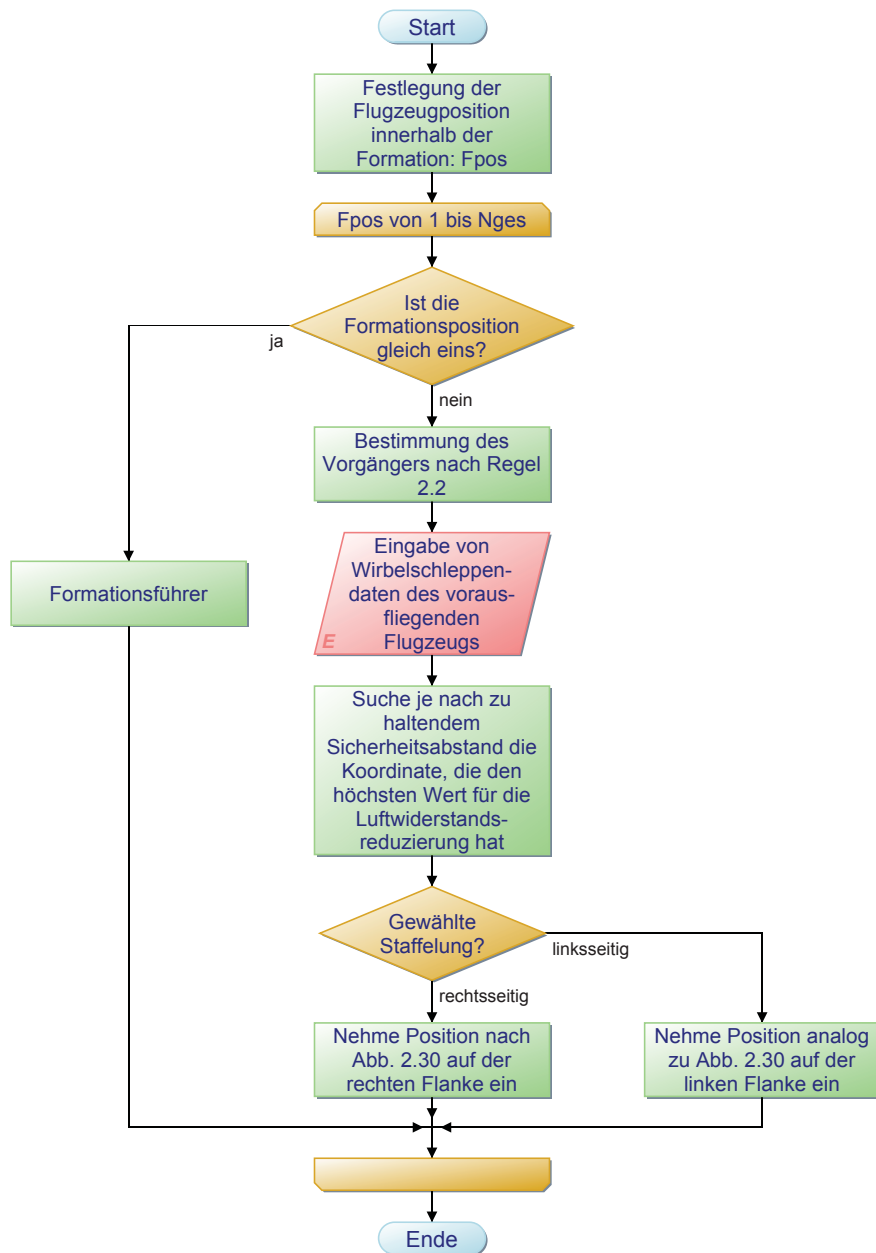


Abbildung 2.29 Bildung einer Echelon-Formation ( $F_{pos}$ : Position des aktuellen Flugzeugs;  $N_{ges}$ : Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer)

#### 2.2.4.2.2. Formationsrotationsalgorithmus

In Abbildung 2.30 wird die Rotation einer Echelon-Formation beschrieben, die im und gegen den Uhrzeigersinn stattfinden kann. Bei dieser Formation würde sich die Rotation gegen den Uhrzeigersinn anbieten, da in diesem Fall nur der Formationsführer etwas ausscheren müsste und seine Geschwindigkeit zu reduzieren hätte, um die hinterste Position einzunehmen (siehe auch Abbildung 2.28). Im anderen Fall müsste das Flugzeug in der hintersten Position seitlich

ausscheren und seine Geschwindigkeit deutlich erhöhen, um die Position des Formationsführers zu übernehmen. Dabei müsste das Flugzeug auf der zweiten Position kurz die Rolle des Formationsführers übernehmen, bis das hinterste Flugzeug die Spitze der Formation einnimmt.

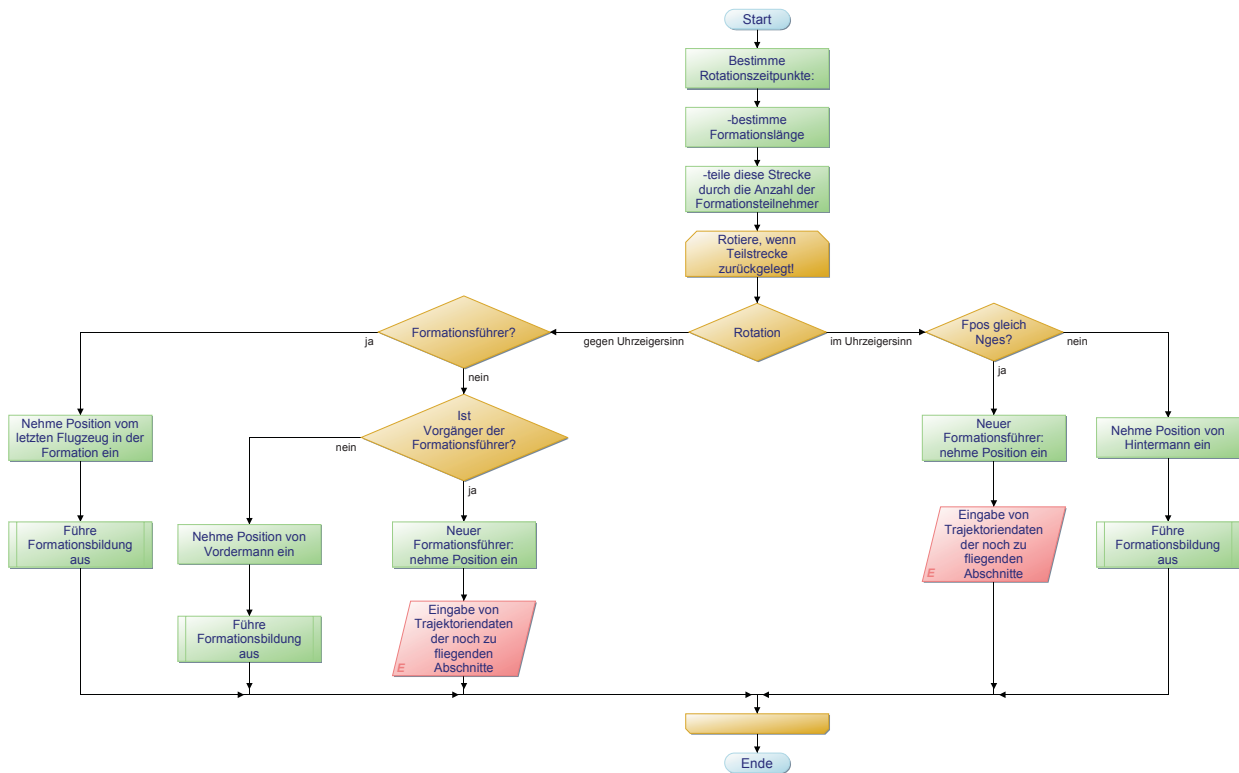


Abbildung 2.30 Rotation einer Echelon-Formation

Es gibt jedoch noch eine zweite Variante, indem die Formation im Uhrzeigersinn rotiert und der Formationsführer die letzte Position einnimmt. Diese ist analog zur Variante gegen den Uhrzeigersinn in Abbildung 2.30. Hierbei müsste der Formationsführer nach rechts ausscheren und seine Geschwindigkeit reduzieren.

Der Algorithmus fragt nach der Festlegung der Rotationszeitpunkte (Gesamtstrecke/Anzahl der Formationsteilnehmer) im Fall gegen dem Uhrzeigersinn ab, ob das aktuelle Flugzeug der Formationsführer ist. Ist dies der Fall, muss das Flugzeug an die letzte Position der Formation fliegen und den Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.29 ausführen. Im anderen Fall muss geprüft werden, ob das vorausfliegende Flugzeug der Formationsführer ist. Ist dies der Fall wird die Position eingenommen und der neue Formationsführer fliegt die restlichen Trajektorien ab. Im anderen Fall wird weiter dem vorausfliegenden Flugzeug gefolgt. Im Fall einer Rotation im Uhrzeigersinn wird geprüft, ob das aktuelle Flugzeug das letzte Flugzeug ist. Ist dies der Fall fliegt das letzte Flugzeug an die Spitze der Formation und als neuer

Formationsführer fliegt dieser die restlichen Trajektorien ab. Im anderen Fall wird dem vorausfliegenden Flugzeug gefolgt.

### 2.2.4.3. Umgekehrte V-Formation

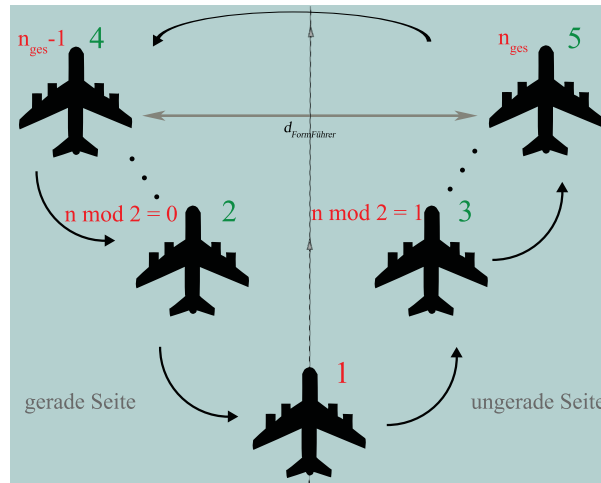


Abbildung 2.31 Positionierung in einer umgekehrten V-Formation ( $n_{\text{ges}}$  entspricht der Formationslänge)

In Abbildung 2.31 ist eine nach vorne offene V-Formation bzw. umgekehrte V-Formation dargestellt. Diese in der Natur nicht vorkommende Formation hat als wesentliches Merkmal, dass das zentrale Flugzeug auf Position 1 in den Wirbelschleppen der Flugzeuge 2 und 3 fliegt. Es ist auch ersichtlich, dass zwei Flugzeuge sich dann an der Spitze dieser Formation befinden. Beim Entwurf dieser Formation sind grundsätzlich zwei verschiedene Konzepte zu berücksichtigen:

1. Es gibt zwei Formationsführer auf der höchsten geraden und ungeraden Position, die eine entsprechende Mindestdistanz  $d_{\text{FormFührer}}$  zueinander einhalten müssen. Diese hängt von der Anzahl der Flugzeuge in der Formation und deren Spannweiten ab. Jedes weitere Flugzeug muss sich wie bei der V- oder Echelon-Formation geeignet zu seinem Vordermann ausrichten.
2. Der Formationsführer ist das Flugzeug auf Position 1, alle anderen Flugzeuge müssen sich im Gegensatz zur V-Formation optimal zum hinteren Flugzeug ausrichten.



Regel 2.3 : Bestimmung des Vorgängers in einer umgekehrten V-Formation bezüglich

Konzept 1

```

falls Flugzeug auf gerader Formationsposition
    falls Flugzeugposition = Formationslänge-1
        kein Vorgänger
    sonst
        Vorgänger = Formationsposition+2
falls Flugzeug auf ungerader Formationsposition
    falls Formationslänge ungerade
        falls Flugzeugposition = Formationslänge
            kein Vorgänger
        falls Formationslänge gerade
            falls Flugzeugposition = Formationslänge-1
                kein Vorgänger
    falls Flugzeugposition = 1
        VorgängerLinks = Formationsposition+1
        VorgängerRechts = Formationsposition+2
    sonst
        Vorgänger = Formationsposition+2

```

Die Bestimmung des Nachfolgers für Konzept 1 bzw. des Vorgängers für Konzept 2 wird in Regel 2.3 bzw. 2.4 beschrieben.

Regel 2.4 : Bestimmung des Nachfolgers in einer umgekehrten V-Formation bezüglich

Konzept 2

```

falls Flugzeug auf gerader Formationsposition
    falls Flugzeugposition = 2
        Nachfolger = Formationsposition-1
    sonst
        Nachfolger = Formationsposition-2
falls Flugzeug auf ungerader Formationsposition
    falls Flugzeugposition = 1
        kein Nachfolger
    sonst
        Nachfolger = Formationsposition-2

```

2.2.4.3.1. Formationsbildungsalgorithmus

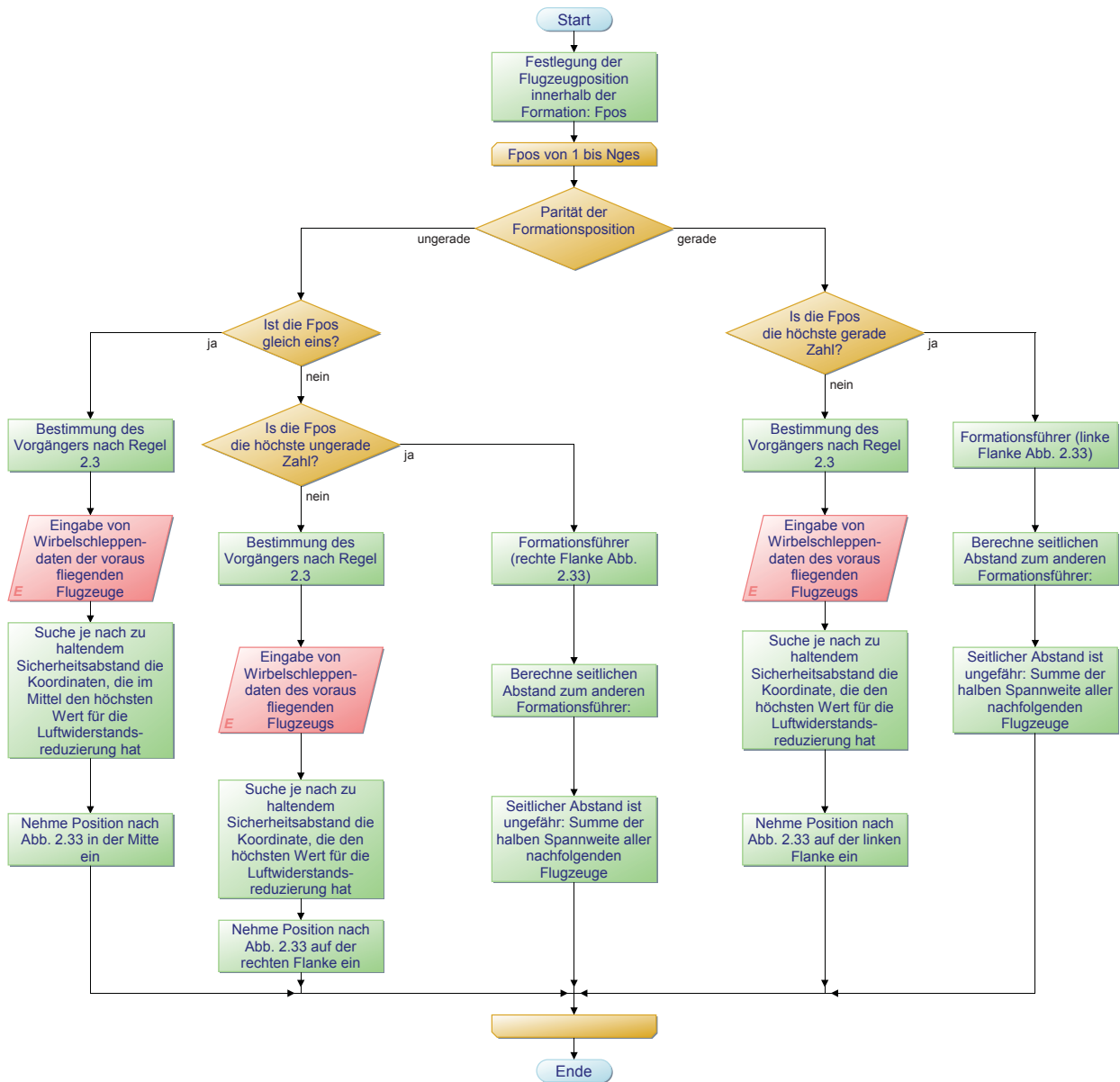


Abbildung 2.32 Bildung einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 1 ( $F_{pos}$ : Position des aktuellen Flugzeugs;  $N_{ges}$ : Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer)

Die beiden Möglichkeiten zur Bildung einer umgekehrten V-Formation setzen unterschiedliche Algorithmen zur Bildung voraus, die in Abbildung 2.32 und 2.33 dargestellt sind. Die Positionierung innerhalb der Formation muss dabei bereits bekannt sein. Es kann festgestellt werden, dass für die zweite Variante aus Abbildung 2.33 weniger Schritte zu berücksichtigen sind als in Variante eins aus Abbildung 2.32.

Im ersten Konzept (Abbildung 2.32) wird nach der Festlegung der Formationspositionen die Parität geprüft. Im ungeraden Fall wird geprüft, ob die Formationsposition eins ist. Ist dies der Fall werden nach Regel 2.3 die Vorgänger bestimmt. Danach wird anhand des zu haltenden Sicherheitsabstands und der Wirbelschleppeninformatoren der beiden vorausfliegenden

---

Flugzeuge die im Mittel optimale Position berechnet und die zentrale Position wie in Abbildung 2.31 eingenommen. Ist die Formationsposition ungleich eins wird geprüft, ob es sich um die höchste ungerade Zahl handelt. Ist dies der Fall, handelt es sich um den Formationsführer der rechten Flanke. Dieser muss dann auch den seitlichen Abstand überprüfen und die entsprechende Route fliegen. Ist die Formationsposition nicht die höchste ungerade Zahl, wird nach Regel 2.3 das vorausfliegende Flugzeug bestimmt. Nach dem zu haltenden Sicherheitsabstand und den Wirbelschleppeninformationen wird die optimale Position auf der rechten Flanke eingenommen (siehe Abbildung 2.31). Ist die Parität gerade wird analog verfahren, jedoch wird der Zweig zur Prüfung, ob es sich um den Formationsführer handelt, nicht berücksichtigt.

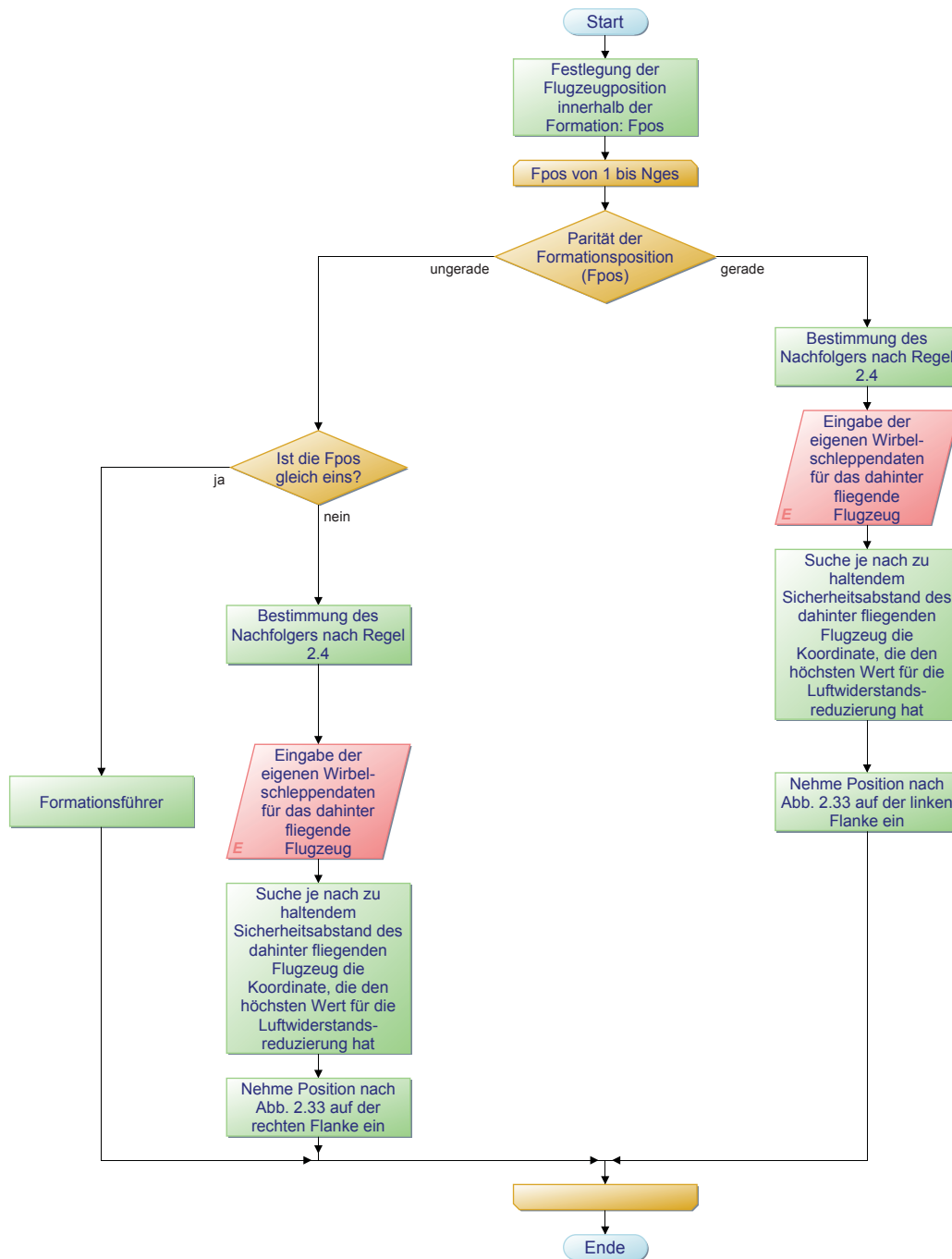


Abbildung 2.33 Bildung einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 2 ( $F_{pos}$ : Position des aktuellen Flugzeugs;  $N_{ges}$ : Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer)

Bei der zweiten Variante wird ebenfalls nach der Zuweisung die Parität der Formationsposition geprüft. Im ungeraden Fall wird geprüft, ob die Position eins ist, ist dies der Fall handelt es sich um den Formationsführer. Im anderen Fall wird der Nachfolger nach Regel 2.4 bestimmt und die eigenen Wirbelschleppeninformationen werden aufgerufen. Anhand dieser Daten und dem zu haltenden Sicherheitsabstand wird die Position auf der rechten Flanke der Formation eingenommen (siehe Abbildung 2.31). Im geraden Fall wird lediglich die Position auf der linken Flanke eingenommen.

---

Diese Algorithmen müssen während des Flugs zur Korrektur der aktuellen Position aufgerufen werden.

#### 2.2.4.3.2. Formationsrotationsalgorithmus

Die beiden Konzepte zur Bildung der umgekehrten V-Formation sind auch bei der Rotation anzupassen und in den Abbildungen 2.34 und 2.35 dargestellt.

Im ersten Konzept aus Abbildung 2.34 werden zunächst die Rotationsteilstrecken festgelegt (Gesamtstrecke/Anzahl der Flugzeuge). Dieser Algorithmus muss zeitgleich bei allen Flugzeugen ausgeführt werden. Dabei kann im und gegen den Uhrzeigersinn rotiert werden. Im Fall gegen den Uhrzeigersinn wird zunächst die Parität geprüft. Im ungeraden Fall wird geprüft, ob es sich um den Formationsführer auf der rechten Flanke handelt. Ist dies der Fall, ist dies der Formationsführer auf der linken Flanke und entsprechende Trajektorien müssen abgeflogen werden. Ist dies nicht der Fall, wird geprüft, ob das vorausfliegende Flugzeug der Formationsführer ist. In diesem Fall wird das aktuelle Flugzeug der neue Formationsführer der rechten Flanke. Im anderen Fall wird die Position des vorausfliegenden Flugzeugs eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.32 wird ausgeführt. Im geraden Fall der Formationsposition wird die entsprechende Position des hinteren Flugzeugs eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.32 wird ausgeführt. Wird die Rotation im Uhrzeigersinn ausgeführt, wird analog vorgegangen.

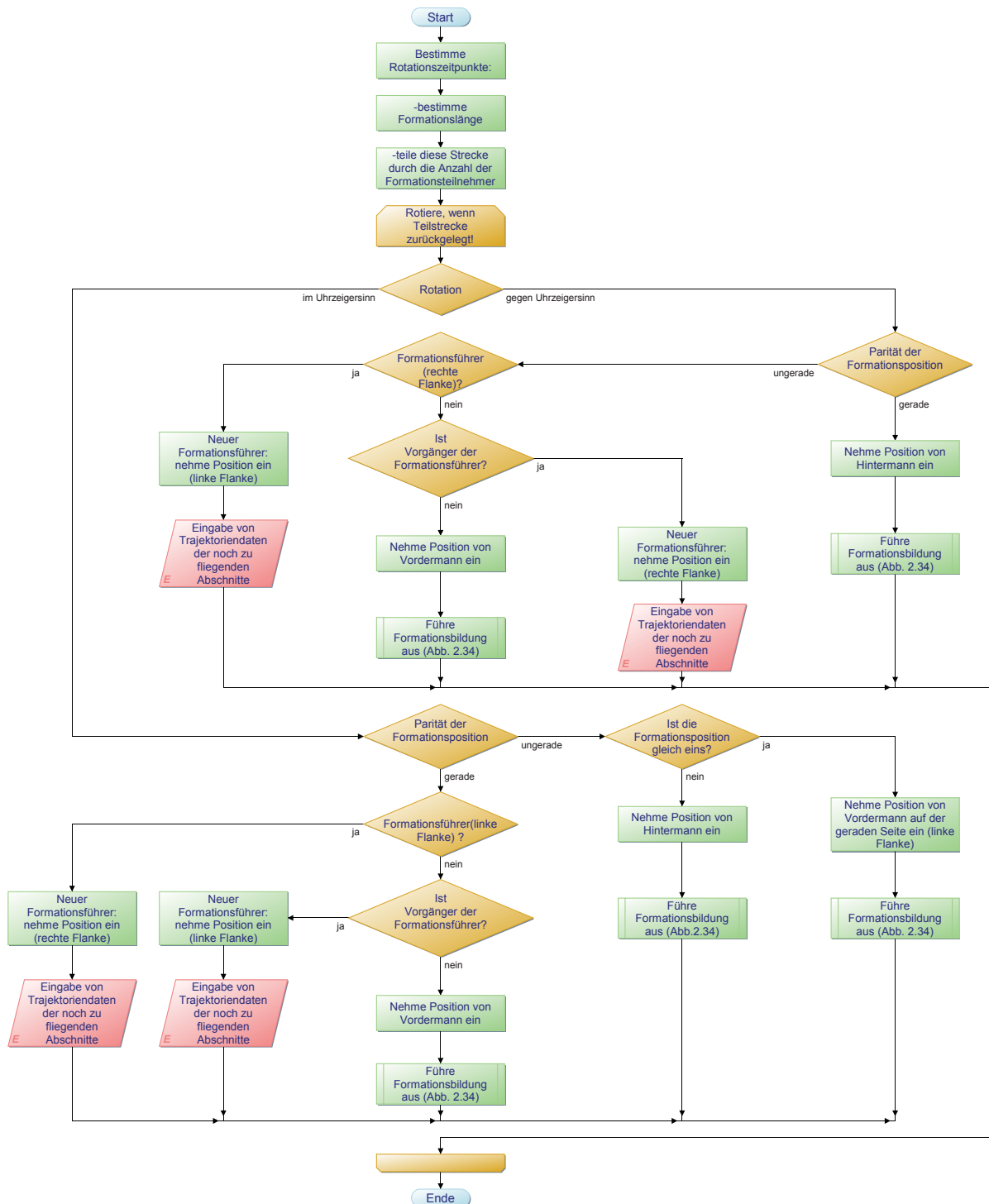


Abbildung 2.34 Rotation einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 1

Bei der zweiten Variante der Rotation aus Abbildung 2.35 sind weniger Schritte nötig. Es wird nach der Festlegung der Rotationsteilstrecken im Fall gegen den Uhrzeigersinn die Parität geprüft. Im geraden Fall wird geprüft, ob der Nachfolger der Formationsführer auf Position eins ist; ist dies der Fall, wird das aktuelle Flugzeug der Formationsführer und fliegt die entsprechenden Trajektorien ab. Ist dies nicht der Fall, wird die Position vom Hintermann eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.33 wird ausgeführt.

Im ungeraden Fall wird geprüft, ob es sich um die Formationsspitze der rechten Flanke handelt. Ist dies der Fall, wird die Formationsspitze der linken Flanke eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.33 wird ausgeführt. Im anderen Fall wird geprüft, ob das vorausfliegende Flugzeug die Formationsspitze der rechten Flanke ist; ist dies der Fall wird die Position auf der rechten Formationsspitze eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.33 wird ausgeführt. Handelt es sich nicht um die Formationsspitze, wird die Position des vorausfliegenden Flugzeugs eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.33 wird ausgeführt.

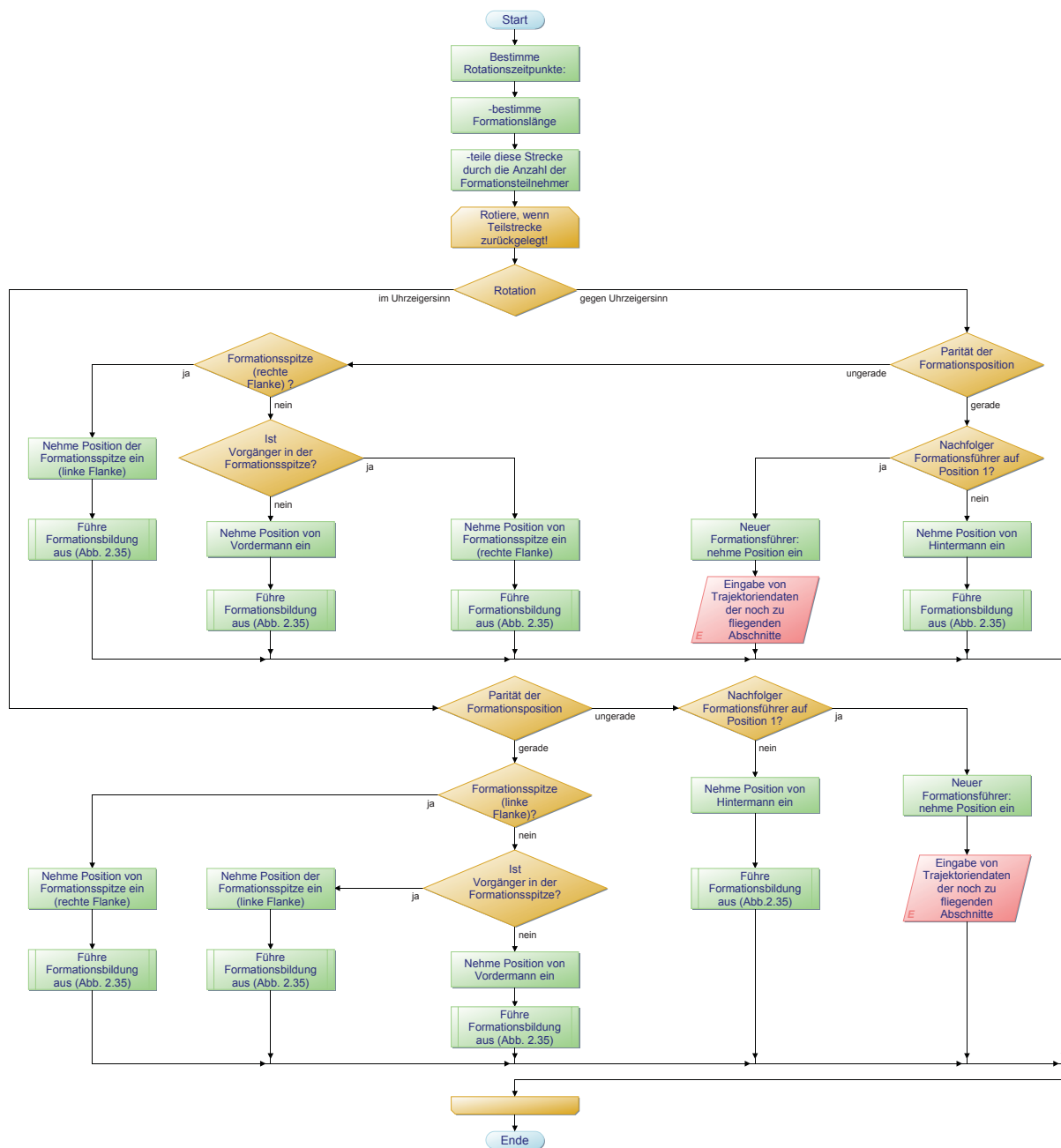


Abbildung 2.35 Rotation einer umgekehrten V-Formation nach Konzept 2

#### 2.2.4.4. Rauten-Formation

Die Rauten-Formation oder auch Diamant-Formation ist eine Formation, die von Kunstfliegerstaffeln geflogen wird. Das Besondere an dieser Formation ist, dass die V- und umgekehrte V-Formation miteinander verknüpft werden. Das Flugzeug auf der Position 8 in Abbildung 2.36 hat wie bei der umgekehrten V-Formation (Abbildung 2.31 Position 1) einen erhöhten Auftrieb, der auf die Wirbelschleppen der Flugzeuge auf den Positionen 6 und 7 in Abbildung 2.36 zurückzuführen ist. Bei der Bestimmung des Vorgängers anhand der Formationsposition muss dies berücksichtigt werden (siehe Regel 2.5).

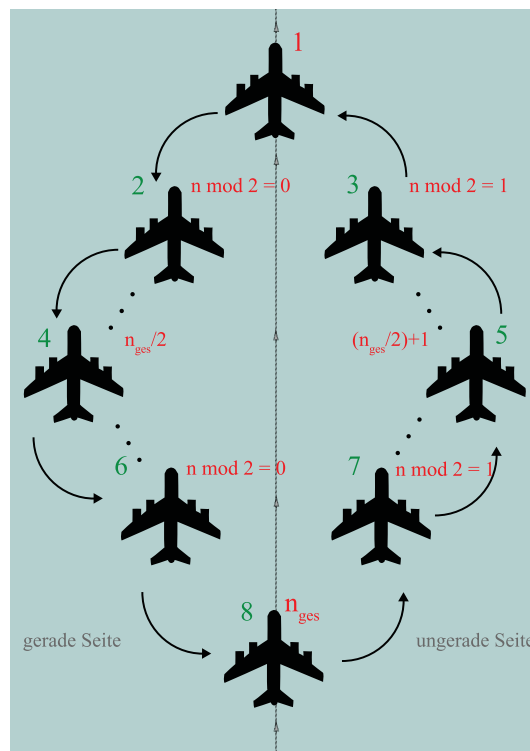


Abbildung 2.36 Positionierung in einer Rauten-Formation ( $n_{\text{ges}}$  entspricht der Formationslänge)



---

### Regel 2.5 : Bestimmung der Vorgänger in einer Rauten-Formation

```

falls Flugzeug auf gerader Formationsposition
  falls Flugzeugposition = 2
    Vorgänger = Flugzeugposition-1
  falls Formationslänge gerade
    & Flugzeugposition = Formationslänge
    VorgängerLinks = Flugzeugposition-2
    VorgängerRechts = Flugzeugposition-1
  sonst
    Vorgänger = PositionsIndex-2
falls Flugzeug auf ungerader Formationsposition
  Vorgänger = Flugzeugposition-2

```

#### 2.2.4.4.1. Formationsbildungsalgorithmus

In Abbildung 2.37 wird der Zusammenschluss zu einer Rauten-Formation beschrieben. Wie bei allen Formationen gilt, dass die Anzahl und Ordnung bekannt ist. Die Positionierung innerhalb der Formation muss dabei bereits bekannt sein. Zur Korrektur der aktuellen Position muss auch dieser Algorithmus während des Flugs aufgerufen werden. Bei diesem Algorithmus müssen sich die Flugzeuge abhängig von der Formationslänge ( $N_{ges}$ ) z.B. ab Position 5 in Abbildung 2.36 anders hinter dem voraus fliegenden Flugzeug positionieren. Für diesen Fall wird geprüft, ob die Formationsposition ( $F_{pos}$ ) wie folgt ist:

### Regel 2.6. : Positionierung in einer Rauten-Formation

```

falls ungerade Formationsposition
  falls  $F_{pos} > (N_{ges}/2)+1$ 
    links positionieren
  sonst
    rechts positionieren
falls gerade Formationsposition
  falls  $F_{pos} > (N_{ges}/2)$ 
    rechts positionieren
  sonst
    links positionieren

```

In Abbildung 2.36 wird das Flugzeug an der unteren Spitze der Formation gesondert betrachtet, da es von den Wirbelschleppen der beiden vorausfliegenden Flugzeuge beeinflusst wird:

- $N_{ges}$  ist gerade &  $F_{pos} = N_{ges}$

Der Algorithmus prüft auf die Parität der Formationsposition. Im ungeraden Fall wird gefragt, ob es die Position eins und somit der Formationsführer ist. Im anderen Fall wird geprüft, ob die Formationsposition größer als die halbe Gesamtzahl der Flugzeuge plus eins ist (siehe Regel 2.6). Ist dies der Fall wird nach Regel 2.5 der Vorgänger bestimmt und die entsprechenden Wirbelschleppendaten werden eingelesen. Danach wird anhand des vorgegebenen Sicherheitsabstands und der Wirbelschleppendaten die optimale Position bestimmt und hinter dem linken Flügel des vorausfliegenden Flugzeugs die Position bezogen (siehe auch Abbildung 2.36). Im Fall, dass die Position kleiner als die halbe Gesamtanzahl der Flugzeuge plus eins ist, wird hinter dem rechten Flügel positioniert (siehe auch Abbildung 2.36). Im geraden Fall der Formationsposition wird geprüft, ob die letzte Position der Formation ( $N_{ges}$ ) gerade ist und es sich um das letzte Flugzeug handelt. In diesem Fall werden die Vorgänger nach Regel 2.5 bestimmt. Es werden die Wirbelschleppendaten der vorausfliegenden Flugzeuge eingelesen und nach dem zu haltenden Sicherheitsabstand wird anhand der Daten die im Mittel optimalste Position berechnet. Diese Position wird dann hinter dem rechten und linken Flügel der vorausfliegenden Flugzeuge wie in Abbildung 2.36 eingenommen. Ist die Position nicht die letzte in der Formation, wird geprüft, ob die Position größer ist als die halbe Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer. Ist dies der Fall wird analog zum ungeraden Fall hinter dem rechten und im anderen Fall hinter dem linken Flügel positioniert.

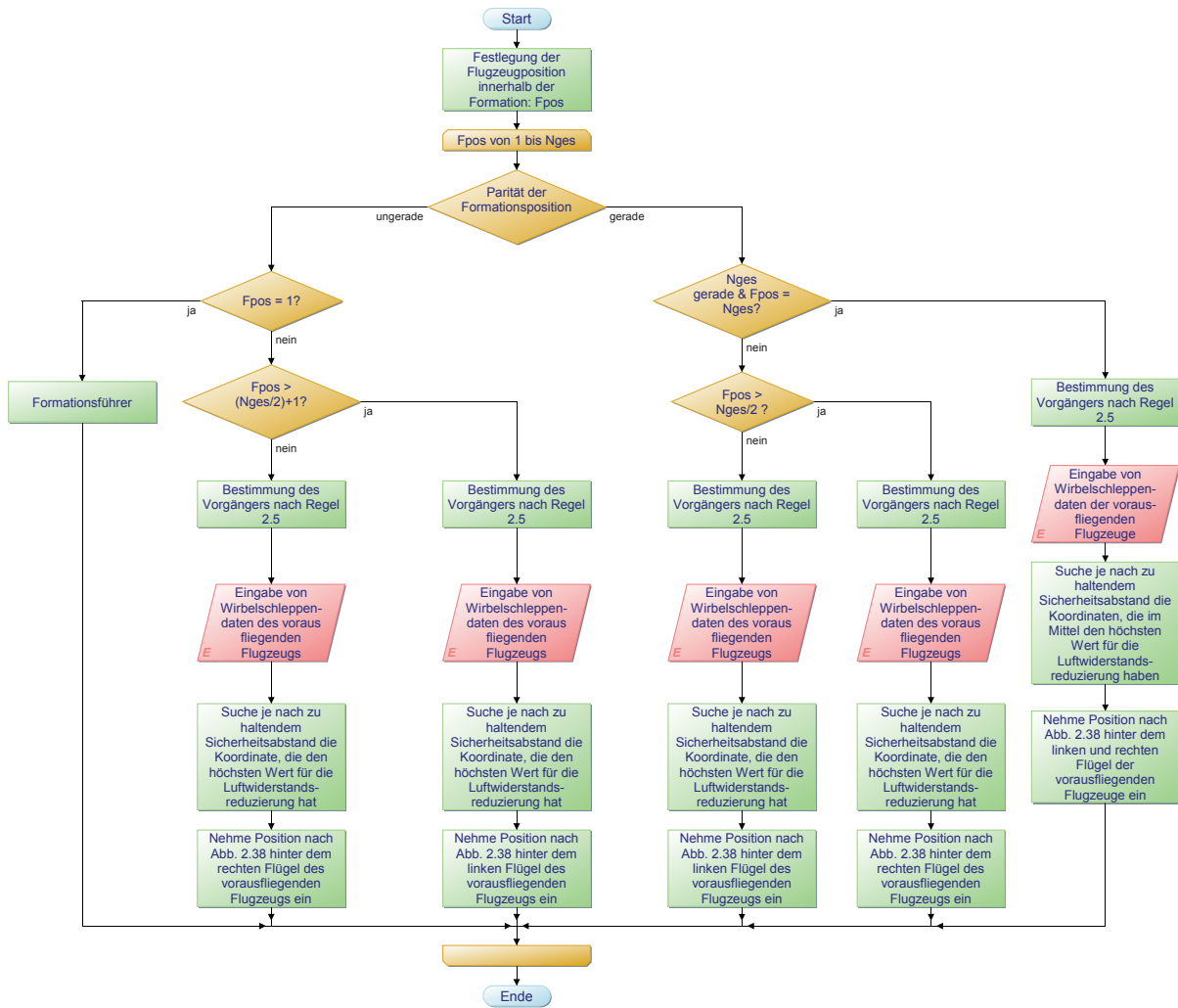


Abbildung 2.37 Bildung einer Rauten-Formation ( $F_{pos}$ : Position des aktuellen Flugzeugs;  $N_{ges}$ : Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer)

#### 2.2.4.4.2. Formationsrotationsalgorithmus

Die Rotation der Rauten-Formation wird in Abbildung 2.38 im und gegen den Uhrzeigersinn beschrieben.

Dieser Algorithmus bestimmt zunächst die Rotationsstrecken. Wird im Uhrzeigersinn rotiert, prüft der Algorithmus die Parität. Im ungeraden Fall wird die Position des hinteren Flugzeugs eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.37 wird ausgeführt. Handelt es sich um einer geraden Position, wird geprüft, ob der Vorgänger der Formationsführer ist; ist dem so, wird dessen Position eingenommen und der neue Formationsführer fliegt die entsprechenden Trajektorien ab. Ist dem nicht so, wird die Position des vorausfliegenden Flugzeugs eingenommen und der Formationsbildungsalgorithmus wird ausgeführt (siehe Abbildung 2.37). Im Falle gegen den Uhrzeigersinn wird analog vorgegangen.

Dabei muss dieses Manöver wie bei allen Formationen zeitgleich von allen Flugzeugen gestartet werden.

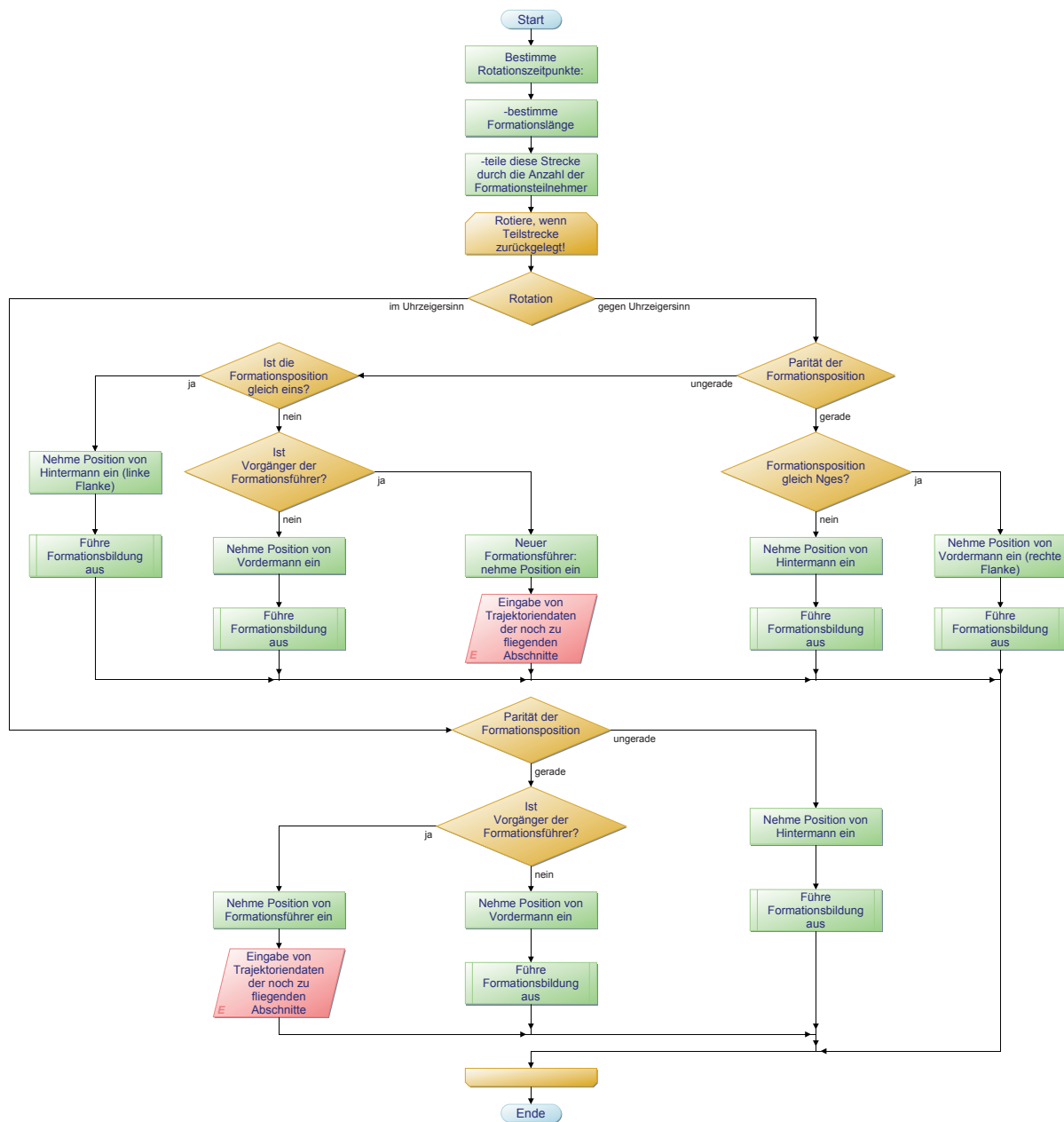


Abbildung 2.38 Rotation einer Rauten-Formation

#### 2.2.4.5. Delta-Formation

Die sogenannte Delta-Formation wird von Kunstfliegerstaffeln geflogen und ist in Abbildung 2.39 dargestellt. Der wesentliche Vorteil dieser Formation ist, dass aufgrund der dichteren Stafflung, bei steigender Größe der Formationen, viele Flugzeuge von zwei Wirbelschleppen vorausfliegender Flugzeuge profitieren können.

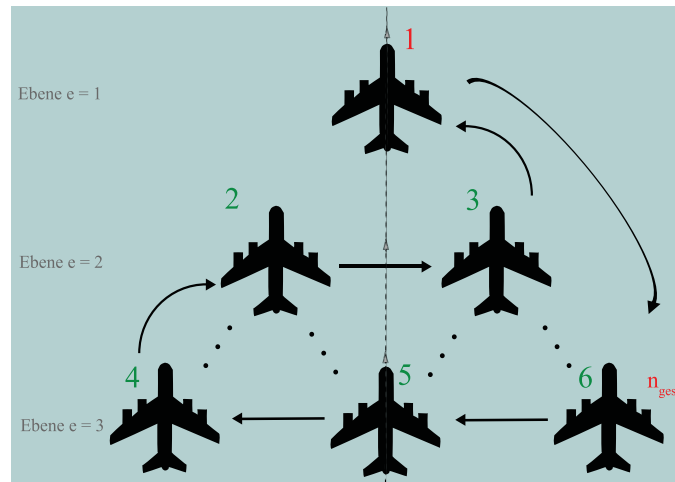


Abbildung 2.39 Positionierung in einer Delta -Formation ( $n_{\text{ges}}$  entspricht der Formationslänge)

#### 2.2.4.5.1. Formationsbildungsalgorithmus

Die Formationsbildung einer Delta-Formation ist wesentlich komplizierter und wird in Abbildung 2.40 dargestellt. Da im Gegensatz zu dieser Formation bei den anderen Formationen die Positionierung anhand der Verteilung der geraden und ungeraden Positionsnummern auf die rechte bzw. linke Flanke direkt auf den Vorgänger bzw. Nachfolger zurückzuführen war, muss dieser Algorithmus unterscheiden, ob sich ein Flugzeug auf der linken oder rechten Flanke oder in der Mitte befindet. Denn anhand dieser Information kann ein Flugzeug unabhängig von der aktuellen visuellen Bestimmung seines Vorgängers dessen Positionierung bestimmen.

Nach der Festlegung der Formationspositionen wird geprüft, ob es sich um den Formationsführer handelt, ist dies der Fall, fliegt dieser an der Spitze die entsprechenden Trajektorien ab. Im anderen Fall wird mit Hilfe der Formel ( $Sum = \frac{e(e+1)}{2}$ ; Ebene e siehe Regel 2.7 und Abbildung 2.39) geprüft, ob die Formationsposition gleich Sum ist; ist dies der Fall, wird der Vorgänger mit Hilfe von Regel 2.8 bestimmt.

Regel 2.7 : Bestimmung der Formationsebene mit Hilfe der Formationsposition

```
for(i=1; i<Nges; i++)
  Zähler += i
  falls Formationsposition <= Zähler
    e=i
```

Anhand der Wirbelschleppendaten des vorausfliegenden Flugzeugs und des zu haltenden Sicherheitsabstands wird die optimale Position bestimmt und eingenommen.

### Regel 2.8 : Bestimmung der Vorgänger

falls Flugzeug auf linker Seite

$$\text{Vorgänger} = \text{Formationsposition} - (e-1)$$

falls Flugzeug auf rechter Seite

$$\text{Vorgänger} = \text{Formationsposition} - e$$

falls Flugzeug in der Mitte

$$\text{Vorgänger}_{\text{Links}} = \text{Formationsposition} - e$$

$$\text{Vorgänger}_{\text{Rechts}} = \text{Formationsposition} - (e-1)$$

Ist die aktuelle Position des Flugzeugs ungleich  $Sum$  wird geprüft, ob diese kleiner  $Sum$  ist; ist diese größer, handelt es sich um einen Fehler. Im anderen Fall wird geprüft, ob  $Sum - (e-1)$  gleich der Formationsposition ist. Ist dies der Fall, ist das Flugzeug auf der linken Flanke und im anderen Fall in der Mitte der Formation.

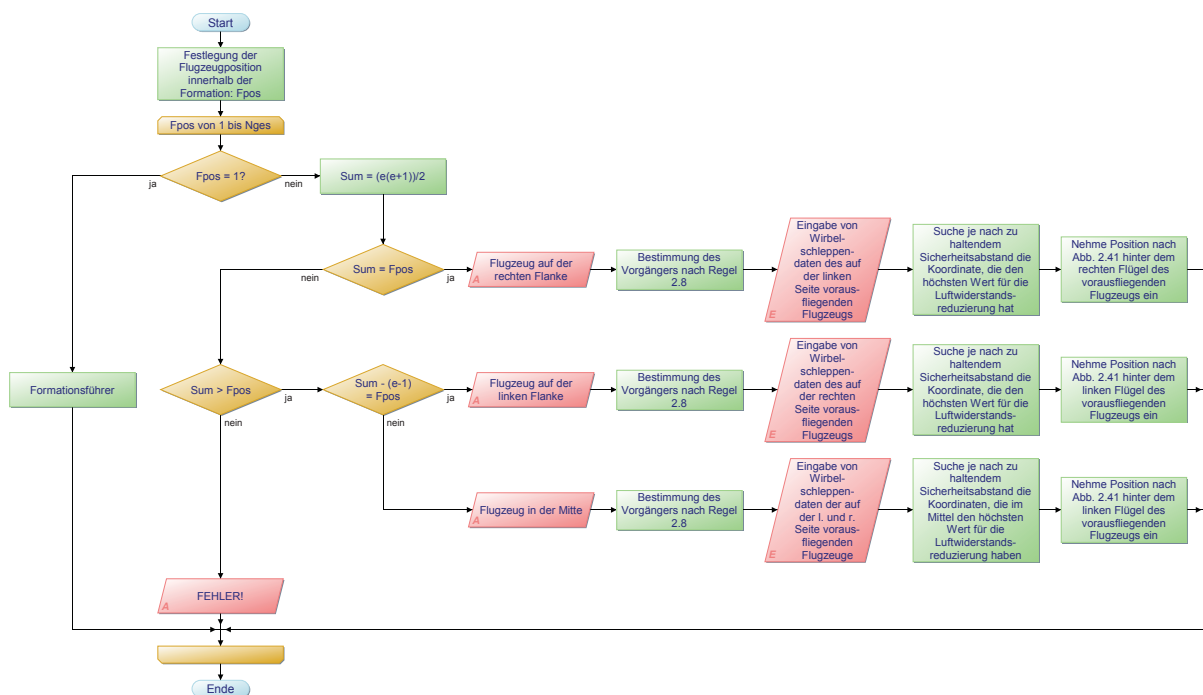


Abbildung 2.40 Bildung einer Delta-Formation ( $F_{pos}$ : Position des aktuellen Flugzeugs;  $N_{ges}$ : Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer;  $e$ : aktuelle Formationsebene )

Zur Korrektur der aktuellen Position muss auch dieser Algorithmus während des Flugs aufgerufen werden.

#### 2.2.4.5.2. Formationsrotationsalgorithmus

Die Rotation einer Delta-Formation kann aus Sicherheitsgründen nur in der Form wie in Abbildung 2.41 durchgeführt werden.

Nach der Bestimmung der Rotationsstrecken, wird geprüft, ob es sich um den Formationsführer handelt; ist dies der Fall, nimmt dieser die Position des letzten Flugzeugs

ein. Im anderen Fall wird geprüft, ob sich das Flugzeug auf einer geraden oder ungeraden Formationsebene befindet. Im ungeraden Fall wird gefragt, ob das Flugzeug auf der linken Außenseite ist; ist dies der Fall, nimmt es die Position  $e-1$  ( $e$  Ebene), d.h. die des vorausfliegenden Flugzeugs ein. Im anderen Fall muss durch ein Seitenmanöver die Position des linken Seitenmanns eingenommen. Ist die Ebene gerade, wird geprüft, ob das Flugzeug auf der rechten Seite ist. Ist es nicht der Fall, wird die Position des rechten Seitenmanns eingenommen. Ist es der Fall wird geprüft, ob es sich um das Flugzeug auf Position drei handelt; ist dies der Fall, wird das Flugzeug der neue Formationsführer und fliegt die entsprechenden Trajektorien ab. Handelt es sich nicht um das Flugzeug auf Position drei, wird die Position des vorausfliegenden Flugzeugs eingenommen. In allen Fällen, außer dem neuen Formationsführer, wird die Formationsbildung aus Abbildung 2.40 ausgeführt.

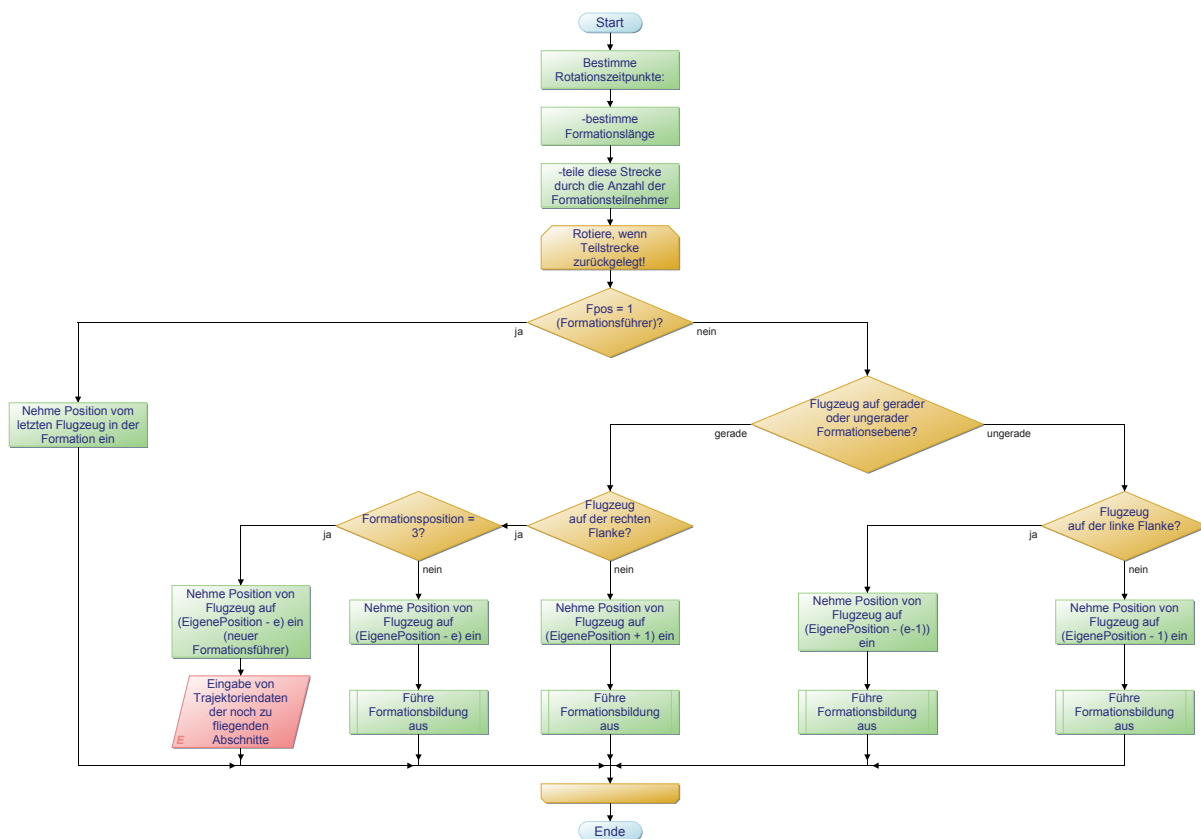


Abbildung 2.41 Rotation einer Delta-Formation ( $e$ : aktuelle Formationsebene)

#### 2.2.4.6. Notfallsituationen eines Flugzeugs in Formation

Der Formationsflug in der zivilen Luftfahrt ist mit entsprechenden Risiken verbunden. Daher werden in diesem Abschnitt zunächst Notfallsituationen beschrieben und die entsprechenden Algorithmen zur Rekonfiguration der Formationen vorgestellt.

Es gibt verschiedene Gründe, aus denen ein Flugzeug, das sich innerhalb einer Formation befindet ausfallen könnte:

1. Ausfall eines oder mehrerer Triebwerke
2. Kollision
3. Ausfall der Kommunikation
4. Ausfall des Systems zur Einhaltung der Formation (falls vorhanden)
5. Schwere Windböen
  - z.B. CAT (Clean Air Turbulence): Sogenannte Reinluftturbulenzen, die bei klarer Sicht und großen Höhen entstehen können [HAR67]
6. Treibstoffmangel (falsche Berechnung oder starker Gegenwind)
7. Gewaltvoller Zwischenfall

Bei Ausfällen von Triebwerken (Punkt 1), Schäden (Punkt 2) durch leichte Kollisionen oder Treibstoffmangel (Punkt 6) ist eine sofortige Notlandung notwendig. Dabei sollte, wenn möglich, der nächste Flughafen angeflogen werden. Der Ausfall von Systemen, die zur Einhaltung der Formation notwendig sind (Punkt 3 und 4), würde wie in Abschnitt 2.2.3.2 vorgeschlagen das Ausweichen auf eine Alternativroute zur Folge haben. Bei wetterbedingten Störungen (Punkt 5), die den Weiterflug im Verband nicht mehr erlauben, können sich einige Flugzeuge auf Alternativrouten begeben.

In den Abbildungen 2.42 - 2.47 werden die verschiedenen Algorithmen zur Rekonfiguration der Formationen aus den Abschnitten 2.2.4.1 bis 2.2.4.5 vorgestellt. Alle Algorithmen verlangen am Ende die Ausführung des entsprechenden Formationsbildungsalgorithmuses. Bei allen Algorithmen wird beschrieben, wie sich die Formation nach dem Ausfall eines Flugzeugs wieder zu einem Verband zusammenschließt. Beim Ausfall wird angenommen, dass keine Kommunikation mit dem betroffenen Flugzeug möglich ist.



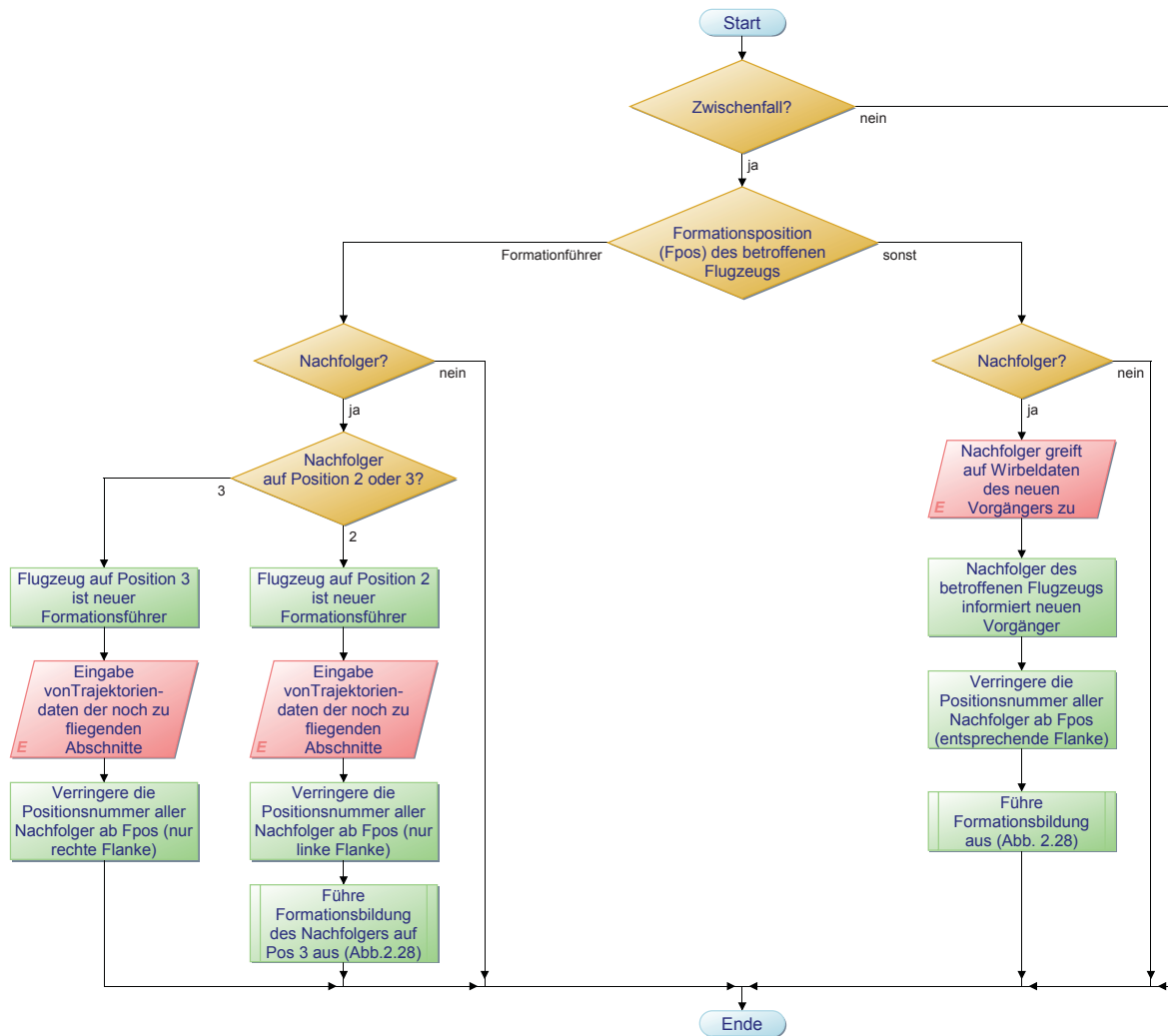


Abbildung 2.42 Rekonfiguration einer V-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs

Tritt bei der V-Formation aus Abbildung 2.42 ein Zwischenfall auf, wird geprüft, ob es sich um den Formationsführer handelt. Ist dies der Fall, muss ein Nachfolger vorhanden sein. Falls einer auf der zweiten Position vorhanden ist, ist dieser der dritten Position vorzuziehen. Das Flugzeug auf der zweiten bzw. dritten Position wird dann der neue Formationsführer. Die entsprechenden Trajektorien müssen dann abgeflogen werden. Alle Formationspositionen müssen dann entsprechend geändert werden. Handelt es sich nicht um den Formationsführer, wird analog vorgegangen. Jedoch muss das dahinter befindliche Flugzeug die Wirbelschleppendaten des neuen vorausfliegenden Flugzeugs einlesen, falls es einen Nachfolger gibt. Alle Formationspositionen müssen ab der betroffenen Position angepasst werden. Nach der Einnahme der Position wird dann die Formationsbildung aus Abbildung 2.26 bei allen Strängen ausgeführt.

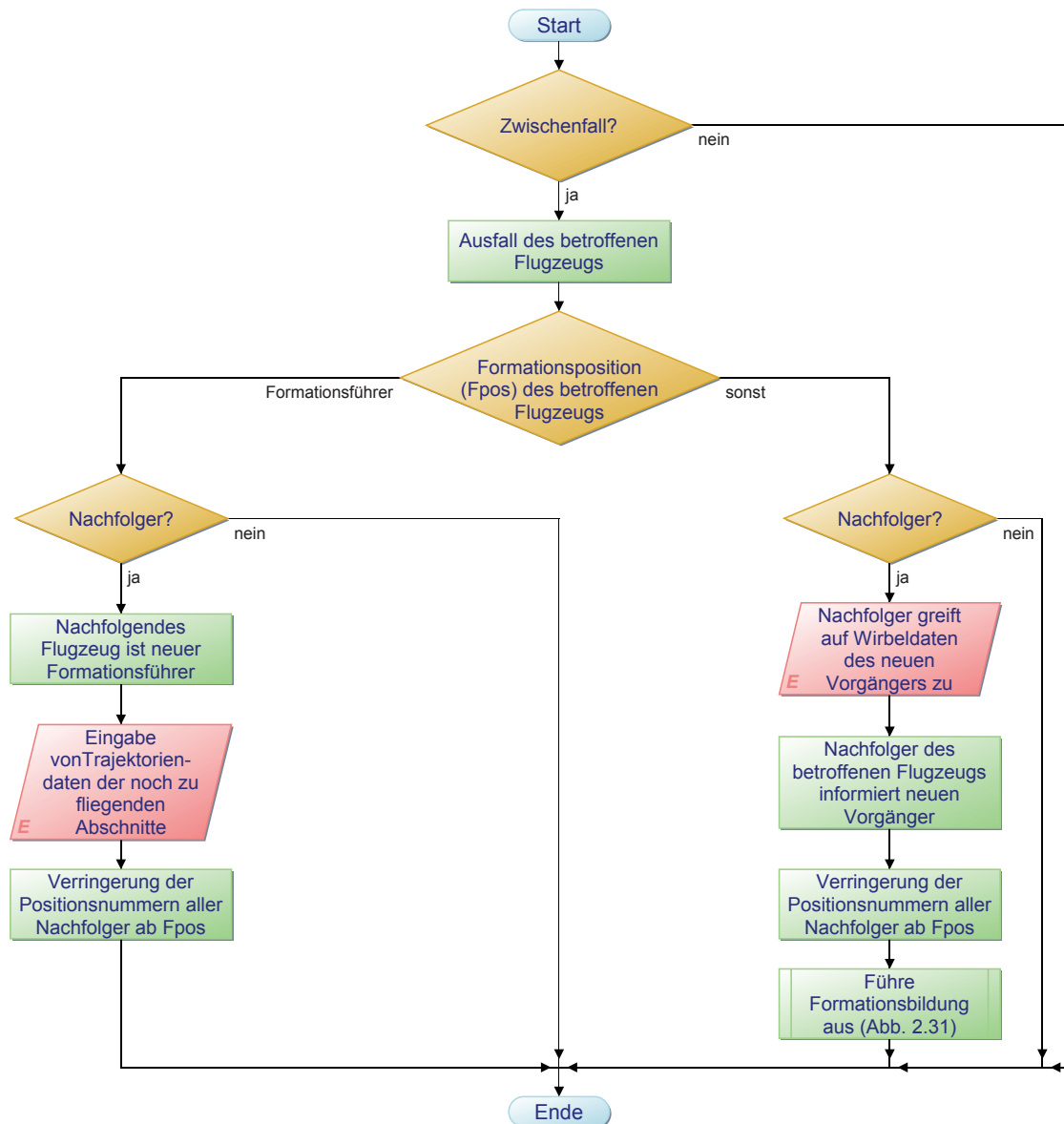


Abbildung 2.43 Rekonfiguration einer Echelon -Formation bei Ausfall eines Flugzeugs

In Abbildung 2.43 wird die Rekonfiguration einer Echelon-Formation beschrieben. Tritt ein Zwischenfall ein, wird zwischen Formationsführer und Formationsmitglied unterschieden. Fällt der Formationsführer aus, muss ein Nachfolger vorhanden sein, der neuer Formationsführer wird und die entsprechenden Trajektorien abfliegt. Alle Formationspositionsnummern müssen in diesem Fall angepasst werden. Fällt ein Formationsteilnehmer aus, muss geprüft werden, ob ein Nachfolger vorhanden ist. Ist dies der Fall muss dieser vom neuen vorausfliegenden Flugzeug die Wirbelschleppendaten einlesen und alle Positionsnummern werden ab der betroffenen Stelle angepasst. Bei beiden Strängen wird der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.29 ausgeführt.

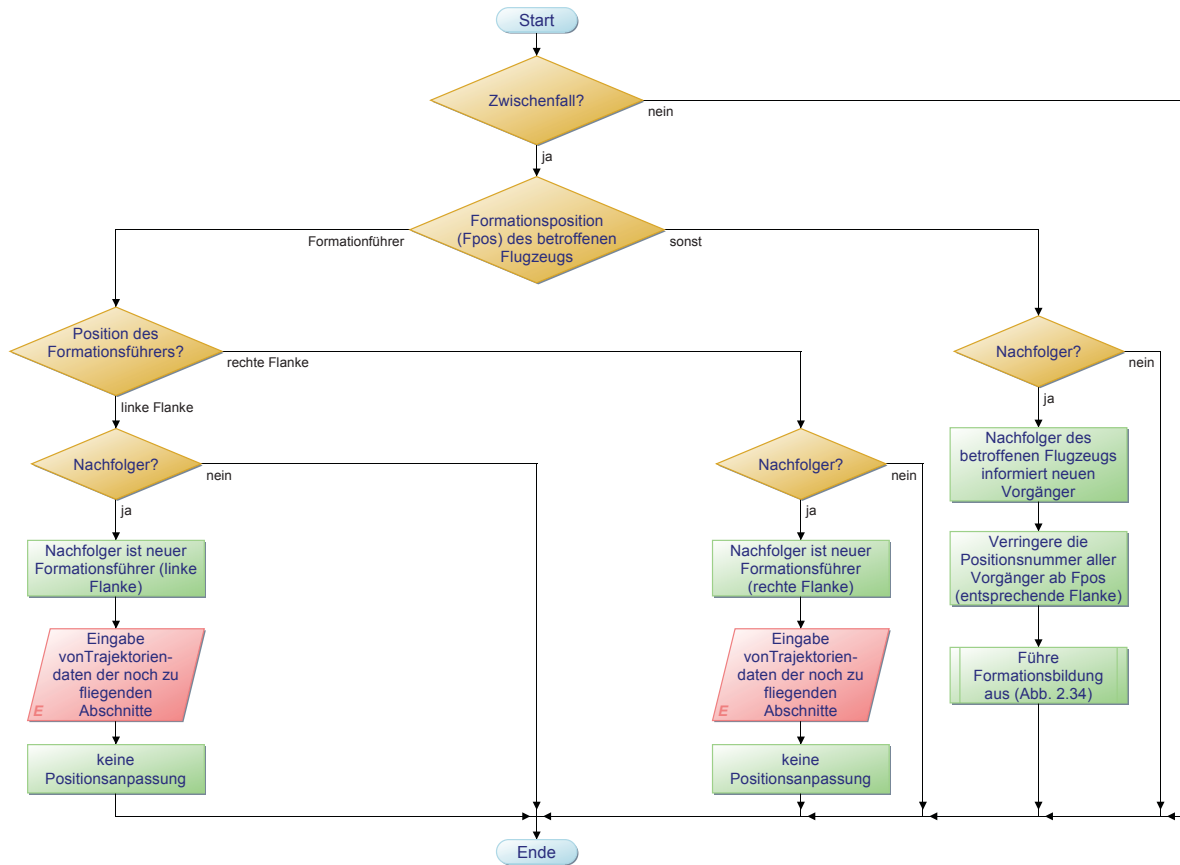


Abbildung 2.44 Rekonfiguration einer umgekehrten V-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs (nach Konzept 1)

Der Algorithmus der umgekehrten V-Formation wird für die beiden Entwurfsmöglichkeiten aus Abschnitt 2.2.4.3 in den Abbildungen 2.44 und 2.45 dargestellt.

Bei Konzept 1 aus Abbildung 2.44 wird nach dem Zwischenfall geprüft, ob es sich um den Formationsführer oder einen Formationsmitglied handelt. Hat der Formationsführer der rechten Flanke einen Nachfolger, muss dieser die entsprechenden Trajektorien abfliegen. Es wird analog mit dem Formationsführer der linken Flanke verfahren. Handelt es sich um ein Formationsmitglied und hat dieser einen Nachfolger, muss der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.32 ausgeführt werden.

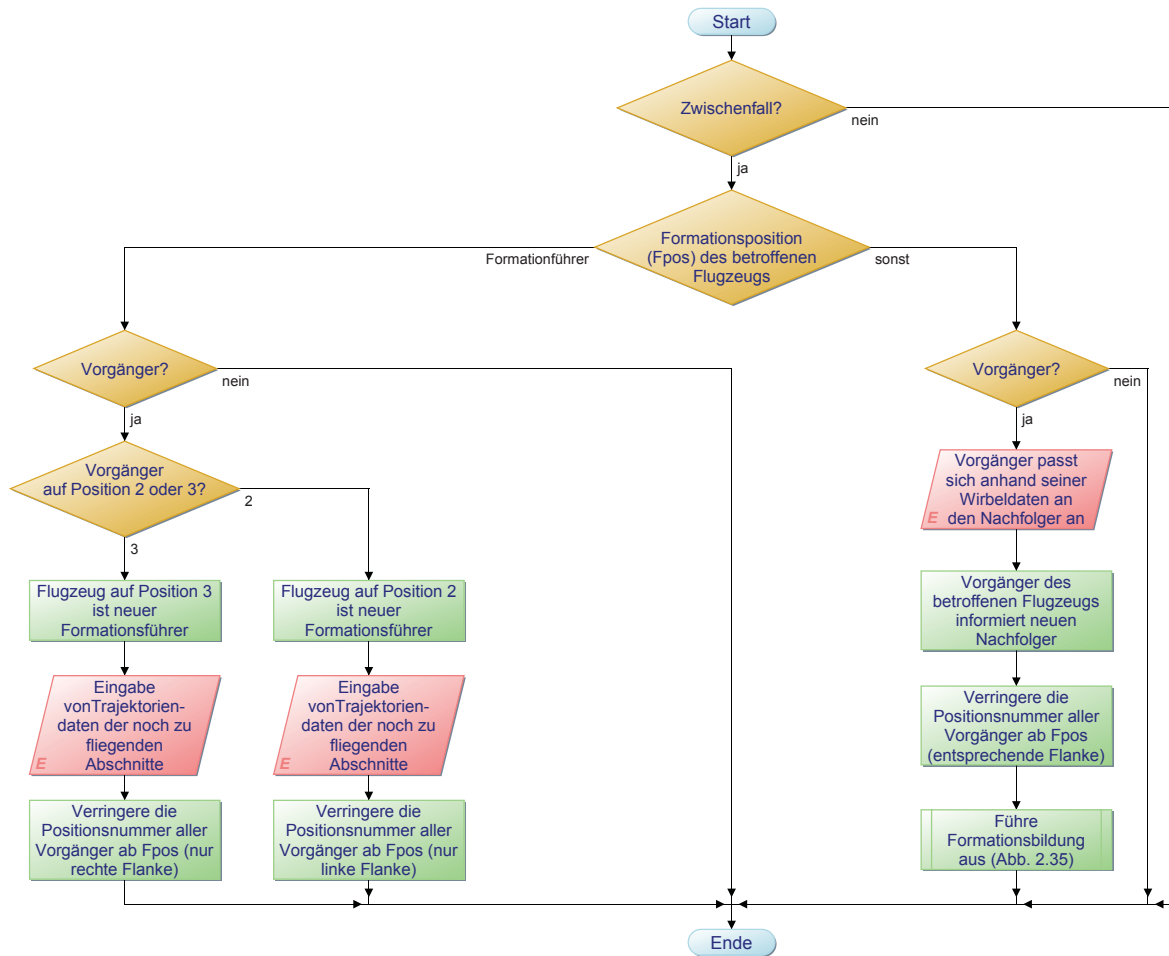


Abbildung 2.45 Rekonfiguration einer umgekehrten V-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs  
(nach Konzept 2)

Das zweite Konzept der umgekehrten V-Formation prüft nach einem Zwischenfall, ob es sich um den Formationsführer oder ein Formationsmitglied handelt. Handelt es sich um ein Formationsmitglied und hat dieser einen Vorgänger, passt sich dieser an den neuen Nachfolger an. Alle Positionsnummern der entsprechenden Flanke werden angepasst und der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.33 wird ausgeführt. Im Falle des Ausfalls des Formationsführers, muss dieser mindestens einen Vorgänger haben; ist dem so, muss dieser auf Position zwei bzw. drei die entsprechenden Trajektorien abfliegen.

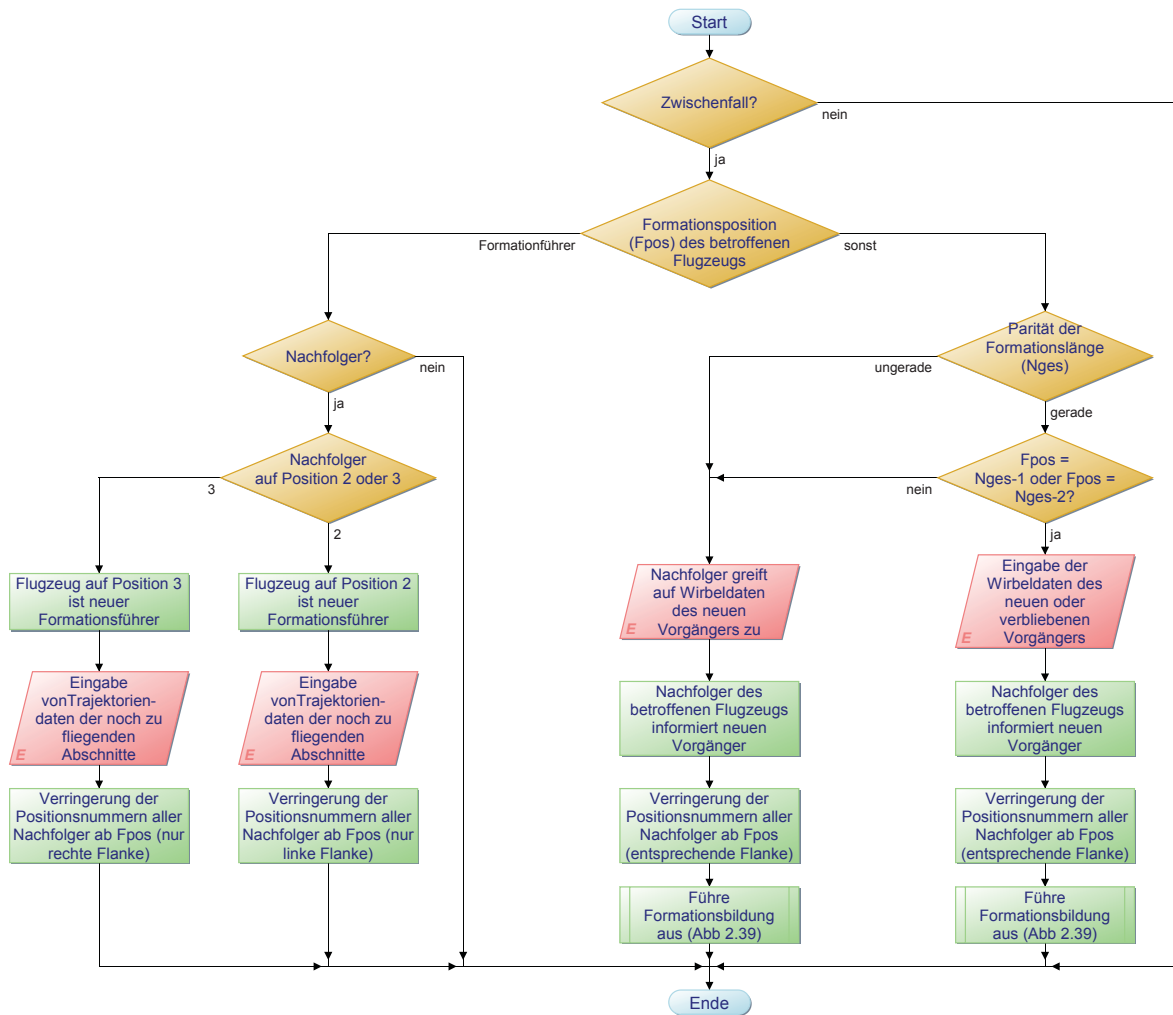


Abbildung 2.46 Rekonfiguration einer Rauten-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs ( $F_{\text{pos}}$ : Position des aktuellen Flugzeugs;  $N_{\text{ges}}$ : Gesamtanzahl der Formationsteilnehmer)

Bei der Rekonfiguration der Rauten-Formation (siehe Abbildung 2.46) wird bei einem Zwischenfall in Formationsführer und -mitglied unterschieden. Hat der Formationsführer einen Nachfolger auf Position zwei oder drei (siehe Abbildung 2.36), wird das Flugzeug auf Position zwei bzw. drei Formationsführer und muss die entsprechenden Trajektorien abfliegen. Als Formationsmitglied wird die Parität der Formationslänge geprüft und im geraden Fall der Formationslänge ( $N_{\text{ges}}$ ) muss berücksichtigt werden, dass beim Ausfall der Flugzeuge auf den Positionen 6 ( $N_{\text{ges}}-1$ ) oder 7 ( $N_{\text{ges}}-2$ ) in Abbildung 2.36 sich das Flugzeug auf der Position 8 neu ausrichten muss, um den optimalen Auftrieb des verbliebenen Vorgängers zu erhalten. In beiden Fällen wird der Formationsbildungsalgorithmus aus Abbildung 2.37 ausgeführt.

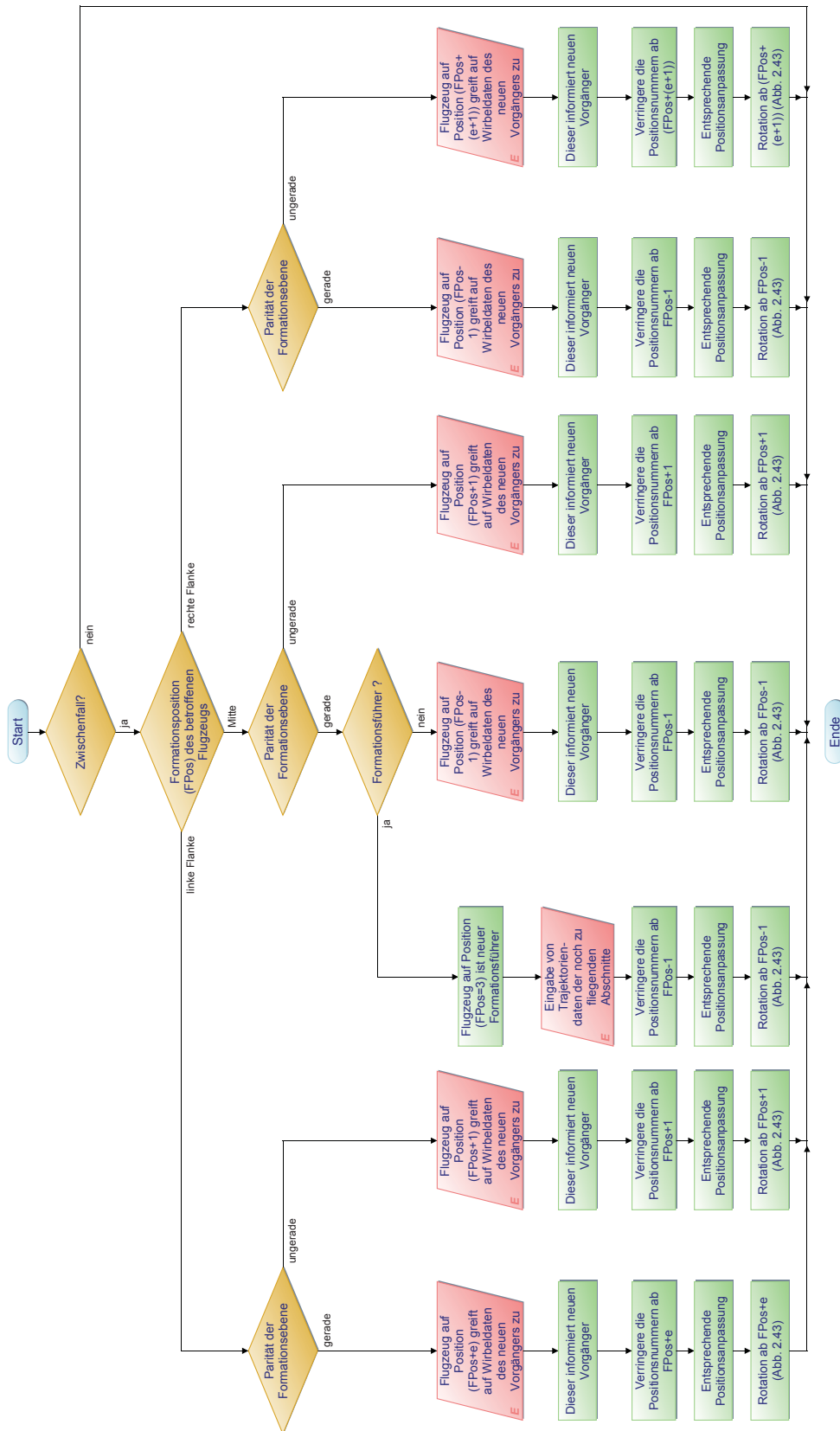


Abbildung 2.47 Rekonfiguration einer Delta-Formation bei Ausfall eines Flugzeugs ( $F_{pos}$ : Position des aktuellen Flugzeugs; e: aktuelle Formationsebene )

In Abbildung 2.47 wird der Algorithmus zur Rekonfiguration der Delta-Formation beschrieben, der analog zu den Algorithmen zur Bildung und Rotation auch von der aktuellen Formationsebene  $e$  abhängig ist. Tritt bei einem Flugzeug ein Zwischenfall ein und wird die Rekonfiguration der Formation ausgeführt, unterscheidet der Algorithmus zwischen Formationsteilnehmer der rechten bzw. linken Flanke und denen in der Mitte. Dieser Algorithmus prüft die Parität der Formationsebene in dem das Flugzeug ausgefallen ist und führt ab dieser Position den Rotationsalgorithmus aus Abbildung 2.47 aus. Vorher müssen selbstverständlich die Positionsnummern ab der betroffenen Position um eins verringert werden.

### 2.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass der Begriff Schwarmverhalten sich auch auf fliegende Flugzeuge beziehen lässt. Es wurde zunächst der Begriff Schwarmverhalten, vor dem Hintergrund biologischer Aspekte eingeführt. Danach wurde dieser Begriff auf den Formationsflug bezogen und untersucht. Neben den ökonomischen und ökologischen Vorteilen des Formationsflugs und einigen Technologien, die zur Umsetzung solch eines Vorhabens bereits vorhanden sind, wurden auch die theoretischen Grundlagen der Aerodynamik und des Formationsflugs vorgestellt. Es wurde auch eine neuartige Methode zur operationellen Erweiterung des Formationsflugs am Beispiel des NATS vorgeschlagen und beschrieben (S.35).

Dieses Kapitel beschrieb im Wesentlichen die Algorithmen zur Bildung, Rotation und Rekonfiguration der verschiedenen Formationstypen. Diese sollen im Folgenden anhand der beschriebenen Algorithmen bewertet werden.

Die *V-Formation* wird in der Natur von beispielsweise Zugvögeln eingesetzt und ist auch in den meisten Forschungsarbeiten vertreten, die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellt wurden. Sie wird auch seit Jahrzehnten in der militärischen Luftfahrt geflogen und hat deswegen das meiste Potenzial für den Einsatz. Der Vorteil dieser Formation ist, dass es einen Formationsführer gibt und dessen Wirbelschleppen sich auf zwei Flugzeuge auswirken. Die seitlichen Abstände der V-Formation zwischen den Flugzeugen auf den Positionen 2 und 3 in Abbildung 2.25 sind unrealistisch und entsprechen der Spannweite des vorausfliegenden Flugzeugs (dies gilt auch für die umgekehrte V-, Rauten- und Delta Formation). Eine Strukturierung der V-Formation wie von Ning et al. in Abbildung 2.48a würde sich hier anbieten. Die Flugzeuge auf der Position 2 und 3 sind nicht auf gleicher Höhe, so ist das Risiko gesenkt, dass diese seitlich kollidieren.

Die *Echelon-Formation* wird teilweise auch von kleineren Vogelschwärmen geflogen und wird seit Jahrzehnten beim Militär eingesetzt. Der wesentliche Vorteil dieser Formation ist, dass es nur einen Formationsführer gibt und die einfache Staffelnung wesentlich leichter von den Flugzeugen zu halten ist als bei allen anderen Formationsarten. Der Nachteil ist jedoch, dass bei gleicher Anzahl an Flugzeugen dieser Formationstyp deutlich länger ist als alle anderen und der Passagierdurchsatz pro Lufttransportslot dadurch auch geringer wird.

Die *umgekehrte V-Formation* hat aufgrund der Form den Vorteil, dass das Flugzeug auf der Position 1 (Abbildung 2.31) von den Wirbelschleppen zweier Flugzeuge profitieren kann. Nachteilig wirken sich jedoch die zwei Flugzeuge an den Spitzen der Formation aus. Zu dieser Formationsart wurden zwei Konzepte vorgestellt. Aus operationeller Sicht und der Berücksichtigung von Sensoren zur Ausrichtung von Flugzeugen innerhalb einer Wirbelschleppe, würde sich nur das erste Konzept anbieten. In beiden Fällen müssten auch die zwei Formationsführer an der Spitzen (Position 4 und 5 Abbildung 2.36) miteinander kommunizieren, damit die Formation nicht auseinanderbricht. Der geringe seitliche Abstand der Flugzeuge auf den Positionen 2 und 3 (Abbildung 2.31) ist ebenfalls ein Sicherheitsrisiko, deshalb wird auch hier eine Strukturierung wie von Ning et al. vorgeschlagen (siehe Abbildung 2.48b).

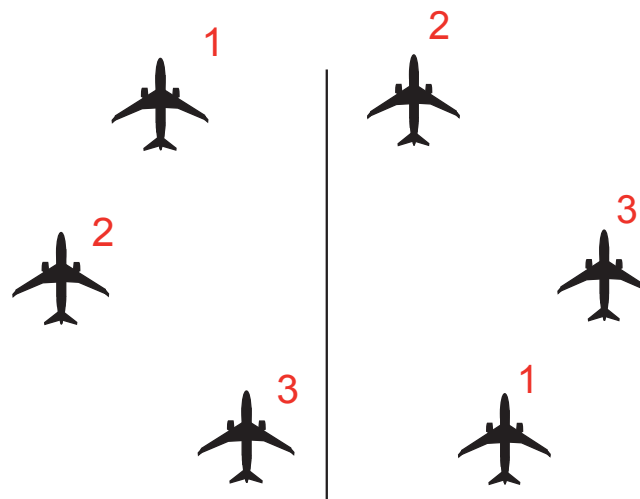


Abbildung 2.48 V- und umgekehrte V-Formation nach Ning et al. (Quelle: [NIN10] S. 861) a) links V-Formation b) rechts Echelon-Formation

Die *Rauten-Formation* ist nach eigener Einschätzung eine bessere Alternative zur *umgekehrten V-Formation*, da hier ein Formationsführer an der Spitze vorgesehen ist. Dadurch ist eine einfachere Strukturierung der Formation möglich, indem jedes Flugzeug sich nur dem vorausfliegenden Flugzeug anpasst. Die Flugzeuge auf den Positionen 2 und 3 (in Abbildung 2.36) können von den Wirbelschleppen des Formationsführers und das Flugzeug



---

am Ende der Formation (Position 8 Abbildung 2.36) kann von zwei Wirbelschleppen der vorausfliegenden Flugzeuge profitieren. Diese Formation birgt auch ein Sicherheitsrisiko auf den Positionen 2 und 3 bzw. 6 und 7 (Abbildung 2.36), deshalb würde sich eine Anpassung nach Ning et al. anbieten.

Die *Delta-Formation* birgt aufgrund der dichteren Staffeln Gefahren, die nicht abzuschätzen sind. Jedoch würde die dichtere Staffeln auch eine höhere Effizienz zur Folge haben, da gerade Flugzeuge auf den hinteren Positionen von überlagerten Wirbelschleppen der vorausfliegenden Flugzeuge profitieren würden.

Für alle Formationsarten gilt generell, dass diese mit einem entsprechenden Flugzeugmix nicht symmetrisch entworfen werden können, da unterschiedliche Abstände zu halten sind. Dadurch würde sich besonders die sehr dicht gestaffelte Delta-Formation nicht für einen entsprechenden Flugzeugmix eignen. Hierbei werden auch die Analogien zur Natur ersichtlich, da die nach hinten offene V-Formation das Zusammenschließen verschiedener Vogelarten intuitiv zulässt.

Inwieweit die Rotation der Formationen, die in diesem Kapitel vorgestellt wurde, aus der Sicht der Luftfahrt praktikabel ist, kann nicht abgeschätzt werden, denn solch ein Manöver birgt Gefahren. So sinken die Gefahren durch die Vergrößerung der Abstände, die mehrere nautische Meilen betragen können. Dennoch kann abgeschätzt werden, dass die Rotation bei der dichter gestaffelten Delta-Formation gefährlicher ist als bei der V-Formation. Alternativ kann bei einem Formationsflug, an dem verschiedene Fluggesellschaften beteiligt sind, das Fliegen an der Formationsspitze vergütet werden.

Im nächsten Kapitel wird ein konzeptueller Entwurf zur agentenbasierten Modellierung des Formationsflugs vorgestellt. Dabei wird ein konzeptueller Entwurf eines Frameworks beschrieben, um dieses Vorhaben mit einer Agentensimulation zu modellieren. In Kapitel 4 wird dann anhand des implementierten Prototyps exemplarisch für die V- und Echelon-Formation eine Abschätzung bezüglich deren Effizienz getroffen.



### 3. Konzeptueller Entwurf für die agentenbasierten Modellierung zur Untersuchung des zivilen Formationsfluges

In Abschnitt 2.2 wurde gezeigt, dass das in der Natur zu beobachtende Phänomen Schwarmverhalten auch in der Luftfahrt auffindbar ist und für die zivile Luftfahrt umgesetzt werden kann. Hierzu wurde der Formationsflug eingeführt und neben der Erweiterung der Routenplanung wurden Algorithmen zur Bildung, Rotation und Rekonfiguration von verschiedenen Formationstypen entwickelt.

Dieses in der Luftfahrt aufkommende Thema kann mittels agentenbasierte Modelle analysiert werden, um Algorithmen für den Einsatz beim Formationsflug zu validieren.

In diesem Kapitel wird der konzeptuelle Entwurf zur Modellierung des Formationsflugs unter der Prämisse des Schwarmverhaltens beschrieben. Dazu werden die Grundlagen der agentenbasierten Modellierung vorgestellt. Anschließend wird der konzeptuelle Entwurf präsentiert.

#### 3.1. Begriffliche und methodische Grundlagen

Agentenbasierte Systeme sind auf Stanislaw Ulam, John von Neumann [NEU66] und dem Entwurf von zellulären Automaten (siehe Definition 3.1) zurückzuführen. Hierzu entwarf von Neumann einen Universalkopierer bzw. Konstruktor innerhalb eines Zellulären Automaten (ZA) mit einer geringen Anzahl von Nachbarn pro Zelle und 29 verschiedenen Zuständen. Dieser sogenannte „Von Neumann universal constructor“ ermöglichte die unendliche Vervielfältigung bestimmter Muster in einem zellulären Universum. Im Allgemeinen kann ein ZA wie ein schachbrettartiges Gitter von Zellen betrachtet werden, in dem sich die Zustände der Zellen nach bestimmten Regeln ändern [MAI12]. Ein ZA wird klassischerweise auch wie folgt definiert:

- ein Raum  $R$  (Zellularraum)
- eine endliche Nachbarschaft  $N$
- eine Zustandsmenge  $Q$
- eine lokale Überföhrungsfunktion  $\delta: Q^N \rightarrow Q$

Es gibt zwei unterschiedliche am meisten verbreitete Nachbarschaftsentwürfe, die in Abbildung 3.1 dargestellt sind. So gibt es nach von Neumann eine Vierer-Nachbarschaft (siehe Abbildung 3.1a) und nach Moor eine Nachbarschaftsbeziehung in einem quadratischen Raster (siehe Abbildung 3.1b) [MAI12].

Definition 3.1: *Zellulärer Automat:*

“Cellular automata are a class of mathematical systems characterized by discreteness (in space, time, and state values), determinism, and local interaction. A cellular automaton consists of a finite dimensional lattice of site whose values are restricted to finite (typically small) set of integers  $Z_k = \{0, 1, \dots, k - 1\}$ . The values of each time step is then determined as a function of values of the neighboring sites at the previous time step.” (zitiert aus [GUT90] S. 4)

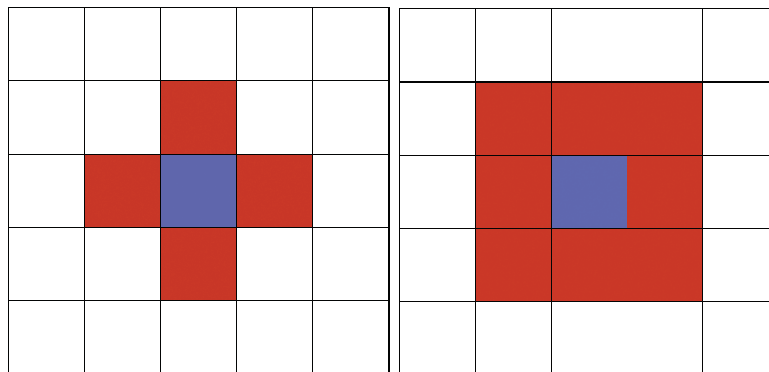


Abbildung 3.1 Von-Neumann-Nachbarschaft (a; links) und Moor-Nachbarschaft (b; rechts)

Eine der ersten Implementierungen eines ZA wurde von John Conway in Form, des damals noch als Spiel angesehenen und heute eher als Simulation zu betrachtenden Programms „Life“ [GAR70] umgesetzt. Jede quadratische Zelle in einem unendlichen zweidimensionalen Raster kann entweder den Zustand *lebendig* oder *tot* haben. Anhand vier sehr einfacher Regeln wurde diese Simulation unter Berücksichtigung der Moor-Nachbarschaft umgesetzt.

1. Jede Zelle, die weniger als zwei lebendige Nachbarn hat, stirbt aufgrund der Unterbevölkerung.
2. Jede Zelle mit zwei oder drei lebendigen Nachbarn lebt in der nächsten Generation.
3. Jede Zelle mit mehr als drei lebendigen Nachbarn stirbt aufgrund der Überbevölkerung.
4. Jede tote Zelle mit drei lebendigen Nachbarzellen wird lebendig aufgrund der Reproduktion.

Einer der ersten konzeptuellen Entwürfe eines agentenbasierten Modells wurde von Schelling [SCHE71] beschrieben, der ein dynamisches Modell zur Untersuchung von Trennung von Ethnien umfasst. Die erste agentenbasierte Modellierung von Schwärmen wurde von Craig Reynolds ([REY87], [REY99]) implementiert. Dabei führte er den Begriff „Boids“ ein, der

ein vogelähnliches Objekt beschreibt, das basierend auf den Regeln von einzelnen Agenten einen Schwarm bildet (zitiert aus [REY87]):

1. Bewege dich weg, sobald dir jemand zu nahe kommt (Separation).
2. Bewege dich in etwa in dieselbe Richtung wie deine Nachbarn (Ausrichtung).
3. Bewege dich in Richtung des Mittelpunkts derer, die du in deinem Umfeld siehst (Kohäsion).

Diese wurde auch computergraphisch wie in Abbildung 3.2 dargestellt umgesetzt.

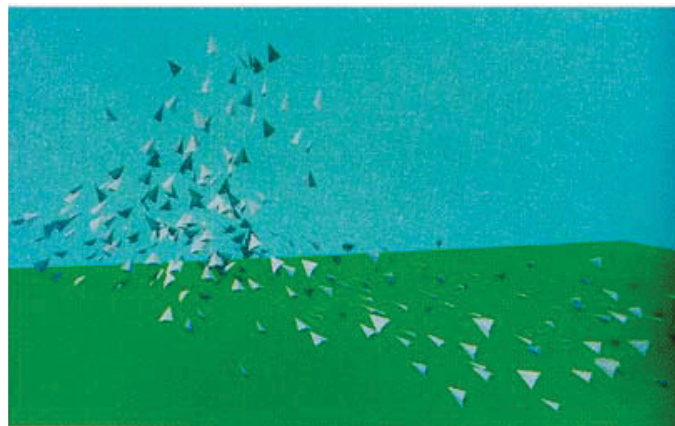


Abbildung 3.2 Schwarm von Boids nach Reynolds (Quelle: [REY87] S.32)

Die verwendete GIS (Geographisches Informationssystem) aus Kapitel 4 entspricht einem ZA und ist die Umgebung bzw. Raum  $R$ , wobei laterale und longitudinale Koordinaten eine Zelle beschreiben.

In den folgenden Abschnitten werden weitere Grundlagen der agentenbasierten Modellierung beschrieben. Grundlagen der Softwareagenten können im Anhang (A.1) entnommen werden. Hierzu wird zunächst in die verwendete Sprache eingeführt, die zur Beschreibung des Agentenverhaltens genutzt worden ist. Danach wird eine Analyse der in Betracht gezogenen Simulationsumgebungen zur Modellierung des Formationsfluges diskutiert.

### 3.1.1. UML Aktivitätsdiagramme zur Beschreibung des Agentenworkflows

Das in diesem Kapitel beschriebene Konzept bezüglich des Formationsfluges benötigt zur genaueren Spezifizierung des Agentenverhaltens ein entsprechendes Mittel. Hierzu werden in dieser Arbeit „Unified Modeling Language“ (UML) Aktivitätsdiagramme ([OMG10], [PIL05]) genutzt.

In UML-Aktivitätsdiagrammen werden generell mehrere Aktionen der Reihe nach abgearbeitet; dabei können Wechselwirkungen mit anderen zeitgleich aufkommenden

Aktionen formal mit den Notationselementen Signalsender und Signalempfänger (siehe Abbildung 3.3) abgebildet werden.

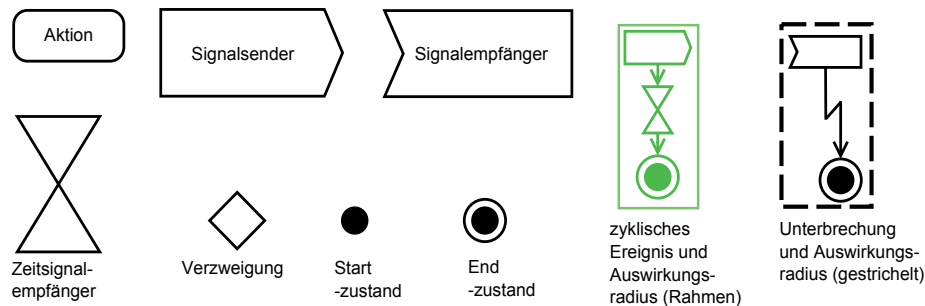


Abbildung 3.3 Verwendete Symbole für UML-Aktivitätsdiagramme

Wird ein Signal über den Signalsender an einen Signalempfänger gesendet, gilt die Aktion als beendet und der Kontrollfluss der Aktivität läuft weiter. Erreicht der Kontrollfluss einen Signalempfänger, wird die Abarbeitung erst fortgesetzt, nachdem ein Signal empfangen wurde. Mit diesem Mechanismus lassen sich Abhängigkeiten verschiedener Prozesse untereinander abbilden. Zeitkonsumierende Aktionen können mittels des Zeitsignalempfängers dargestellt werden. Eine laufende Aktion kann auch unterbrochen werden, beispielsweise kann während des Formationsfluges ein Flugzeug bzw. ein Agent ausfallen, indem z.B. die Kommunikation mit den anderen Agenten abbricht. Dies muss dann mit dem entsprechenden Auswirkungsradius modelliert werden (Abbildung 3.3; Unterbrechung und Auswirkungsradius). In dieser Arbeit werden die verbreiteten Symbole aus Abbildung 3.3 (siehe auch [RUP05]) um das Symbol für zyklische Ereignisse erweitert, da dies für die agentenbasierte Modellierung benötigt wird. Mit Hilfe dieses Symbols wird ein zyklisch sich wiederholendes Ereignis beschrieben und wechselwirkende Ereignisse können in einem UML-Aktivitätsdiagramm erfasst werden. In Abbildung 3.4 ist ein solcher Vorgang beschrieben. Dabei führt die markierte Aktion „Passagier betritt einen Flughafen“ die zyklischen Prozesse A und B aus. Der grüne bzw. blaue Rahmen beschreibt den Auswirkungsradius der entsprechenden Ereignisse. Die beiden Signalempfänger zeigen, in welchen Zuständen sich der Agent gerade befindet. Erreicht ein Passagier den Check-in Bereich, werden beide zyklischen Ereignisse gestoppt. Durch ein Unterbrechungssignal von B an den Signalempfänger wird dieses zyklische Ereignis gestoppt und A aufgefordert ebenfalls ein Unterbrechungssignal zu versenden.

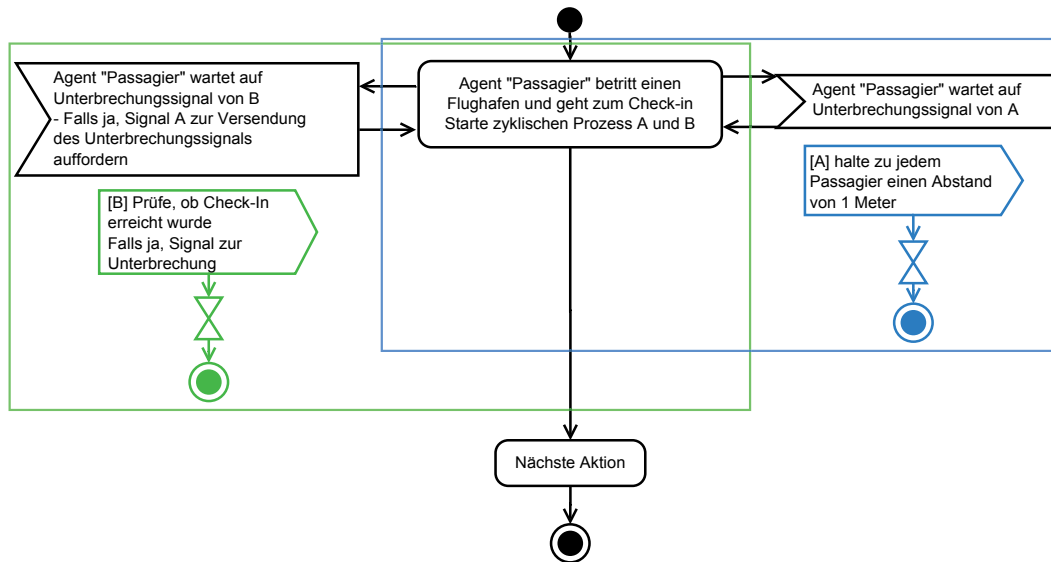


Abbildung 3.4 Beispiel für einen zyklischen Prozess

Im nächsten Abschnitt werden Softwareframeworks zur Modellierung agentenbasierter Simulation vorgestellt.

### 3.1.2. Software Frameworks für agentenbasierte Modellierung

Es gibt verschiedene Software Frameworks für ABM. In dieser Arbeit wird das auf Java basierenden Simulationsframework AnyLogic [XJT13] genutzt, dessen Anwendungen in Kapitel 4 beschrieben wird. In diesem Abschnitt wird die Nutzung dieses Werkzeugs begründet.

Castle und Crooks [CAS06] verglichen in ihren Arbeiten unter dem Gesichtspunkt der geographischen Fähigkeiten die Simulationsframeworks Swarm, Mason, Repast, StarLogo, NetLogo, Obeus, AgentSheets, und AnyLogic. Nikolai und Madey [NIK09] untersuchen in ihrer Arbeit 53 und in ihrem Wikipedia-Projekt 77 [NIK13] die am meisten verbreiteten Simulationsframeworks. In der Arbeit wurde zusammenfassend festgestellt, dass 42% der Frameworks auf Java, 17% auf C++, 11% auf C, 8% auf die Logo Varianten und 28% auf plattformspezifischen Programmiersprachen basieren (die Summe ergibt 106%, da einige Tools mehrere Programmiersprachen erlauben).

Heppenstall et al. [HEP12] schätzen die Schwierigkeit der Entwicklung einer agentenbasierten Simulation gegenüber der Mächtigkeit der Simulationsframeworks für NetLogo, AnyLogic und Repast Symphony [REPS13] wie folgend dargestellt ein.

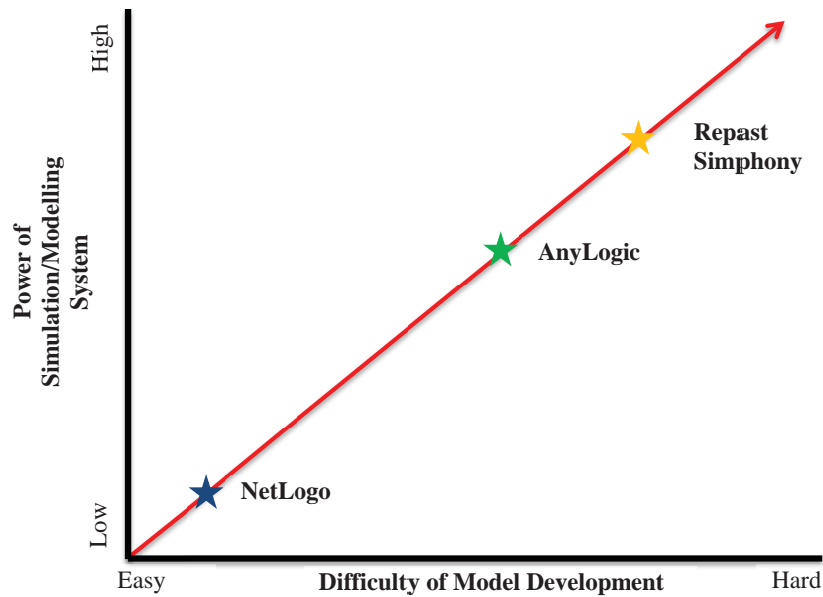


Abbildung 3.5 Schwierigkeit der Modellierung gegenüber der Mächtigkeit eines Simulationsframeworks nach Heppenstall et al. (Quelle [HEP12] S.232)

Anhand dieser Arbeiten kann eine schnelle Übersicht über die vorhandenen Simulationsframeworks geschaffen werden. Für die Entwicklung des Simulationsmodells wurden die Simulationsumgebungen NetLogo, Repast („Recursive Porous Agent Simulation Toolkit“) Simphony und AnyLogic genauer untersucht (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1 Gegenüberstellung von Repast Simphony und AnyLogic

	Repast Simphony (GPL)	AnyLogic (Proprietäre)	NetLogo (GPL)
Erscheinungsdatum	2006	2003	1999
Website	<a href="http://repast.sourceforge.net">http://repast.sourceforge.net</a>	<a href="http://www.xjtek.com">http://www.xjtek.com</a>	<a href="http://ccl.northwestern.edu/netlogo">http://ccl.northwestern.edu/netlogo</a>
Mailingliste	<a href="https://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/repast-interest">https://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/repast-interest</a>	Nein	Nein
Programmiersprache	Java	Java, UML-RT (UML for real time)	NetLogo (Dialekt von Logo)
Betriebssystem	Windows, UNIX, Linux, Mac OSX	Windows, UNIX, Linux, Mac OSX	Windows, UNIX, Linux, Mac OSX
GIS Funktion	Ja	Ja	Ja
Chart-/Graphen-/Statistiken Funktion	Ja	Ja	Ja
Tutorials	Ja	Ja	Ja
Schwierigkeitsgrad der Benutzung	hoch	moderat	gering
Benutzergruppe	sehr groß und aktiv	groß	groß
Simulationsperformance	mittel	gut	mittel bis gut



---

Es wurden im Rahmen der Analyse Simulationsmodelle entwickelt, um auch die Performance der Simulationsmodelle zu untersuchen ([GRU12], [GRU12a]).

NetLogo ([WIL99], [TIS04]) ist frei verfügbar und nutzt die GNU GPL (General Public License) [GNU13] Lizenz. Es eignet sich für einfache Simulationsmodelle, da für ein Simulationsmodell nur eine Quelldatei genutzt werden kann und hierdurch bei komplexen Modellen die Übersicht verloren geht. Die Auswahl an Befehlssätzen ist schnell ausgeschöpft und eigene können nicht definiert werden. Die externe Anbindung an Sprachen wie Java ist trotz der Entwicklung dieser Software auf Java-Basis nicht möglich. Der wesentliche Vorteil dieses Frameworks ist, dass in relativ kurzer Zeit ein anschauliches Modell implementiert werden kann.

Repast Symphony [REP13] ist ebenfalls frei verfügbar und zeichnet sich durch die Implementierung der Simulation in der gängigen Eclipse Umgebung und die Mächtigkeit aus. Es ist jedoch eine komplexere Simulationsumgebung, die mehr Einarbeitungszeit erfordert.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Frameworks ist der Einstieg in AnyLogic zugänglicher und in kürzerer Zeit können komplexe agentenbasierte Simulationsmodelle mittels Zustandsdiagramme entwickelt werden. Eigene Java-Klassen und Java-Applets lassen sich ebenfalls einbinden. Die Abwägung der dargestellten Eigenschaften der Simulationsumgebungen ergab, die Simulation in Kapitel 4 in AnyLogic zu implementieren.

In den folgenden Abschnitt wird der konzeptuelle Entwurf zur Modellierung des Formationsfluges vorgestellt.

### 3.2. Formationsflug

In diesem Abschnitt wird ein Konzept zur Modellierung einer agentenbasierten Simulation vorgestellt, in der Agenten Passagierflugzeugen entsprechen. Diese Flugzeuge sollen von verschiedenen Flughäfen in Europa mit dem Ziel Nordamerika starten und sich mit bereits bekannten Flugzeugen an einem Punkt über der Irischen See treffen. Diese Flugzeuge sollten bereits von der Flugsicherung zeitlich synchronisiert sein. Dort bilden sie eine festgelegte Formation und fliegen gemeinsam die Nordatlantikroute (NATS). Bevor der vielbeflogene Raum über dem Nordamerikanischen Kontinent erreicht ist (z.B. über Neufundland), wird der Formationsflug beendet. Die restliche Teilstrecke wird dann unabhängig voneinander geflogen.

In Abschnitt 2.2 wurde der Formationsflug als eine Möglichkeit zur Reduzierung von Treibstoffverbrauch und Emissionen eingeführt. Es wurden der aktuelle Stand der Forschung und Grundlagen des Formationsflugs beschrieben. Zur Umsetzung des Formationsflugs aus der Sicht der Flugsicherung wurde ein neuer Ansatz entwickelt, um zu gewährleisten, dass die

am Formationsflug beteiligten Flugzeuge im Falle von Verspätungen anderer Beteiligter nur eine bestimmte Zeit warten. Als eine Neuheit wurden in diesem Kapitel neben den verschiedenen Formationstypen Algorithmen zur Bildung, Rotation und im Falle von Ausfällen die Rekonfiguration dieser Formationen entwickelt (Abschnitt 2.2.4).

Das Konzept, das in diesem Abschnitt vorgestellt wird, soll unabhängig vom Simulationsframework adaptierbar sein. In Abbildung 3.6 wird im UML Verteilungsdiagramm die grobe Systemarchitektur gezeigt. Die Input-Daten, die im XML-basierten „Common Parametric Aircraft Configuration Schema“ (CPACS) Format übergeben werden, werden von der Simulation gelesen und zur Initialisierung der Simulation genutzt. Im folgenden Abschnitt wird diese CPACS Schnittstelle zur Übergabe der Daten wie Flugplan, Trajektorien (die zu fliegenden Wegpunkte) und der flugzeugspezifischen Aerodynamik beschrieben.

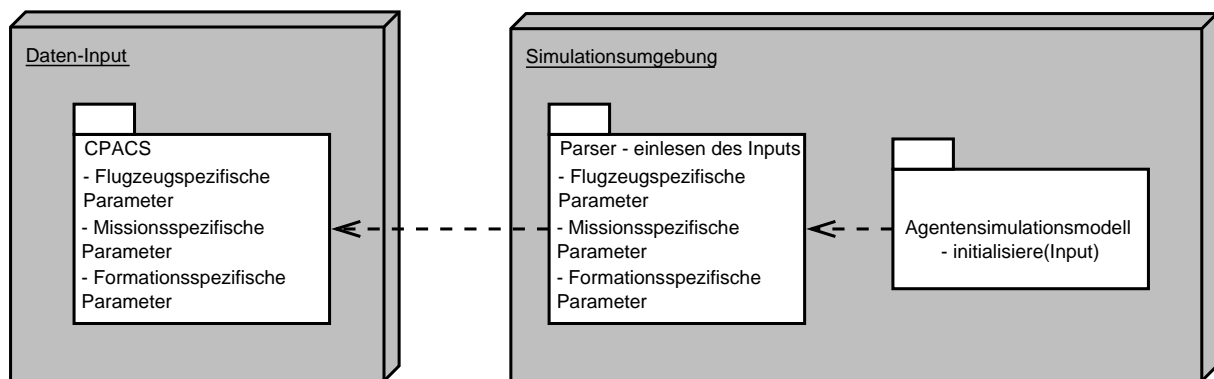


Abbildung 3.6 UML Verteilungsdiagramm des Gesamtsystems

Dabei werden auch die Annahmen zur Reduzierung des Luftwiderstands im Formationsflug vorgestellt. Anschließend wird ein Flugleistungsmodell zur Verdeutlichung des Simulationsergebnisses präsentiert. Das Verhalten der Agenten wird daraufhin als Schwerpunkt dieses Abschnitts beschrieben. Hierzu muss der Gesamtworkflow der Agenten und deren dynamische Ereignisse aufgezeigt werden. Zum Schluss werden die Ansätze zur Positionierung der Agenten innerhalb der Formation diskutiert.

### 3.2.1. CPACS Datenstruktur zur Übergabe von Input-Parametern

Zur Übergabe der Input-Parameter eignet sich eine XML-Struktur [W3C13], da diese einfach zu erstellen und flexibel in der Handhabung ist. Dokumente im XML-Format können aus verschiedenen Programmiersprachen wie Java oder C++ heraus performant eingelesen und erstellt werden. So bietet Java verschiedene Möglichkeiten XML-Dateien auszulesen (parsen) z.B. mit Hilfe der „Document Object Model“ (DOM) Bibliothek [W3C13a], indem das XML-Dokument wie eine Baumstruktur behandelt wird oder der „Simple API for XML“ (SAX)

Bibliothek [SAX13], die als De-facto Standard gilt und ein XML-Dokument als sequentiellen Datenstrom ausliest.

CPACS ([DLR12], [RIZ12]) ist ein vom Deutschen Zentrum für Luft-und Raumfahrt (DLR) entwickeltes auf XML basierendes Datenformat zur Beschreibung von Flugzeugkonfigurationen aber auch des Transportsystems, wie z.B. Flotten und Flughäfen. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Kategorien genutzt bzw. müssen der Struktur hinzugefügt werden:

- *Flugzeugspezifische Daten:* Die bereits vorhandene Kategorie (bzw. „Tag“) „*aircraft*“, die alle Informationen bezüglich eines Flugzeugtyps beinhaltet, muss um die Wirbelschleppeninformation erweitert werden. So könnten Koordinaten einer Wirbelschlepe in Abhängigkeit zur Erhöhung des Auftriebs oder Reduzierung des Luftwiderstands hier aufgenommen werden; was unten genauer erläutert wird. Weitere wichtige Informationen sind neben dem Flugzeugtyp, die Mindest- und Höchstgeschwindigkeit im Horizontalflug sowie einige Parameter zur Berechnung der Flugleistung wie triebwerkspezifische Daten, Spannweite und Fläche der Tragflächen, was im Abschnitt 3.2.2 genauer beschrieben wird.
- *Formationsspezifische Daten:* Hierzu wurde die neue Kategorie „*procedure*“ eingeführt, die die Prozedur wie den Formationsflug beschreibt. Der Formationsflug wird in der Unterkategorie „*formations*“ und den entsprechenden Unterkategorien „*formation*“, die eindeutig identifizierbar sind, beschrieben. Hierbei wird jeder Formation die Flughöhe des Formationsführers, die Geschwindigkeit, die Ankunftszeit am Treffpunkt mit dem definierten Zeitfenster zur Einhaltung der Formation, der Name der Teilnehmer, die Formationsart, der optionale Status der Rotation und der festgesetzte Sicherheitsabstand fest vorgeschrieben.
- *Missionsspezifische Daten:* In dieser bereits vorhandenen Kategorie „*missions*“ mit der Unterkategorie „*mission*“ werden alle Daten zusammengefasst, die ein Flugzeug bzw. Agent wissen muss, um vom Startflughafen zum Zielflughafen zu kommen. Dies sind die Trajektorien der Wegpunkte, die als Koordinaten in Längen- und Breitengrad angegeben werden sollten, die Position innerhalb der Formation, die Startzeit („*actual take-off time*“; *atot*), die Kraftstoffmenge zur Startzeit und das Gewicht zur Startzeit („*all up weight*“; *AUW*). Um annähernd realistische Kraftstoffmengen für die Missionen zu nutzen, wurde mit Hilfe eines Werkzeugs zur Kraftstoffplanung, das für Flugsimulationen erdacht ist, diese bestimmt [FUE13]. Dafür nutzt dieses Werkzeug historische Daten von Flugsimulatoren, die Basisdaten über den Kraftstoffverbrauch

für das Taxi-out (Weg von der Parkposition bis zur Startbahn), den Start, den Horizontalflug, den Sinkflug und das Taxi-In (Weg von der Startbahn bis zur Parkposition) beinhalten. Es wird auch Reservetreibstoff für einen Alternativflughafen bzw. den Schleifenflug berücksichtigt.

In Abbildung 2.13 wurde bereits gezeigt, dass abhängig vom Gewicht, Spannweite und Geschwindigkeit Wirbelschleppen sich unterschiedlich schnell bewegen. Da die Abhängigkeit der Tangentialgeschwindigkeit eines Wirbels zur Luftwiderstandskraft nicht trivial ist, werden in dieser Arbeit die Annahmen aus Tabelle 3.2 angenommen. Hierzu prädestiniert sich die CPACS Struktur und deren BlackBox Eigenschaften, so dass die angenommenen Daten an das Modell übergeben und ersetzt werden können. In Abbildung 3.7 sind die Koordinaten einer Wirbelschleppe dargestellt.

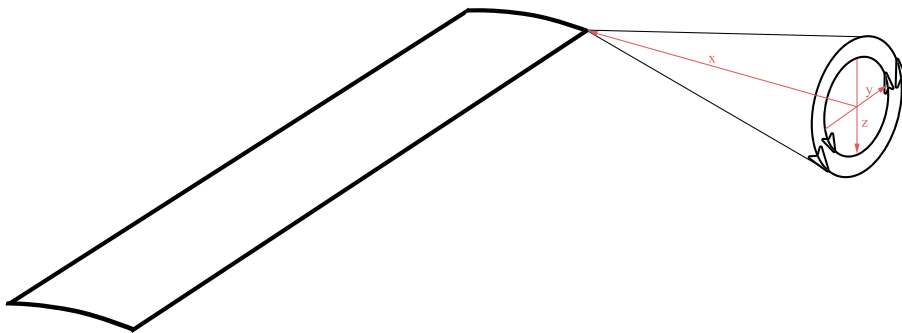


Abbildung 3.7 Koordinaten einer linearen Wirbelschleppe

Jeder entsprechenden Koordinate kann wie in Tabelle 3.2 ein Wert in Prozent zur Reduzierung der Luftwiderstandskraft zugeordnet werden. Die getroffenen Annahmen, die nur während des Horizontalfluges gelten, da während dieser Phase die Luftwiderstandskraft kleiner gleich dem Schub ist, orientieren sich an den Arbeiten von Beukenberg und Hummel [BEU86] und Pahle et al. [PAH12] (siehe auch Abschnitt 2.2). Beukenberg und Hummel konnten ihren theoretischen Ansatz zum Formationsflug mit Hilfe eines Feldversuchs evaluieren. Dabei wurde für das hintere Flugzeug eine mittlere Schubreduktion von 10% bei einem Längsabstand von ca. fünf Flugzeugspannweiten zweier Do-28 (Spannweite = 15,5 m) während des Formationsfluges gemessen. Pahle et al. konnten eine Schubreduktion von über ca. 10% für das hintere Flugzeug (zwei C-17) in einem Abstand von 1000 bis 3000 Fuß (304m bis 914m) messen. Dieser Flugzeugtyp entspricht von der Größe ungefähr der A330 und deshalb können zumindest hierfür die Daten von Pahle et al. übernommen werden.

Tabelle 3.2 Annahmen zur Reduzierung der Luftwiderstandskraft

Flugzeugtyp	A330-301		A340-642		A380-841	
Reduzierung der Luftwiderstandskraft in Prozent in einem entsprechenden Abstand x,y,z in Meter (nach Abbildung 3.7)	1000; 4; 6	10%	1000;4; 6	15,1%	1000; 4; 6	18,4%
	1500; 4; 12	8%	1500; 4; 12	12,1%	1500; 4; 12	14,7%
	1700; 4; 18	6%	1700; 4; 18	9,1%	1700; 4; 18	11%
	2000; 4; 24	5%	2000; 4; 24	7,6%	2000; 4; 24	9,2%

Im folgenden Abschnitt wird ein Flugleistungsmodell für den Formationsflug beschrieben.

### 3.2.2. Flugleistungsmodell für den Formationsflug

In Abschnitt 2.2.2.3 wurden bereits die Grundlagen der Flugleistung beschrieben. In diesem Abschnitt wird darauf aufbauend ein konkreter Entwurf für ein agentenbasiertes Simulationsmodell vorgestellt.

Im BADA (Base of Aircraft Data) Projekt von EUROCONTROL [EUR09] wurde ein Flugleistungsmodell durch die Kooperation mit den Flugzeugherstellern entwickelt. BADA umfasst flugzeugspezifische Daten, die für Trajektorienimulationen gedacht sind. Die Entwicklung des Projekts befindet sich bereits in der vierten Generation (BADA Family 4). Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch die BADA Version 3.10 [EUR12a] verwendet, da diese uneingeschränkt kostenneutral zur Verfügung steht. Die BADA-Daten sind nach einer entsprechenden Anmeldung für Forschungseinrichtungen frei verfügbar. Die verwendete Version umfasst 127 verschiedene Flugzeugtypen namenhafter Hersteller.

Im nächsten Abschnitt wird der adaptierte Entwurf und danach eine erste Implementierung als „Proof-of-Concept“ vorgestellt.

#### 3.2.2.1. Adaptierter Entwurf aus dem BADA-Projekt

Die Verwendung eines Flugleistungsmodells dient in dieser Arbeit zur Evaluierung der verschiedenen Algorithmen, die während des Formationsfluges ausgeführt werden. In Abschnitt 2.2.2.3 wurden bereits die Flugphasen während eines Linienfluges beschrieben. Da die Verwendung des Flugleistungsmodells dem Zwecke der Beurteilung der Formationen dienen soll, werden zur Vereinfachung folgende Annahmen getroffen und somit nur ein Teil des BADA-Modells verwendet:

1. Alle Flugzeuge befinden sich im Horizontalflug auf einer festen Flughöhe.
2. Die Außentemperatur ( $T_{ISA_{trop}}$ ) oberhalb der Tropopause ist bei allen Flugzeugen gleich.
3. Alle Flugmanöver werden mit einem Querneigungswinkel ( $\phi$ ) von  $0^\circ$  geflogen.

4. Die Temperaturabweichung ( $\Delta T$ ), die die Differenz der aktuellen Bodentemperatur zur genormten International Standard Atmosphere (ISA)-Bodentemperatur darstellt, ist null.

Aufgrund der getroffenen Annahmen wurden nur Teile des BADA-Projekts für diesen Ansatz adaptiert. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, muss ein Flugzeug für den gleichmäßigen Horizontalflug den Schub aufbringen, um die Luftwiderstandskraft ( $W [N]$ ) zu überwinden (siehe auch Abbildung 2.10). In Formel 3.1 ist erkennbar, dass die Luftwiderstandskraft neben der Abhängigkeit zur Geschwindigkeit ( $V_{TAS} [m/s]$ ; „true air speed“) und zur Fläche der Tragflächen ( $S [m^2]$ ) auch von der Luftdichte ( $\rho [kg/m^3]$ ) aus Formel 3.2 und dem Luftwiderstandskoeffizienten ( $c_D$ ) aus Formel 3.7 abhängt, der wiederum vom Auftriebskoeffizienten ( $c_L$ ) abhängig ist (Formel 3.8).

$$W = \frac{c_D \rho V_{TAS}^2 S}{2} \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{p}{R T_{trop}} \quad (3.2)$$

Zur Berechnung der Luftdichte  $\rho$  werden die spezifischen Gaskonstante der Luft ( $R [m^2/(K s^2)]$ ) und der aktuelle Luftdruck ( $P [Pa]$ ) aus Formel 3.3 und die Temperatur der Tropopause ( $T_{trop} [K]$ ) aus Formel 3.4 verwendet.

$$p_{>} = p_{trop} e^{\left[-\frac{g}{R T_{ISA,trop}}(H_{p,>} - H_{p,trop})\right]} \quad (3.3)$$

$$T_{trop} = T_0 + \Delta T + \beta_{T,<} H_{p,trop} \quad (3.4)$$

Der aktuelle Luftdruck  $p_{>}$  ist abhängig vom Luftdruck in der Tropopause ( $p_{trop} [Pa]$ ) aus Formel 3.6, der Gewichtskraft ( $g [m/s^2]$ ), der genormten Temperatur der Tropopause ( $T_{ISA,trop}$ ) aus Formel 3.5, der Flughöhe ( $H_{p,>} [m]$ ) und der durchschnittlichen Höhe der Tropopause ( $H_{p,trop} [m]$ ).

$$T_{ISA,trop} = T_0 + \beta_{T,<} H_{p,trop} \quad (3.5)$$

$$p_{trop} = p_0 \left( \frac{T_{ISA,trop} - \Delta T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{\beta_{T,<} R}} \quad (3.6)$$

$$c_D = c_{D0,CR} + c_{D2,CR} c_L^2 \quad (3.7)$$

$$c_L = \frac{2 m g}{\rho V_{TAS}^2 S \cos \phi} \quad (3.8)$$

Für den horizontalen Flug (engl. „cruise“) wurde bereits in Formel 2.2 beschrieben, dass der aufzubringende Schub ( $F$  [N]) der Luftwiderstandskraft entspricht ( $F = W$ ), daher kann der Kraftstoffdurchfluss pro Minute ( $f_{cr}$  [kg/min]) in Formel 3.10 mit Hilfe des „thrust specific fuel consumption“ (TSFC) ( $\eta$  [kg/min kN]) aus Formel 3.9, des errechneten Schubs ( $F = D$ ) und des Korrekturkoeffizienten ( $c_{fcr}$ ) bestimmt werden. TSFC trifft dabei eine Aussage über Kraftstoffeffizienz eines Triebwerks.

$$\eta = c_{f1} \left( 1 + \frac{V_{TAS}}{c_{f2}} \right) \quad (3.9)$$

$$f_{cr} = \eta Thr c_{fcr} \quad (3.10)$$

In Tabelle 3.3 sind alle Parameter und Variablen nochmals aufgelistet.

Tabelle 3.3 Parameter und Variablen des Flugleistungsmodells

Abkürzung	Beschreibung	Wert und/oder Einheit
$\beta_{T,<}$	International Standard Atmosphere (ISA) Temperaturgradient unterhalb der Tropopause	- 0.0065 K/m
$H_{p,trop}$	Durchschnittliche Höhe der Tropopause	11,000 m
$p_0$	Genormter atmosphärischer Luftdruck auf Meereshöhe	101325 Pa
$H_{p,>}$	Flughöhe	[m]
$T_0$	Genormte Temperatur auf Meereshöhe	288.15 K
$g$	Erdbeschleunigung	9.80665 m/s <sup>2</sup>
$R$	Spezifische Gaskonstante in der Luft	287.05287 m <sup>2</sup> /(K s <sup>2</sup> )
$T_{trop}$	Temperatur in der Tropopause	223.15 K
$m$	Flugzeugmasse (AUW)	[kg]
$S$	Fläche der Tragfläche	[m <sup>2</sup> ]
$\phi$	Querneigungswinkel	[Degree]
$C_{D0,CR}, C_{D2,CR}$	Luftwiderstandskoeffizienten (flugzeugtypspezifisch)	
$C_{f1}, C_{f2}$	Erster und zweiter spezifischer Kraftstoffverbrauchs-koeffizient (flugzeugtypspezifisch)	
$C_{fcr}$	Korrekturkoeffizient des Kraftstoffdurchflusses (flugzeugtypspezifisch)	
$V_{TAS}$	Geschwindigkeit	[m/s]
$\Delta T$	Temperaturunterschied am Boden zur genormten atmosphärischen Temperatur MSL (Mean Sea Level)	[K]

Dieser Entwurf wird im nächsten Abschnitt als „Proof-of-Concept“ in einer Java Umgebung implementiert.

### 3.2.2.2. Validierung und Verifikation des adaptierten Entwurfs

Zur Validierung und Verifikation des adaptierten Flugleistungsmodells aus Abschnitt 3.2.2.1 wurde dieser Entwurf in der integrierten Entwicklungsumgebung („Integrated Development Environment“; IDE) NetBeans [ORA13b] in Java [ORA12] implementiert [SCH13]. NetBeans stellt eine integrierte Oberfläche, „Rapid User Interface Development“ (RUID), zur Erstellung von graphischen Benutzeroberflächen („Graphical User Interface“; GUI) mit Hilfe des „drag-and-drop“ Verfahrens zur Verfügung.

Aus der BADA Datenbank wurden alle benötigten Koeffizienten (siehe Abschnitt 3.2.2.1) der Airbusflugzeuge, die den Nordatlantik (A340-642, A330-301 und A380-841) überfliegen, aggregiert. Darüber hinaus wurden die flugzeugspezifischen Daten um Informationen über die Spannweite oder die Fläche der Tragflächen erweitert. Weitere Inputparameter, die



flugspezifisch sind, werden über eine implementierte Java Swing Oberfläche [ORA13a] an das Modell zur Berechnung der Flugleistung (FLM in Algorithmus 3.1) weitergegeben: AUV [kg], Kraftstoffmenge [l], Flugdauer [min], durchschnittliche Geschwindigkeit [m/s], Flughöhe [m] und Reduzierung der Luftwiderstandskraft durch den Formationsflug.

Vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen aus Tabelle 3.2, dass zum Halten bestimmter Geschwindigkeiten im Formationsflug weniger Schub benötigt wird als im Normalflug, kann in der entwickelten GUI ein prozentualer Wert eingegeben werden, der diese Schubreduzierung erfasst. In Abbildung A.2.1 (Anhang) ist ein Klassendiagramm des implementierten Modells dargestellt. Die Java Klasse „FlightPerformance“ umfasst die in Relation gesetzten Formeln aus Abschnitt 3.2.2.1 und diese werden minutenweise nach der übergebenen Zeit  $t_{ges}$  ausgeführt. In Algorithmus 3.1 wird das Flugleistungsmodell mathematisch dargestellt. Zusätzlich zu den Parametern aus Tabelle 3.3 werden in Tabelle 3.4 weitere erläutert.

#### Algorithmus 3.1 Flugleistungsmodell (FLM)

```

1: Algorithmus FLM( $m, h, \bar{v}, S, cD2_{cr}, cF1, cF2, cF_{cr}, t_{ges}, w_{red}, k$ )
2:    $m = m_{FiF}$ 
3:   while  $t_{ges} \neq 0$ 
4:      $m_{FiF} = m_{FiF} - cFn(m_{FiF}, h, \bar{v}, S, cD2_{cr}, cF1, cF2, cF_{cr}, w_{red})$ 
5:      $k = k - \left( \frac{cFn(m_{FiF}, h, \bar{v}, S, cD2_{cr}, cF1, cF2, cF_{cr}, w_{red})}{0,8} \right)$ 
6:      $t_{ges} = t_{ges} - 1$ 
7:   endwhile
8:   return k

```

$$cFn(m_{FiF}, h, \bar{v}, S, cD2_{cr}, cF1, cF2, cF_{cr}, w_{red}) = c_{f1} \left( 1 + \frac{\bar{v}}{c_{f2}} \right) (1 - w_{red}) c_{fcr}$$

$$\left( c_{D0,CR} + c_{D2,CR} \left( \frac{2 m_{FiF} g}{\frac{p_{trop} e^{\left[ -\frac{g}{RT_{ISA,trop}} (H_{p,>} - H_{p,trop}) \right]}}{R T_{trop}} \bar{v}^2 S \cos \phi} \right)^2 \right) \frac{p_{trop} e^{\left[ -\frac{g}{RT_{ISA,trop}} (H_{p,>} - H_{p,trop}) \right]}}{R T_{trop}} \quad (3.11)$$

Tabelle 3.4 Erläuterungen zu FLM

Abkürzung	Beschreibung
$t_{ges}$	Formationsdauer in Minuten
$\bar{v}$	Durchschnittliche Geschwindigkeit
S	Fläche der Tragflächen
k	Kraftstoffmenge in Liter
cFn	Funktion zur Bestimmung des Kraftstoffdurchflusses pro Minute
w <sub>red</sub>	Prozentuale Abnahme der Luftwiderstandskraft

Die neue Masse wird bei jedem Schleifenaufruf erneut übergeben, da die Funktion  $cFn$  (Gleichung 3.11) wie in Abschnitt 3.2.2.1 gezeigt den Kraftstoffdurchfluss pro Minute beschreibt ( $[kg/min]$ ). Mit sinkender Masse  $m_{FIF}$  wird weniger Schub benötigt (Formel 3.4), daher muss dieser Wert wie in Zeile 5 von Algorithmus 3.1 nach einem Durchlauf der Schleife neu übergeben werden. Da die relative Dichte von Kerosin 0,8 beträgt (Zeile 6 von Algorithmus 3.1), verhält sich die Abnahme der Masse über die Zeit analog zu Abbildung 3.8. In Abbildung 3.8 ist der Kraftstoffverbrauch einer A340-600 und A380-841 auf der Formationsstrecke dargestellt. Für beide Flüge wurde die Annahme getroffen, dass die Formationsstrecke innerhalb von 4 Stunden (240 Minuten) beflogen werden kann, d.h. die Länge dieser Strecke ist bei beiden unterschiedlich. Die Geschwindigkeit auf dieser Strecke beträgt konstant 883 bzw. 947 km/h, dabei haben diese Flüge beim Start eine Gesamtmasse (AUW) von 348 bzw. 524 Tonnen und 195000 bzw. 30000 Liter Kerosin im Tank. Es wurde für den Formationsflug eine konstante Kraftstoffreduzierung von 12% angenommen.

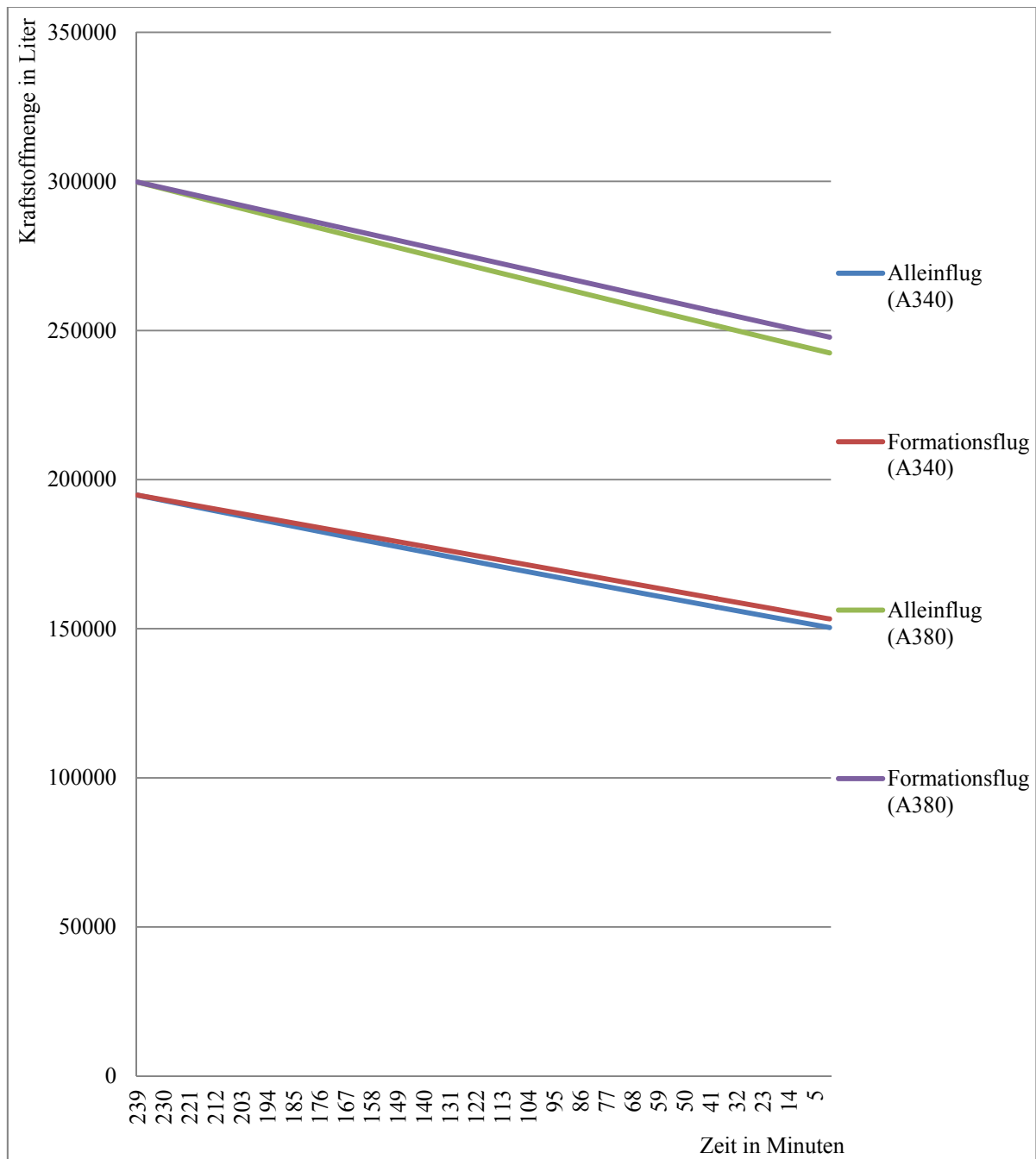


Abbildung 3.8 Kraftstoffverbrauch eines Airbus A340-600 und A380-841 auf der Formationsstrecke

Auf den Formationsteilstrecken konnte eine Kraftstoffersparnis mit Hilfe der Reduzierung der Luftwiderstandskraft von ca. 2902 Liter für die A340-600 und ca. 5303 Liter für die A380-841 festgestellt werden. Da in dieser Umsetzung nur die Flugzeit berücksichtigt wird und nicht die zurückgelegte Strecke, kann kein direkter Vergleich zwischen den Flugzeugtypen anhand dieses Modells ermittelt werden. Anhand des Auseinanderdriftens der Verbrauchslinien in Abbildung 3.8 ist erkennbar, dass die Auswirkungen des Formationsflugs bei größeren Flugzeugen wie beim A380 höher ausfallen als bei kleineren wie beim A340.

Es kann verifiziert werden, dass aufgrund dieser Implementierung das adaptierte Modell aus Abschnitt 3.2.2.1 vor dem Hintergrund der Annahmen (siehe Tabelle 3.2) nachvollziehbare Werte ausgibt, da eine Abnahme der Kraftstoffmenge klar erkennbar ist. Vor diesem Hintergrund kann dieses Modell für eine agentenbasierte Simulation genutzt werden, bei der jeder Agent autonom seine eigene Flugleistung für die gesamte Flugstrecke vom Start bis zur Landung berechnen kann.

Im nächsten Abschnitt wird das Agentenverhalten während des gesamten Flugs beschrieben.

### 3.2.3. Agentenverhalten

Der Ansatz, der in dieser Arbeit zur Beschreibung des Agentenverhaltens verfolgt wird, umfasst, dass alle Formationsteilnehmer bekannt sind und eine feste Flugroute vorgegeben wird und in der CPACS-Struktur mitgegeben wird (siehe Kapitel 3.2.1). So wäre wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben die Flugrouten der in Formation fliegenden Flugzeuge über dem Nordatlantik wetterabhängig bestimmt worden. Jedes Flugzeug soll für den Alleinflug betankt werden, so dass alle Eventualitäten berücksichtigt werden können.

Im nächsten Abschnitt wird der konzeptuelle Entwurf des Gesamtworkflows beschrieben. Hierzu werden alle Phasen während des Flugs für den agentenbasierten Entwurf betrachtet. Danach werden separat die Positionierung der Agenten in der Formation, falls ein Flugzeugmix vorhanden ist, und die Routenplanung beschrieben.

#### 3.2.3.1. Gesamtworkflow

In Kapitel 2.2 wurde bereits der Ablauf des Formationsflugs eingeführt und es werden Teilaspekte anhand der Algorithmen aus Abschnitt 2.2.4 beschrieben. In diesem Abschnitt wird der gesamte Workflow, den ein Flugzeug während des Fluges durchläuft, beschrieben, und als Grundlage zur Implementierung des agentenbasierten Modells genutzt. Als Umgebung für solch ein Vorhaben kann ein zweidimensionales kontinuierliches Gitter oder ein Geographisches Informationssystem (GIS) verwendet werden. Der wesentliche Vorteil einer GIS ist die direkte Nutzung von Längen- und Breitengraden und die Nutzung vektorgraphischer Karten. Vor dem Hintergrund der CPACS-Datenstruktur und dass unter der Kategorie „missions“ Längen- und Breitengrade der Wegpunkte der Missionen vorhanden sind (siehe Anhang A.3 und Kapitel 4), wird die Präferenz zur Nutzung eines GIS ausgesprochen. So kann der Formationsführer anhand dieser Koordinaten über das GIS navigieren und die Formationsteilnehmer nehmen ihre relativen Positionen in der Formation ein.

---

In Abbildung 3.9 wird der Gesamtworkflow eines Agenten mit Hilfe des UML-Aktivitätsdiagramms dargestellt. Zunächst wird ein Agent anhand der geparsten Input-Parameter initialisiert. Dies sind, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, Abflugzeit, flugzeugspezifische Daten, formationsspezifische Daten und missionsspezifische Daten. Wenn ein Agent, die ihm zugewiesene Startzeit erreicht, soll der Flug starten. An dieser Stelle kann das Modell um flughafenspezifische Vorgänge erweitert werden, d.h. Turnaround und Rollzeiten könnten eine geplante Abflugzeit („scheduled take-off time“; *stot*) beeinflussen, um dann vom Modell die aktuelle Abflugzeit (*atot*) generieren zu lassen. Nach dem Start bewegt sich der Agent anhand der eingelesenen Missionsdaten (Wegpunkte mit Flughöhen und entsprechenden Längen- und Breitengraden) autonom von einem Wegpunkt zum nächsten. Das zyklische Ereignis *E* startet das Flugleistungsmodell (aus Abschnitt 3.2.2), nutzt Algorithmus 3.1 und wird für jeden Agenten minutenweise ausgeführt.

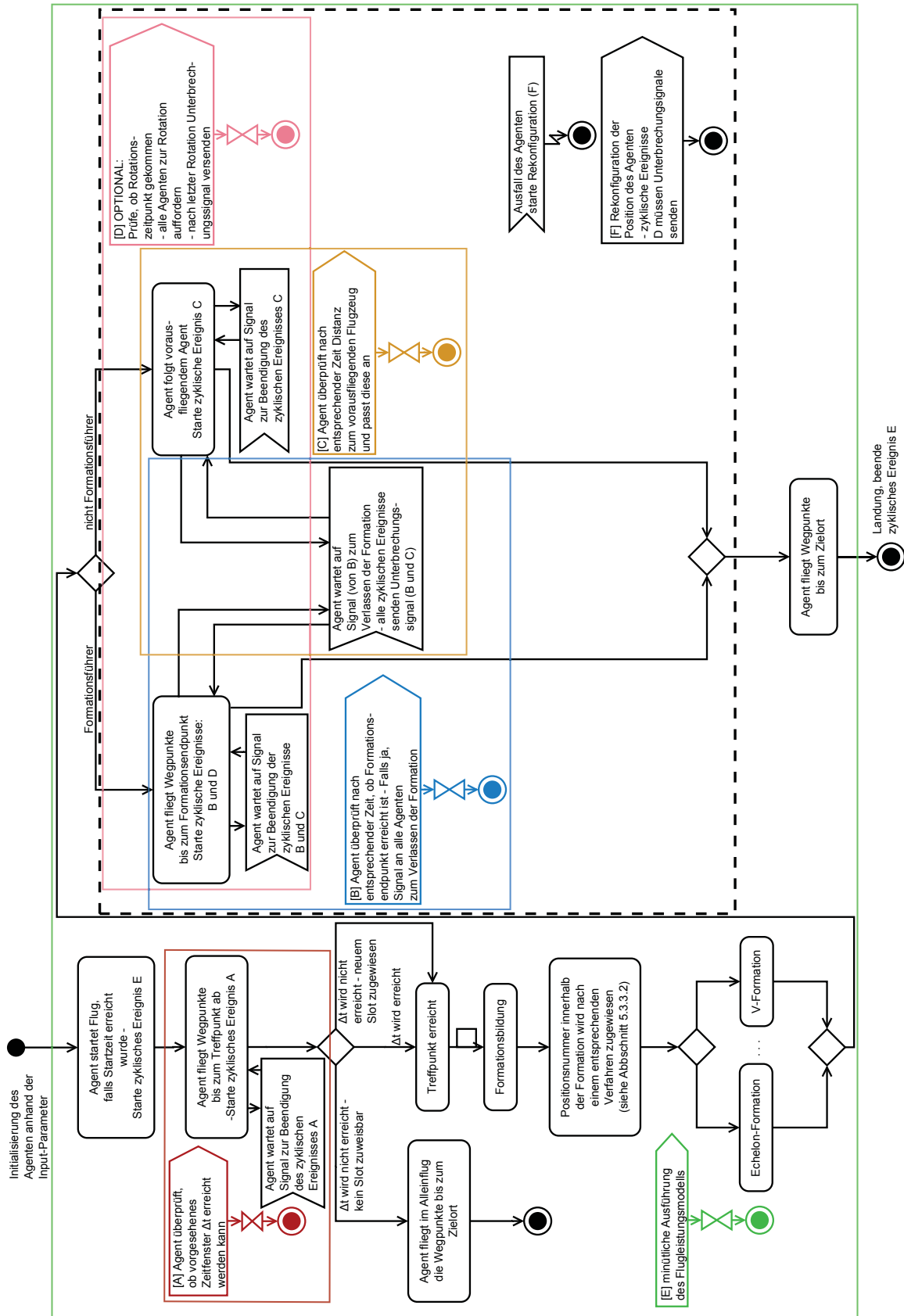


Abbildung 3.9 Gesamtworflow der Agenten von Start bis Landung (A-F zyklische Ereignisse)

Eine Voraussetzung dieses Vorhabens ist, dass die Flüge abhängig von der Position des Startflughafens bereits zeitlich synchronisiert wurden, um eine zeitnahe Ankunft am Treffpunkt zu gewährleisten. Dennoch sollen die Agenten im zyklischen Ereignis  $A$  (Abbildung 3.9) bzw. Algorithmus 3.2 prüfen, ob das Zeitfenster ( $\Delta t$ ) einzuhalten ist.

#### Algorithmus 3.2 Zeitfenster (ZEF)

```

1: Algorithmus ZEF( $t_{atot}, t_{soll}, \Delta t, s, V_{TAS}$ )
2:    $t_{ist} = 0$ 
3:   for  $t = t_{atot}$  to  $t_{soll}$ 
4:      $s = s_{ist}$ 
5:      $t_{ist} = \frac{s}{V_{TAS}} + \Delta t$ 
6:     if  $t_{ist} < t_{soll}$ 
7:        $V_{TAS} = V_{TAS} + 1$ 
8:     else
9:        $V_{TAS} = V_{TAS} - 1$ 
10:    endif
11:  endfor
12:  return  $t_{ist}$ 

```

Tabelle 3.5 Erläuterungen zu ZEF

Abkürzung	Beschreibung
$t_{atot}$	Zeitpunkt des Starts
$t_{soll}$	Zeitpunkt des Treffens
$\Delta t$	Zusätzliches Zeitfenster
$s$	Strecke bis zum Ziel
$s_{ist}$	Aktuelle Strecke bis zum Ziel
$t_{ist}$	Aktuelle Zeit bis zum Ziel

Ist dies nicht der Fall, wird dieser Agent entweder dem nächsten Formationsslot zugewiesen, dabei muss eventuell die Geschwindigkeit  $V_{TAS}$  (True Air Speed) zur Anpassung erhöht oder reduziert werden oder, falls dieser zu weit entfernt ist, muss dieser Flug als Alleinflug fortgesetzt werden. Dieser besondere Ausnahmefall sollte aber bereits vor dem Start vermieden werden, da Verzögerungen zumeist am Startflughafen entstehen. Im Regelfall sind die Agenten am Treffpunkt und dort beginnt die Formationsbildung, die formationspezifisch, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, abläuft. Die Bestimmung der Position eines Agenten innerhalb der Formation wird im nächsten Abschnitt genauer besprochen, da es hierzu verschiedene Ansätze gibt. Nachdem die Formation gebildet wurde, gibt es zwei Typen von Agenten: Formationsführer (zielbasierter Agent) und Formationsmitglied (einfacher Reflex-Agent) (siehe Anhang A.1). Der Formationsführer bewegt sich wie zuvor von einem Wegpunkt zum nächsten mit einem klaren Ziel und darüber hinaus werden die zyklischen Ereignisse Rotation ( $D$  aus Abbildung 3.9 und Algorithmus 3.3 und 3.4) und

Formationsendpunkt ( $B$  aus Abbildung 3.9 und Algorithmus 3.7) ausgeführt, die abhängig von der aktuellen Distanz zum Ziel ausgelöst werden.

In Algorithmus 3.3 wird bestimmt, wann die optionale Rotation durchgeführt werden soll. Dabei muss der Formationsführer zunächst die Formationsstrecke  $s_{ges}$  durch die Anzahl der Formationsteilnehmer  $|X_n|$  teilen und falls eine Teilstrecke zurückgelegt wurde, wird das Signal zur Rotation ( $rot_{flag} = true$ ) gegeben und Algorithmus 3.4 wird ausgelöst. Das zyklische Ereignis Rotation (Algorithmus 3.4) wird formationsweise ausgeführt. Diese verlaufen bei den Agenten zeitgleich wie in Algorithmus 3.4 beschrieben, dabei wird formationspezifisch die aktuelle Formationsposition verändert. Unmittelbar nach der Rotation ändert sich der Agententyp des Formationsführers zum Formationsmitglied. Der neue Formationsführer muss alle Daten vom alten Formationsführer einholen. Das zyklische Ereignis Rotation wird nach der letzten Rotation unterbrochen.

#### Algorithmus 3.3 Rotationszeitpunkt ( $ROT_{zeit}$ )

```

1: Algorithmus  $ROT_{zeit}(t_{start}, t_{end}, X_n, s_{ges})$ 
2:    $s_{ist} = 0$ 
3:    $s_{rot} = \frac{s_{ges}}{|X_n|}$ 
4:   for  $t=t_{start}$  to  $t_{end}$ 
5:     if  $s_{ist} = s_{rot}$ 
6:        $rot_{flag} = true$ 
7:        $s_{ist} = 0$ 
8:     endif
9:   endfor
10: return  $rot_{flag}$ 

```



## Algorithmus 3.4 Rotation (ROT)

```

1: Algorithmus ROT( $\text{rot}_{\text{flag}}, s_{\text{ges}}, X_n$ )
2:    $X_n = X'_n$ 
3:   if  $\text{rot}_{\text{flag}}$  is true
4:     for  $x_n \in X'_n$ 
5:       if  $vFn(x_n)$ 
6:         if  $\text{posFn}(x_n) = 1 \wedge \exists x_m \in X_n: m > n \wedge \text{posFn}(x_m) = 2$ 
7:            $\text{moveTo}(x_m)$ 
8:         elseif  $\text{posFn}(x_n) \bmod 2 = 0 \wedge \exists x_m \in X'_n: m > n$ 
9:            $\text{moveTo}(x_m)$ 
10:        elseif  $\text{posFn}(x_n) \bmod 2 = 1 \wedge \exists x_m \in X'_n: m < n$ 
11:           $\text{moveTo}(x_m)$ 
12:        endif
13:      elseif  $eFn(x_n)$ 
14:        if  $\text{posFn}(x_n) = 1 \wedge \exists x_m \in X'_n: m > n \wedge \text{posFn}(x_m) = |X'_n|$ 
15:           $\text{moveTo}(x_m)$ 
16:        elseif  $\exists x_m \in X'_n: m > n$ 
17:           $\text{moveTo}(x_m)$ 
18:        endif
19:      endif
20:    endfor
21:  endif
22:  return  $X'_n$ 

```

Tabelle 3.6 Erläuterungen zu  $\text{ROT}_{\text{zeit}}$  und ROT

Abkürzung	Beschreibung
$t_{\text{start}}$	Zeitpunkt des Formationsstarts
$t_{\text{end}}$	Zeitpunkt des Formationsendes
$n$	Agentenindizes
$s_{\text{ges}}$	Gesamtformationsstrecke
$s_{\text{ist}}$	Aktuell zurückgelegte Strecke
$\text{rot}_{\text{flag}}$	Rotationszustand [true: rotieren / false: nicht rotieren]
$X_n$	Agenten der Formation
$\text{posFn}()$	Funktion zur Bestimmung der geographischen Formationsposition
$vFn()$	Funktion der V-Formation
$eFn()$	Funktion der Echelon-Formation
$\text{moveTo}()$	Funktion zur Bewegung der Agenten

Ein Formationsmitglied versucht immer, die ihm zugewiesene Position hinter dem vorausfliegenden Flugzeug zu halten; dabei wird das zyklische Ereignis  $C$  in Abbildung 3.9 gestartet (Algorithmus 3.5), d.h. dieser Agent reagiert auf das vorausfliegende Flugzeug. Diese Position ist abhängig von den Wirbelschleppeneigenschaften  $w_n$  des vorausfliegenden Flugzeugs  $x_n$ .

## Algorithmus 3.5 Positionskorrektur (POK)

```

1: Algorithmus POK( $X_n, W_n, t_{\text{start}}, t_{\text{end}}$ )
2:    $X_n = X'_n$ 
3:   for  $t_{\text{start}}$  to  $t_{\text{end}}$ 
4:      $moveTo(x_m * w_n) \exists x_m \in X'_n: m > n$ 
5:   endfor
6:   Return  $X'_n$ 

```

Tabelle 3.7 Erläuterungen zu POK

Abkürzung	Beschreibung
$W_n$	Wirbelschleppendaten der Agenten n

Beim Ausfall eines Agenten  $x_f$  wird unmittelbar der Rekonfigurationsalgorithmus aus Algorithmus 3.6 gestartet (siehe auch Abschnitt 2.2.4.6); dieser muss dann zeitgleich bei allen Agenten durchgeführt werden.

## Algorithmus 3.6 Rekonfiguration (REK)

```

1: Algorithmus REK( $x_f \in X_n, X_n, W_n$ )
2:    $X_n = X'_n$ 
3:   if  $\exists x_f \in X'_n$ 
4:     if  $vfn(x_n)$ 
5:       for  $\forall x_n \in X'_n \setminus \{x_m \in X'_n: x_m \neq x_f \wedge m > n \wedge x_m \equiv x_f \pmod{2}\}$ 
6:          $moveTo(x_m)$ 
7:       endfor
8:     elseif  $efn(x_n)$ 
9:       for  $\forall x_n \in X'_n \setminus \{x_m \in X'_n: x_m \neq x_f \wedge m > n\}$ 
10:         $moveTo(x_m)$ 
11:      endfor
12:    endif
13:  return  $X'_n$ 

```

Tabelle 3.8 Erläuterungen zu REK

Abkürzung	Beschreibung
$x_f$	Ausgefallenes Agenten

Das zyklische Ereignis Formationsendpunkt aus Algorithmus 3.7 soll nach einer entsprechenden Zeit (im Sekundenbereich) prüfen, ob dieses erreicht ist. Falls dies der Fall ist, ist die Formationsphase beendet und alle zyklischen Prozesse außer  $E$  werden gestoppt. Es gibt nun wieder einen Agententyp, der sich vom Formationsendpunkt über seine eigenen Wegpunkte zum Ziel bewegt.

## Algorithmus 3.7 Formationsende (FED)

```

1: Algorithmus FED( $x_1$ , dest)
2:   if  $f_{posFn}(x_1) = dest$ 
3:     end ROTzeit
4:     end POK
5:   endif

```

Tabelle 3.9 Erläuterungen zu FED

Abkürzung	Beschreibung
$x_1$	Formationsführer

Das Erreichen des Ziels ist der Endzustand dieses Workflows und beendet Ereignis  $E$ .

Im nächsten Abschnitt werden die Konzepte zur Positionierung der Agenten während der Formationsbildung vorgestellt.

## 3.2.3.2. Positionierung der Agenten innerhalb der Formation

Wie in Abschnitt 2.2.4 bereits beschrieben, ist die Formationsbildung ein kritischer Abschnitt während des Formationsfluges. Dies gilt zum einen aus Sicherheitsgründen, aber auch aus wirtschaftlichen Gründen und wird daher in diesem separaten Abschnitt behandelt.

Das Ansetzen der Tragfläche an der Wirbelschleppe des vorausfliegenden Flugzeugs verursacht zunächst Turbulenzen. Die Wirbelstärken verschiedener Flugzeugtypen sind unterschiedlich stark und haben aufgrund dessen ein hohes Optimierungspotenzial, so dass die richtige Positionierung eine deutliche Auswirkung auf die Flugleistungen hat. So reduziert die Wirbelschleppe einer A380 den Auftrieb eines dahinter fliegenden Flugzeugs deutlich mehr als dies bei einer A340 der Fall ist (siehe Abbildung 2.13).

Es gibt zwei Entwürfe wie die Positionierung erfolgen kann und für die konkrete Umsetzung berücksichtigt werden muss:

1. Bestimmung der Formationsposition nach der Reihenfolge der Ankunft am Treffpunkt
2. Vorab bestimmte optimale Formationsposition

Die Positionierung nach der Reihenfolge der Ankunft am Treffpunkt (1.) ist die einfachste Variante. Da aber im Anwendungsfall alle Flugzeuge zeitnah am Treffpunkt ankommen, wäre eine optimale Positionierung (2.) erstrebenswert. Die optimale Formationsposition kommt bei einem Flugzeugmix in der Formation mehr zum Tragen, wenn die Startgewichte gleicher Flugzeugtypen einander entsprechen.

Beispielsweise haben 5 verschiedene Flugzeuge in einer V-Formation  $5! = 120$  Möglichkeiten zur Positionierung. Aufgrund dessen muss ein geeignetes Verfahren die optimale Anordnung auswählen. Vor dem Hintergrund der Datenlagen zur Luftwiderstandsreduzierung werden nur Annahmen über den Vorteil des Formationsfluges getroffen. So wurden in Tabelle 3.2 erste Annahmen über die Reduzierung des Luftwiderstands in unterschiedlichen Abständen getroffen. In Abbildung 3.10 werden 4 der 120 möglichen Kombinationen zur Anordnung der verschiedenen Flugzeugtypen in einem Abstand von 1 km exemplarisch dargestellt. Als gemeinsame Metrik wird dabei die mögliche Reduzierung des Luftwiderstands genutzt (siehe Tabelle 3.2).

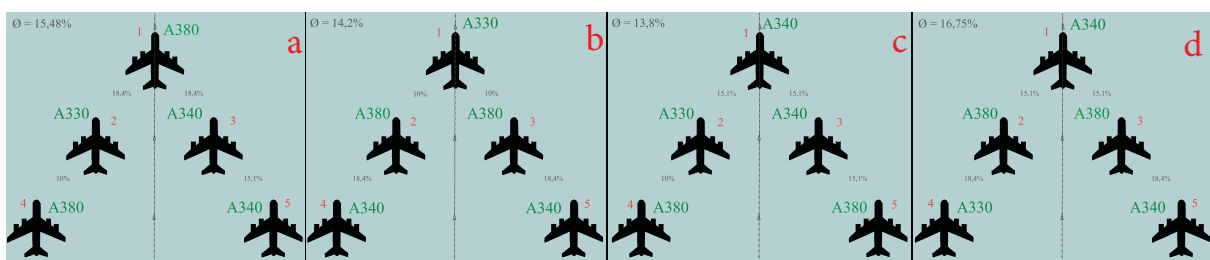


Abbildung 3.10 Verschiedene Positionierungen der Flugzeuge in einer V-Formation und deren durchschnittliche Luftwiderstandsreduzierungen a) (links) 15,48% b) (links Mitte) 14,2% c) (rechts Mitte) 13,8% d) (rechts) 16,75%

Es kann Abbildung 3.10 entnommen werden, dass von vier exemplarisch ausgewählten möglichen Positionierungen, die auf der rechten Seite (Abbildung 3.10d) mit 16,75% die höchste durchschnittliche Luftwiderstandsreduzierung hat. Es gibt zur Lösung dieses kombinatorischen Optimierungsproblems einen allgemeinen und einen speziellen Ansatz, die im Folgenden beschrieben werden.

Zur allgemeinen Lösung kann z.B. das „Branch-and-Bound“ Verfahren genutzt werden, das von Land und Doig [LAN60] entwickelt wurde. Bei diesem Verfahren soll für ganzzahlige Optimierungsprobleme die beste Lösung mit Hilfe eines Entscheidungsbaums gesucht werden. Dabei kann zur Optimierung des Algorithmus eine Zielfunktion mit einem anzustrebenden Wert, der der durchschnittlichen Luftwiderstandsreduzierung entspricht, festgelegt werden und ein entsprechender Entscheidungsbaum durchsucht werden. In Abbildung 3.11 wird ein solcher Baum mittels einer Breitensuche durchsucht und da der angestrebte Wert der Zielfunktion 16% beträgt, wird dieser nach 7 Schritten beendet.

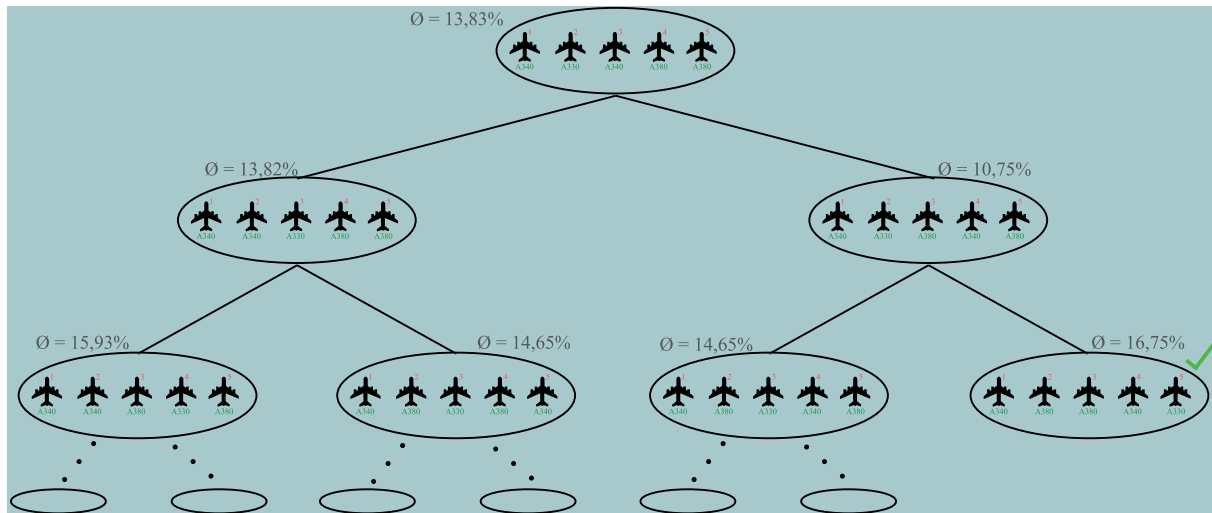


Abbildung 3.11 Entscheidungsbaum für das Branch-and-Bound Verfahren

Dabei entspricht ein Schritt der Permutation der Agentenpositionen und der Berechnung der durchschnittlichen Luftwiderstandsreduzierung. Hierzu wird zunächst nach Regel 2.1 der Vorgänger bestimmt und der entsprechende Wert der Luftwiderstandsreduzierung ausgelesen. Zur Steigerung der Effizienz dieses Algorithmus können Paare zwischengespeichert werden, wie in Abbildung 3.12 dargestellt, um die erneute Berechnung der Luftwiderstandsreduzierung zu vermeiden.

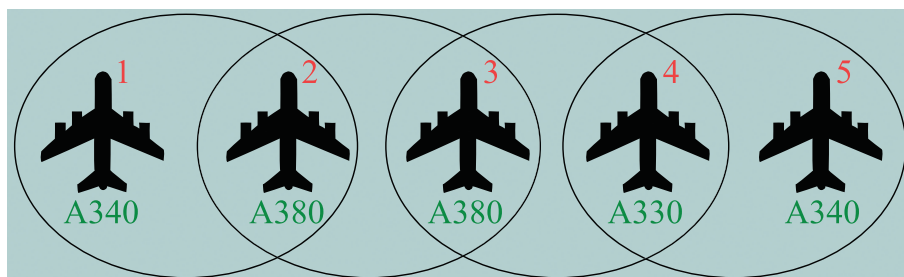


Abbildung 3.12 Zusammenfassung von Agentenpaaren zur Anwendung des Branch-and-Bound Verfahrens

Der spezielle Ansatz zur Lösung dieses Optimierungsproblems beschränkt sich auf die Größe der jeweiligen Flugzeuge und auf die Erkenntnis (siehe Abschnitt 2.2.2.2.3), dass größere Flugzeuge eine größere Wirbelschlepe erzeugen. Hier kommt die getroffene Annahme zum Tragen, dass diese größere Wirbelschlepe einem dahinter fliegendem Flugzeug mehr Auftrieb verleiht. Vor diesem Hintergrund werden die Flugzeuge nach der Größe auf die Formationspositionen verteilt (siehe Regel 3.1).

### Regel 3.1 : Bestimmung der Formationsposition

ordne alle Agenten nach deren aktuellen Masse

vergebe iterativ Formationspositionen nach der Masse absteigend

Wird Regel 3.1 auf die 5 Agenten von Abbildung 3.12 angewendet, kann, wie in Abbildung 3.13 dargestellt, eine optimale Lösung erwartet werden.

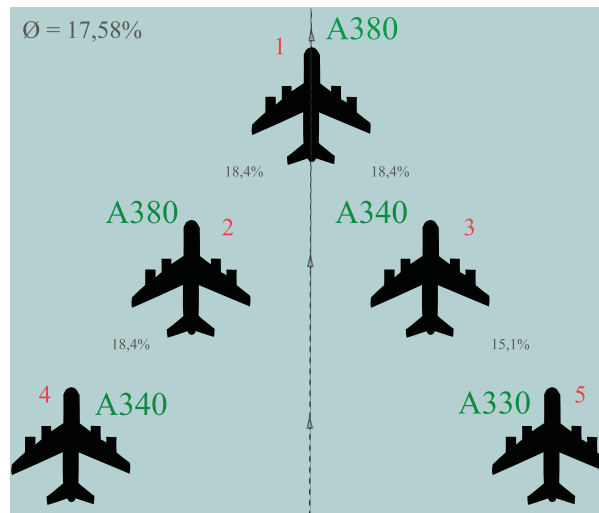


Abbildung 3.13 Optimale Formationsposition nach Regel 3.1

Da kein Wirbelschleppenmodell benutzt wird und somit der Einfluss der Masse auf die Wirbelstärke nicht gegeben ist, kann auch die ICAO Flugzeugklassifizierung (siehe Abbildung 2.18) mit übergeben werden, da diese ebenfalls eine Aussage über die Größe trifft ohne Berücksichtigung der aktuellen Masse. Dieser Ansatz wird für die prototypische Implementierung in Kapitel 4 berücksichtigt.

Im folgenden Abschnitt wird dieses Kapitel zusammengefasst.

### 3.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der konzeptuelle Entwurf zur agentenbasierten Modellierung des Formationsfluges vorgestellt. Hierzu wurden die Grundlagen der agentenbasierten Simulation, UML-Aktivitätsdiagramme mit der eigenen Erweiterung für die agentenbasierte Modellierung und die Simulationsframeworks NetLogo, Repast Symphony und AnyLogic eingeführt. Das beschriebene Konzept wird unabhängig vom Simulationsframework beschrieben.

Der Formationsflug wurde in Abschnitt 2.2 technisch und algorithmisch beschrieben. In diesem Kapitel wurde der konzeptuelle Entwurf zur agentenbasierten Modellierung des Formationsfluges entwickelt. Dieses Konzept umfasst die gesamte Flugphase vom Start bis zur Landung. Zur Übergabe von Input-Parametern wird die konkrete Nutzung der CPACS-

---

Struktur (siehe Anhang A.3.1) vorgeschlagen, da diese auf XML basierende Struktur bereits einige Datensätze beinhaltet, die für die Modellierung des Formationsflugs genutzt werden könnte. Die Ermittlung der Flugleistung kann mittels des adaptierten Modells aus dem BADA Projekt erfasst werden. Mit Hilfe des implementierten Modells, konnte gezeigt werden, dass das adaptierte Modell für die agentenbasierte Modellierung genutzt werden kann. Neben verschiedenen Ansätzen zur Positionierung der Flugzeuge innerhalb der Formation, wurde das Agentenverhalten für den gesamten Flug entwickelt. Es konnten mit Hilfe dieser Beschreibung zwei Agententypen, Formationsführer und Formationsmitglied, abgeleitet werden, die zielbasiertes bzw. reaktives Verhalten aufweisen sollten.

Vor dem Hintergrund der getroffenen Erkenntnisse dieses Kapitels wird die prototypische Implementierung im nächsten Kapitel vorgestellt.





## 4. Prototypische Umsetzung

In Abschnitt 2.2 wurde der Formationsflug vor dem Hintergrund des Schwarmverhaltens vorgestellt und untersucht. Dabei wurden neben den Grundlagen der Aerodynamik und der Einteilung der Flugrouten Algorithmen zur Bildung, Rotation und Rekonfiguration der verschiedenen Formationsarten entwickelt.

In Kapitel 3 wurde der konzeptuelle Entwurf zur Modellierung des Formationsflugs (siehe Abschnitt 3.2) beschrieben.

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel die prototypische Implementierung dieses Modells vorgestellt.

Im nächsten Abschnitt werden zunächst der Prototyp zur agentenbasierten Modellierung des Formationsfluges vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Abschließend werden die Erkenntnisse dieses Kapitels zusammengefasst.

### 4.1. Framework zur Modellierung des Formationsflugs

Das Konzept aus Abschnitt 3.2 beschreibt den Formationsflug für den Entwurf einer agentenbasierten Simulation. Zur Implementierung dieses Konzepts wurde die auf Java basierende Simulationsumgebung AnyLogic genutzt. Der wesentliche Vorteil ist die Nutzung von Zustandsdiagrammen zur Beschreibung des Agentenverhaltens.

Im Folgenden wird zunächst die Initialisierungsphase beschrieben, in der anhand der CPACS-Struktur die Agenten initialisiert werden. Anschließend wird der Prototyp beschrieben, der sich grob aus der Main-Klasse zur Implementierung der Umgebung und der Infrastruktur und der Agenten-Klasse zur Implementierung des Agentenverhaltens zusammensetzt. Am Ende dieses Abschnitts werden anhand verschiedener formationspezifischer und flugzeugspezifischer Szenarien die Resultate der Simulation diskutiert.

#### 4.1.1. Implementierte CPACS-Struktur für die agentenbasierte Simulation

Die in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Kategorien bezüglich des Flugzeugtyps, der Formation und der individuellen Mission beinhalten alle relevanten Daten für die Übergabe an einen Software-Agenten „Flugzeug“. In Tabelle A.3.1 (im Anhang) ist diese CPACS-Struktur dargestellt. Diese Datenstruktur wurde mit entsprechenden Daten über die Flugzeugtypen (Kategorie „model“) unter „vehicle/aircrafts“, die Formationen (Kategorie „formation“) unter „procedure/formations“ und die Missionen bzw. die Flüge (Kategorie „mission“) unter „missions“ gefüllt. Im ersten Entwurf wurden drei Flugzeugtypen von Airbus verwendet, die die Nordatlantikroute überfliegen: A340-642 [ABS13a], A330-301 [ABS13b] und A380-841 [ABS13c]. In Abbildung 4.1 werden die Abhängigkeiten der Kategorien aufgezeigt. Die

Formation bildet die zentrale Datenstruktur, die Sekundärschlüssel (uID: „unique identification“) der anderen Kategorien beinhaltet.

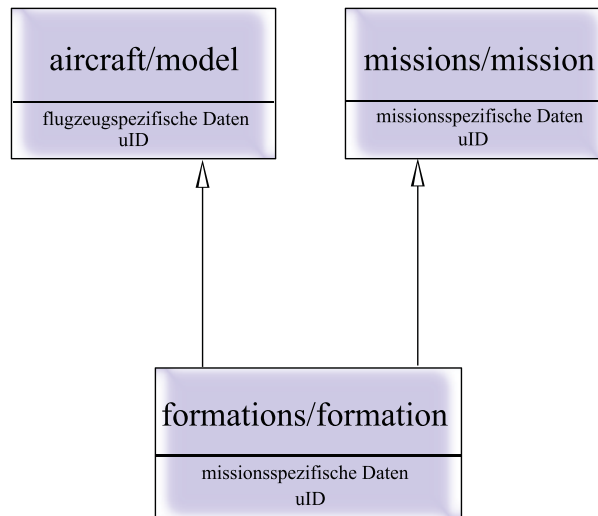


Abbildung 4.1 UML-Diagramm der CPACS-Struktur

Da die verwendete Struktur nicht komplex ist, wurde zur Übergabe an das auf Java basierende Simulationsframework die DOM Bibliothek von w3c verwendet [ORA13c]. Dabei speichert der DOM-Parser die XML-Struktur als Baum im Speicher ab. So werden die entsprechenden Kategorien an eine NodeList übergeben und die entsprechenden Unterkategorien können ausgelesen werden.

Die einzelnen Kategorien „model“, „formation“ und „mission“ werden methodenweise ausgelesen. Diese Aufrufe werden von der Main-Klasse getätigt, die im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

#### 4.1.2. Main-Klasse

Diese Klasse ist die zentrale Instanz der Simulation und beinhaltet folgende Komponenten:

1. Aufruf der Parser-Klasse und Initialisierung der Agenten
2. Aufruf der GIS-Umgebung
3. Aufruf entsprechender Grafiken zur Ausgabe wie Diagramme und Excel-Anbindung

Zum Aufruf der Simulation wird zunächst, wie im letzten Abschnitt beschrieben, mit Hilfe des Parsers die CPACS-Struktur in ein entsprechendes Object-Array zwischengespeichert. Allen Agenten werden die Namen der anderen Formationsteilnehmer mitgegeben. Darüber hinaus werden den Agenten alle formationsspezifischen bzw. flugzeugspezifischen Daten, die zur Navigation, zur Ausführung der Algorithmen (Formationsbildung, Rotation, Halten der

Position und Distanz während des Formationsfluges und Rekonfiguration) und zur Berechnung der Flugleistung benötigt werden, übergeben.

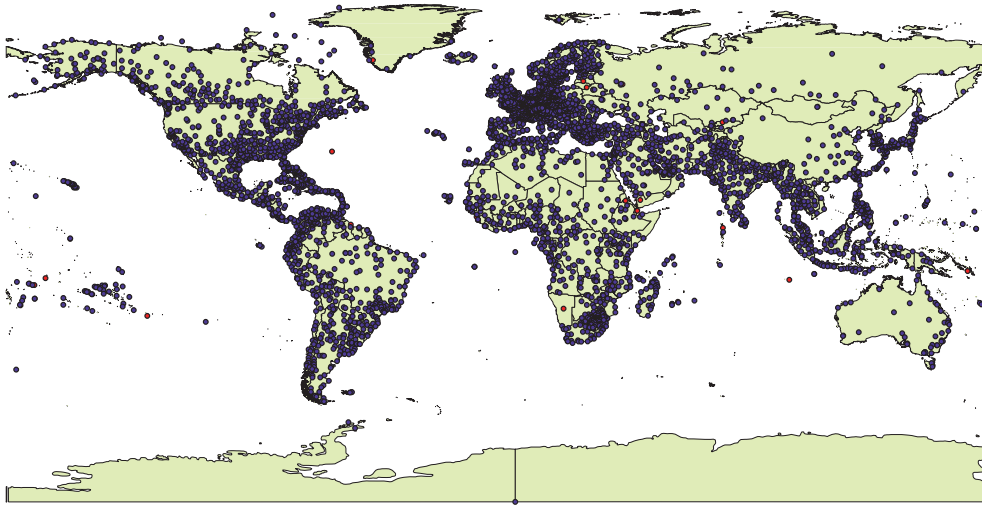


Abbildung 4.2 GIS-Umgebung des Formationsflugs in ArcMap

Die Umgebung in AnyLogic ist ein GIS. Dieses basiert auf dem „World Geodetic System“ (WGS 84) Koordinatensystem, einem Standard für Kartographie, Geodäsie und Navigation ist. WGS 84 ist die neueste Version dieses Standards und wird als Referenzkoordinatensystem für das „Global Positioning System“ (GPS) verwendet. In Abbildung 4.2 ist ein GIS, das von S. Löwa und C. Blank (TUHH) dieser Arbeit zur Verfügung gestellt worden ist, abgebildet. Hier wird die gesamte Erde mit allen Ländergrenzen, allen Hauptstädten (rot) und allen Flughäfen (blau) dargestellt. Mit Hilfe dieser Karte können den Agenten Längen- und Breitengrade übergeben werden.

In Abbildung 4.3 ist die aktuelle Simulationsoberfläche in AnyLogic dargestellt.

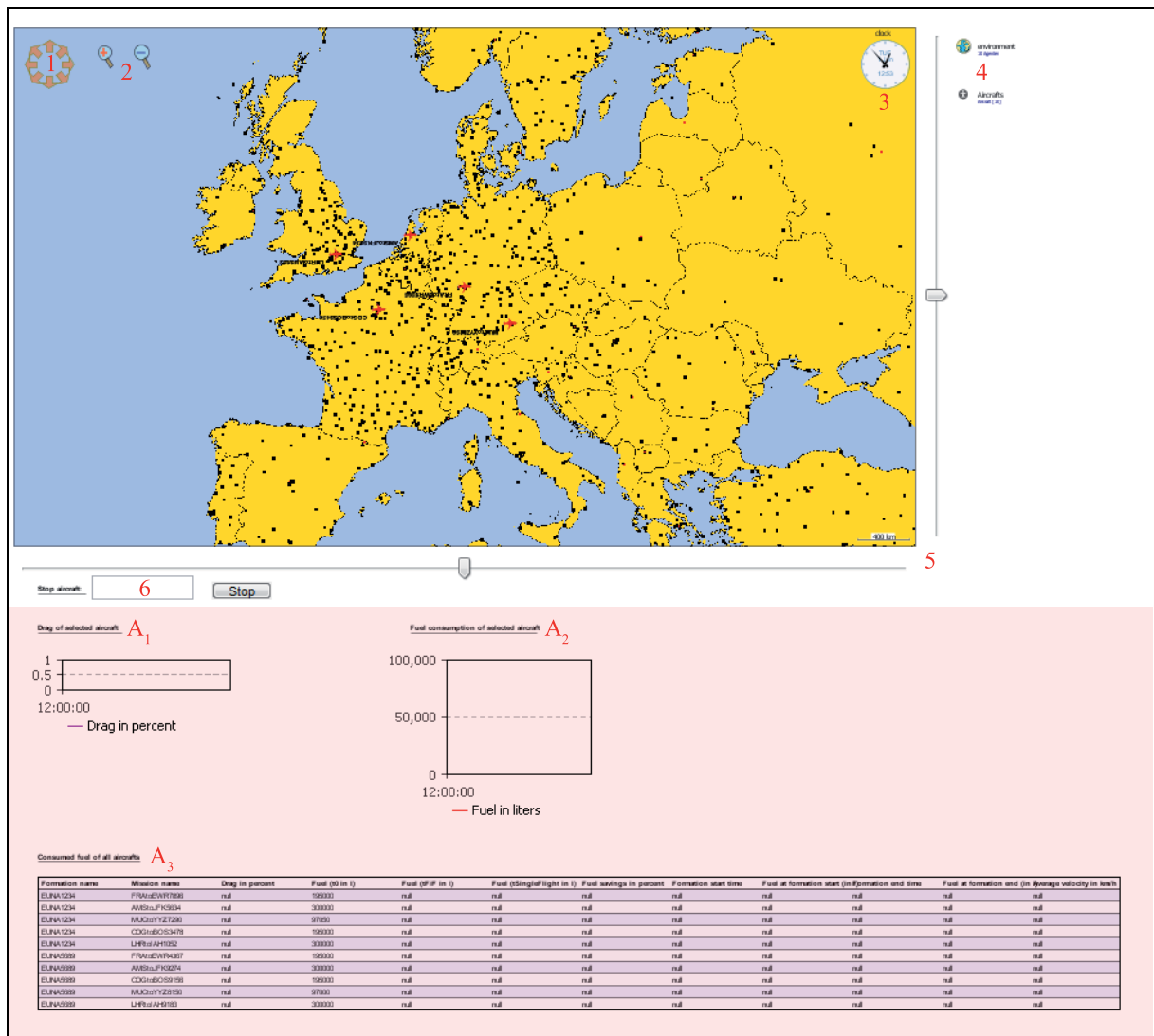


Abbildung 4.3 Simulationsoberfläche des Formationsfluges

Auf dieser Oberfläche gibt es die Simulationsfläche und die Ausgabenfläche (rot gefärbt). Die Simulationsfläche setzt sich aus dem GIS und weiteren sechs Komponenten zusammen. Diese sind:

1. Pfeile mit deren Hilfe auf der Karte feiner navigiert werden kann.
2. Hiermit kann auf der Karte ein- und ausgezoomt werden.
3. Dies ist die universale Simulationszeit mit Datumsanzeige.
4. Hier wird beim Start der Simulation die initialisierte Anzahl der Flugzeugagenten angezeigt.
5. Diese „Slider“ erlauben eine gröbere Navigation über die Karte im Gegensatz zu 1.

6. Hier kann mit Hilfe des Missionsnamens bei Agenten ein Zwischenfall eingeleitet werden, um den Rekonfigurationsalgorithmus zu testen.

Die Ausgabenflächen  $A_1$  und  $A_2$  geben die aktuelle angenommene prozentuale Widerstandsreduzierung und Kraftstoffmenge des ausgewählten Flugzeugagenten über die Zeit an. Ein Flugzeugagent kann per Mausklick ausgewählt werden und wird dann auf dem GIS zentriert dargestellt. In  $A_3$  wird eine Tabelle erstellt, die für alle Flugzeugagenten Informationen über den Formations- bzw. Missionsnamen, die aktuelle prozentuale Reduzierung der Luftwiderstandskraft, die Kraftstoffmenge beim Start, die aktuelle Kraftstoffmenge im Formationsflug bzw. im Alleinflug, den prozentualen Anteil dieser beiden Kraftstoffmengen, die Startzeit der Formation und die entsprechende Kraftstoffmenge, die Beendigungszeit der Formation und die entsprechende Kraftstoffmenge sowie die durchschnittliche Geschwindigkeit enthält. Mit Hilfe der Kraftstoffmenge beim Formationsstart kann die Formationsphase genauer untersucht werden (siehe Abschnitt 4.1.4). Im folgenden Abschnitt wird das Agentenverhalten beschrieben.

#### 4.1.3. Agentenklasse

In der Agentenklasse wird das Verhalten des Agententyps Flugzeug definiert. Der in Abschnitt 3.2.3.1 beschriebene und in Abbildung 3.9 dargestellte Gesamtworflow wurde vollständig in AnyLogic implementiert. Dabei umfasst die Klasse „Aircraft“ beide in Abschnitt 3.2.3.1 beschriebenen Agententypen, die während des Formationsfluges entstehen: den Formationsführer, der sich als zielbasierter Agent wegpunktweise fortbewegt und das Formationsmitglied, das sich als einfacher Reflex-Agent entsprechend dem vorausfliegenden Agenten ausrichtet und diesem folgt.

In Abbildung 4.4 bis 4.9 ist das implementierte Zustandsdiagramm für das Agentenverhalten abgebildet, das im Hintergrund mit sogenannten „switch case“-Bedingungen arbeitet. So entspricht jedes gelb dargestellte Rechteck einem Zustand und jede als Pfeil dargestellte Transition einem Methodenaufruf. Mit Hilfe dieser Implementierungsart wird die Übersicht gewahrt. Redundanzen können durch Implementierung global aufrufbarer Methoden vermieden werden. Dies wurde beispielsweise zur Implementierung des Flugleistungsmodells genutzt. Die Agentenklasse wird für jeden Flugzeugagenten in einer eigenen Instanz ausgeführt, dabei finden Zugriffe zwischen den Flugzeugagenten sequentiell statt, was zu schlechterer Performanz während der Laufzeit führen kann. Dieser Aspekt wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels diskutiert. Subsystem A aus Abbildung 4.4 wird genauer in Abbildung 4.5 dargestellt und beschreibt die Agentenzustände vom Abflug bis zum

Formationstreffpunkt. So wird erst gestartet, wenn „actual take-off time“ (aToT) erreicht ist. Dann durchläuft ein Flugzeugagent die Trajektorien bis zum Treffpunkt („flyToRP“). Hier wird entweder nach Ankunftszeit („positioningByOrder“) oder optimaler Positionierung („optimalPositioning“) die Formationsposition bestimmt. Subsystem B, C und D aus Abbildung 4.4 und entsprechend Abbildungen 4.6, 4.7 und 4.8 beschreiben die Formationsbildung für V-, EchelonLinks und EchelonRecht-Formation. Hierbei muss der Flugzeugagent je nach Position den richtigen Zweig des Algorithmuses wählen. In Subsystem E aus Abbildung 4.4 und genauer in Abbildung 4.9 wird der Formationsflug und Alleinflug nach der Formation abgebildet. Während der Formationsphase sind die Zustände nur für den Formationsführer wichtig, da die Formationsteilnehmer immer dem vorausfliegenden Flugzeug folgen. Ab dem Formationsende („formationEndPoint“) laufen alle Flugzeugagenten die Zustände bis zur Landung ab („finalDestination“).

Für das in Abbildung 3.9 beschriebene Konzept mussten neben dem Workflow und der Formationsbildung zyklische Ereignisse für das Folgen eines vorausfliegenden Flugzeugs, das Halten eines bestimmten Abstands, die Berechnung der Flugleistung, die Überprüfung des Formationsendes und die Rotation implementiert werden. Darüber hinaus wurde die Rekonfiguration der Formation als Ereignis implementiert, das zur Laufzeit der Simulation ausgelöst werden kann, indem der Ausfall eines Flugzeugs simuliert wird. Der Agentenworkflow ist analog zum konzeptuellen Teil (Abbildung 3.9), so dass beim Start eines Flugzeugs das Flugleistungsmodell minutenweise ausgeführt wird und sich ein Flugzeugagent wegpunktweise fortbewegt. Am Treffpunkt wird kurz vor der Formationsbildung die Positionierung innerhalb der Formation bestimmt. Dies wird entweder nach der Reihenfolge der Ankunft oder der optimalen Positionierung (ICAO-Klassifizierung) durchgeführt und wird in der CPACS-Struktur anhand einer Stringkette vorgegeben (siehe Anhang Tabelle A.3.1).

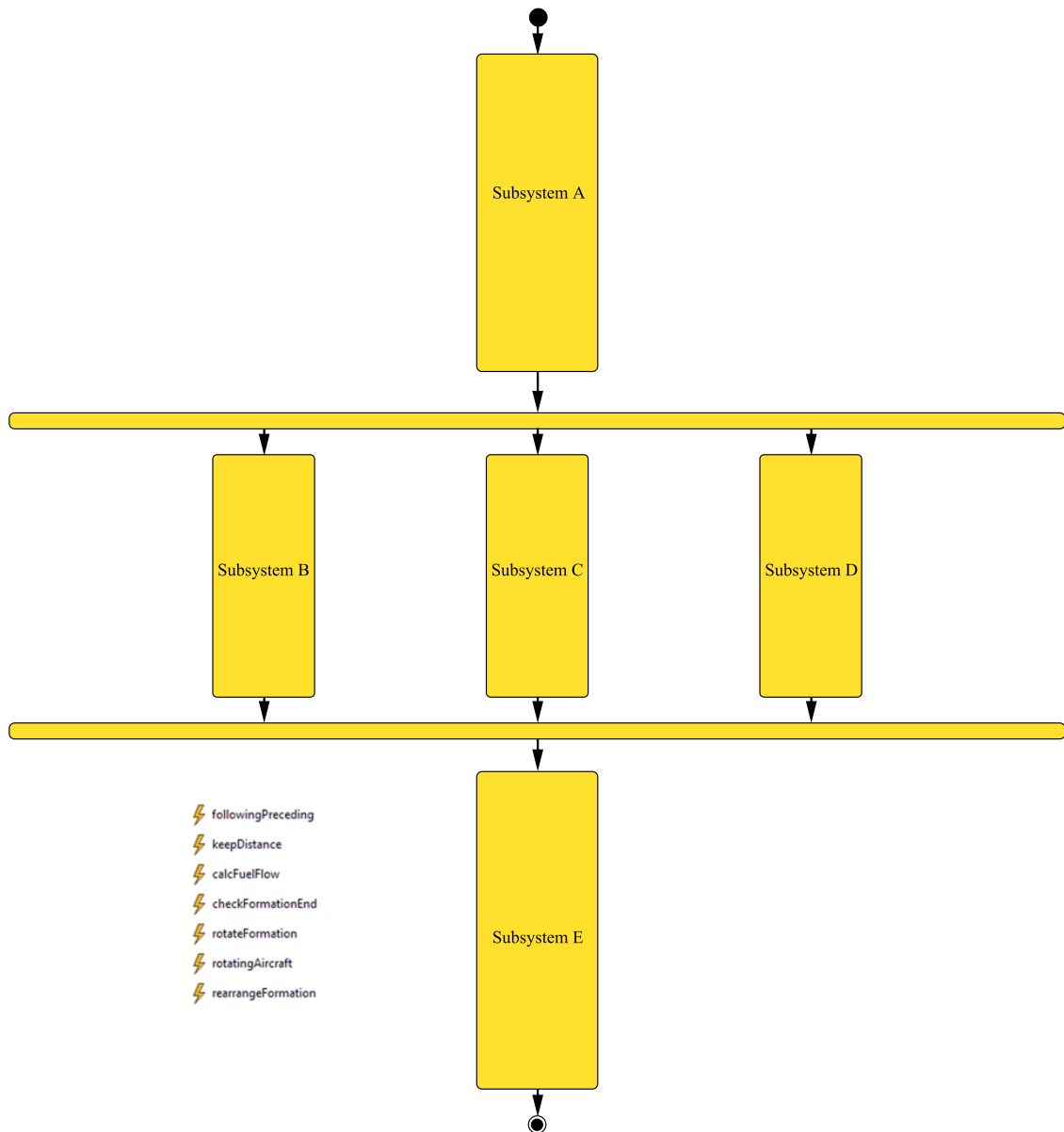


Abbildung 4.4 Zustandsdiagramm der Agentenklasse „Aircraft“ (alle Subsysteme)

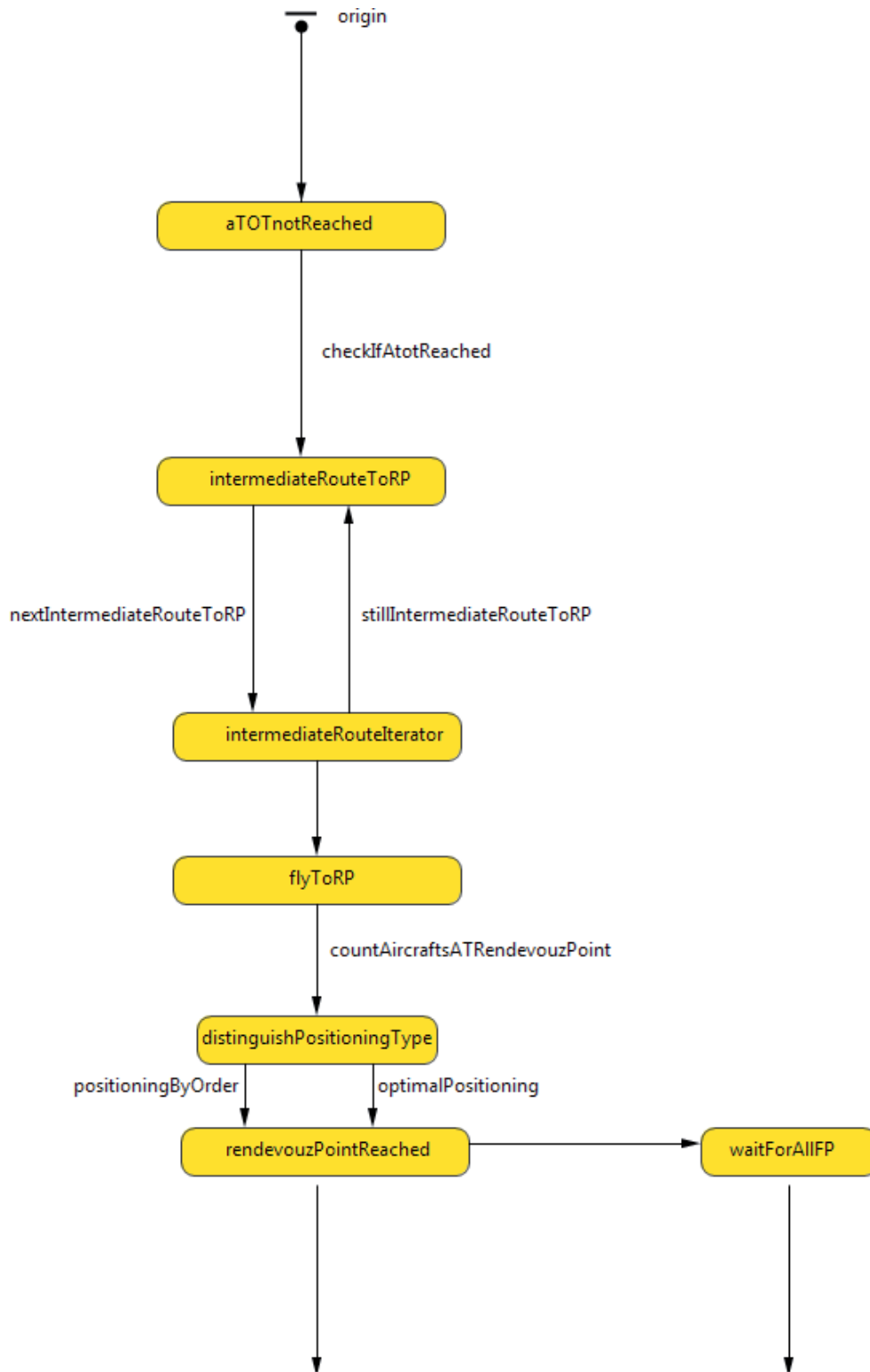


Abbildung 4.5 Zustandsdiagramm der Agentenklasse „Aircraft“ Start bis Treffpunkt  
(Subsystem A)



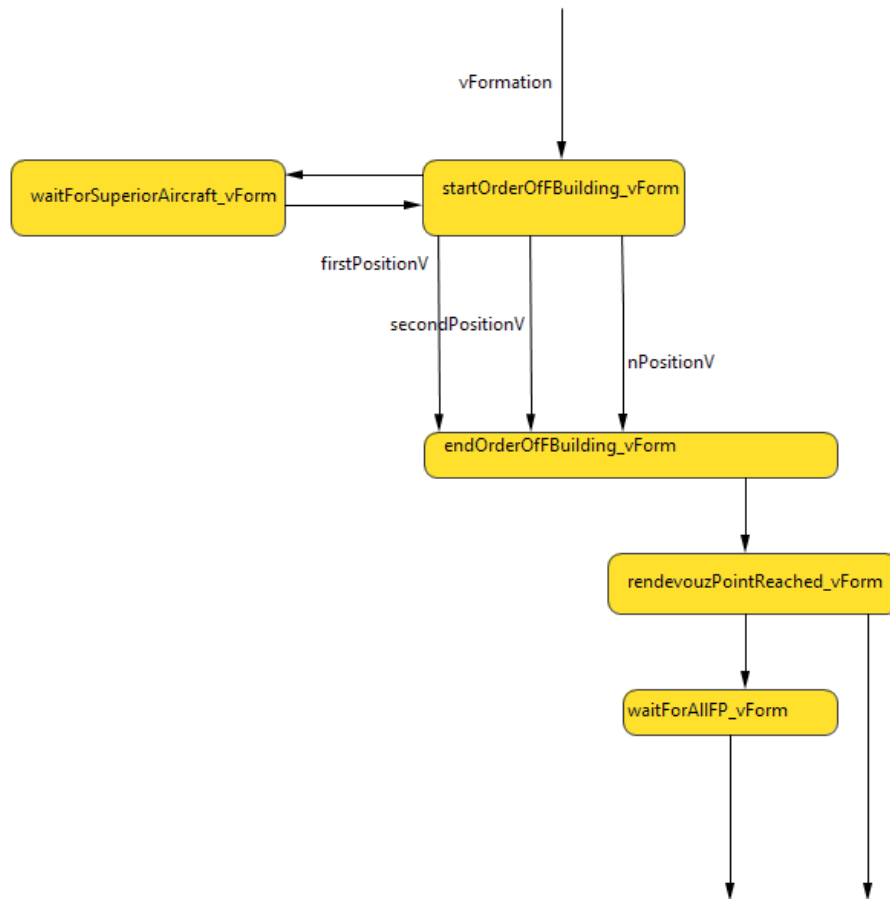


Abbildung 4.6 Zustandsdiagramm der Agentenklasse „Aircraft“ Formationsbildung der V-Formation (Subsystem B)

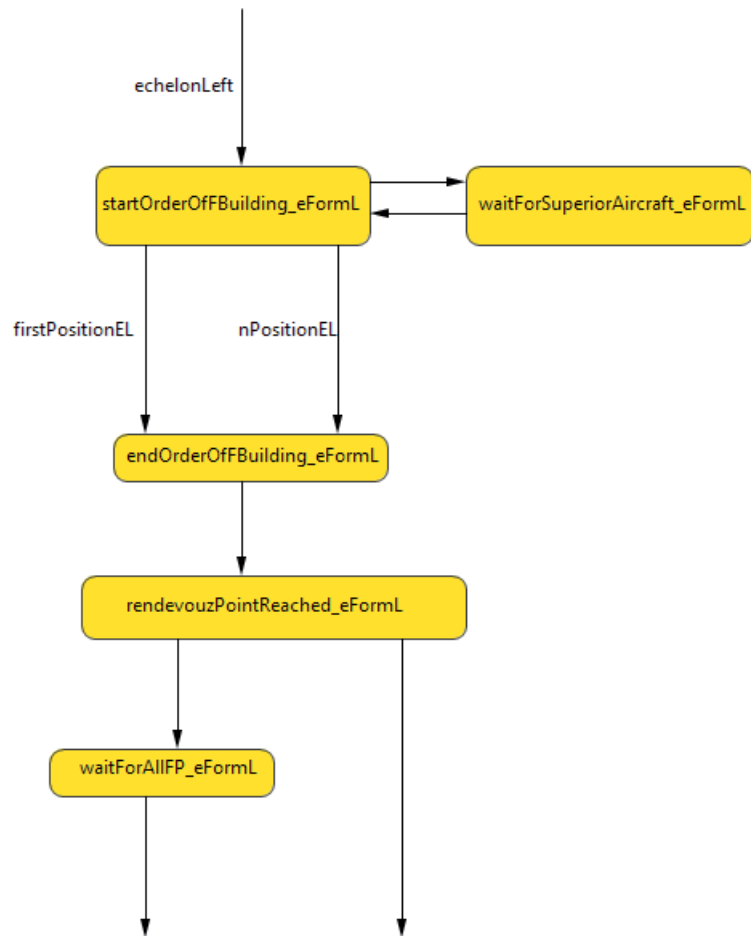


Abbildung 4.7 Zustandsdiagramm der Agentenklasse „Aircraft“ Formationsbildung der Echelon<sub>Links</sub>-Formation (Subsystem C)

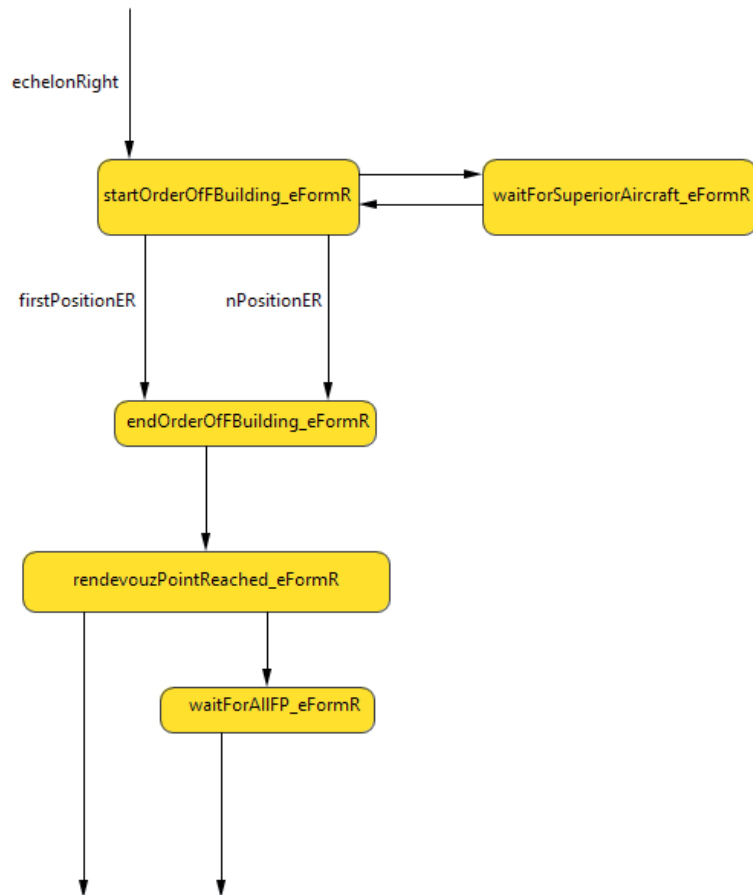


Abbildung 4.8 Zustandsdiagramm der Agentenklasse „Aircraft“ Formationsbildung der EchelonRechts-Formation (Subsystem D)

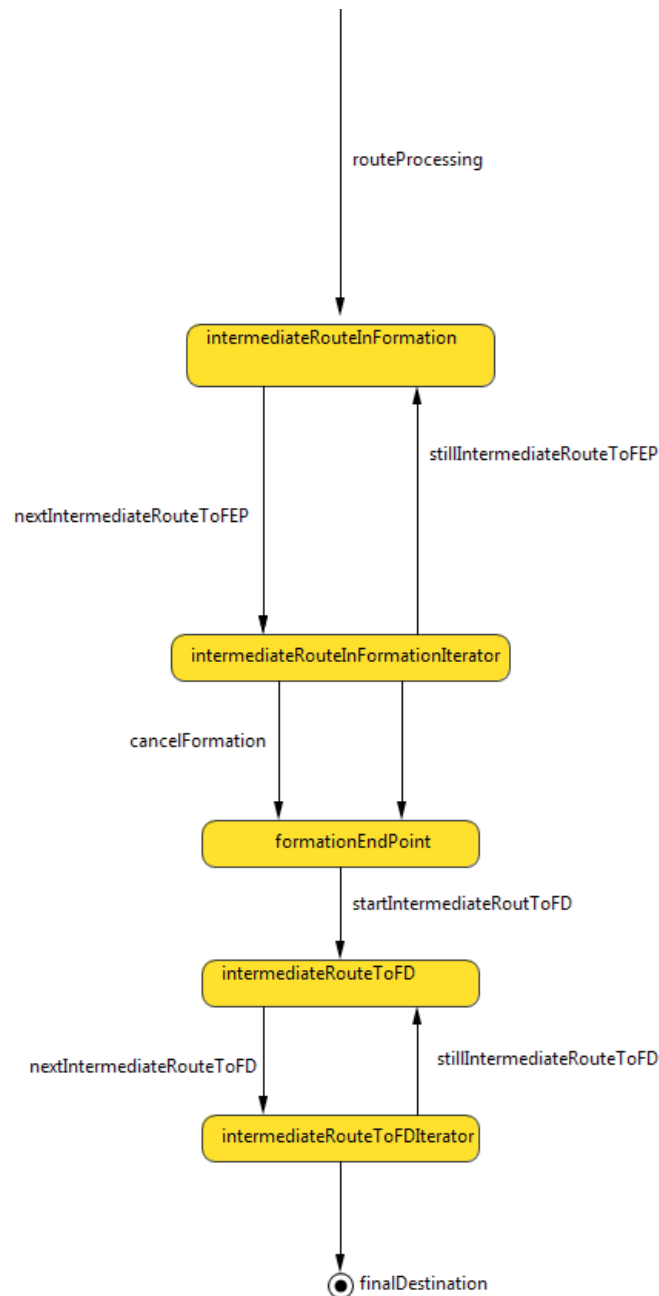


Abbildung 4.9 Zustandsdiagramm der Agentenklasse „Aircraft“ Formationsflug bis Landung (Subsystem E)

Der implementierte Prototyp umfasst die V- und die Echelon-Formation (rechte und linke Staffelung). Zur Implementierung der Formationsbildungsalgorithmen wurden im obigen Zustandsdiagramm die in den Abbildungen 2.26 und 2.29 beschriebenen Algorithmen verwendet.

Für die V-Formation (Abbildung 4.6) muss, im Gegensatz zur Echelon-Formation (Abbildungen 4.7 und 4.8), die erste, zweite und n-te Position unterschiedlich behandelt werden, da die Bestimmung des vorausfliegenden Flugzeugagenten mit Hilfe der Formationsposition ermittelt wird (vgl. Abbildung 2.25 und 2.28). Zur Implementierung

Formationsbildung wurden die Regeln 2.1 und 2.2 genutzt. Die Bestimmung der relativen Position zum vorausfliegenden Flugzeugagenten wird mit Hilfe der aktuellen Koordinaten (`getLatitude()` und `getLongitude()` in Anylogic) und der Wirbelschleppenkoordinaten des vorausfliegenden Flugzeugs (aus CPACS) ermittelt. In den Gleichungen 4.1 und 4.2 werden einzuhaltende Breiten- (analog wird der rechtsseitige Seitenabstand ermittelt) und Längengrad zu einem vorausfliegenden Flugzeug berechnet.

$$\text{Breitengrad}_{\text{links}} = \text{aktuellePos}_{\text{vorFlug}}(\text{Breitengrad}) - \frac{\text{WirbelschleppenMatrix}_{\text{vorFlug}}(Y) + \frac{\text{EigeneSpannweite}}{2}}{\text{AbstandBreitengrade}} \quad (4.1)$$

Da als Simulationsumgebung ein GIS nach WGS84 genutzt wird und zum Bewegen der Flugzeugagenten Längen- und Breitengrade übergeben werden, muss der versetzte Breitengrad (Formeln 4.1) zur aktuellen Position des vorausfliegenden Flugzeugs dieses Format aufweisen. Der zu haltende laterale Abstand muss durch den Abstand der Breitengrade geteilt werden. Dieser ist an den Erdpolen (111,694 km) geringfügig größer als am Äquator (110,574 km) und kann im Mittel mit 111 km (*AbstandBreitengrade*) angenommen werden.

$$\text{Längengrad} = \text{aktuellePos}_{\text{vorFlug}}(\text{Längengrad}) + \left( \frac{\text{WirbelschleppenMatrix}_{\text{vorFlug}}(X)}{\text{Erdumfang}_{\text{anDiesemBreitengrad}}} \right) 360 \quad (4.2)$$

Zur Berechnung des versetzten Längengrads zum vorausfliegenden Flugzeug (*a* in Formel 4.3 und *Längengrad* in Formel 4.2) muss grundsätzlich der Erdumfang ( $2 \pi \cos \varphi$ ) durch  $360^\circ$  geteilt werden. Die Berechnung des Erdumfangs erfolgt mit der Java Cosinus-Funktion und erwartet den Winkel in Bogenmaß (siehe Formel 4.4). Diese Formel berechnet einen Näherungswert und wird deshalb mit dem Äquatorradius von 6378 km berechnet.

$$a \approx \frac{2\pi r \cos \varphi}{360} \quad (4.3)$$

$$\text{Erdumfang}_{\text{anDiesemBreitengrad}} = 2\pi \text{Äquatorradius}_{\text{WGS84}} \cos\left(\frac{\pi}{180} \text{aktuellePos}_{\text{vorFlug}}(\text{Breitengrad})\right) \quad (4.4)$$

Das vertikale Versetzen zum vorausfliegenden Flugzeugagenten ist trivial und wird anhand des Werts von *WirbelschleppenMatrix*<sub>vorFlug</sub>(Z) in Formel 4.5 berechnet und hat aufgrund des zweidimensionalen GIS keine visuellen Auswirkungen auf die Simulation. Dies wirkt sich aber auf das implementierte Flugleistungsmodell aus Abschnitt 3.2.2.1 (siehe Formel 3.4) aus.

$$\text{Flughöhe} = \text{aktuelleFlughöhe}_{\text{vorFlug}} - \text{WirbelschleppenMatrix}_{\text{vorFlug}}(Z) \quad (4.5)$$

Nachdem die Positionen der Flugzeugagenten innerhalb der Formation übergeben wurden, startet der Formationsflug. Während des Formationsflugs kommen die zyklischen Ereignisse zum Einsatz: Folgen des vorausfliegenden Flugzeugs, Halten der Distanz zum vorausfliegenden Flugzeug, Flugleistungsmodell, Formationsende, Rotation (prüfen, ob es soweit ist), Rotation (Ausführung) und Rekonfiguration beim Ausfall eines Flugzeugagenten. Zyklische Ereignisse sind in AnyLogic serialisierte Java Objekte, die zyklisch ausgeführt werden. So führt jedes Objekt diese in der eigenen Instanz aus.

Das vorausfliegende Flugzeug wird verfolgt, indem dessen relative Position permanent abgefragt und neu berechnet wird.

Da die longitudinalen Abstände nur annäherungsweise bestimmt werden (siehe Formel 4.2) und die erste Umsetzung dessen schlechte visuelle Ergebnisse erbrachte, wurde ein zyklisches Ereignis zum Halten des Abstands implementiert.

Dieser sich zyklisch wiederholende Algorithmus hält einen bestimmten Abstand anhand der Wirbelschleppeninformationen, der halben Spannweite und der halben Flugzeuglänge des vorausfliegenden Flugzeugs, der mit Hilfe des Satzes von Pythagoras berechnet wird (siehe Abbildung 4.10). Diese lateralen und longitudinalen Abstände werden aus der CAPCS Struktur ausgelesen und genutzt. Da in den implementierten Prototypen jeder Flugzeugagent auf dieselbe Flugzeugagentenklasse zugreift, sehen alle Flugzeugagenten optisch gleich aus. Darüber hinaus betrachtet die Methode „distanceTo“ immer vom Zentrum eines Flugzeugagenten ausgehend dessen Abstand zu einem anderen Flugzeugagenten. Vor diesem Hintergrund werden die halbe Spannweite und die halbe Flugzeuglänge mitberücksichtigt.

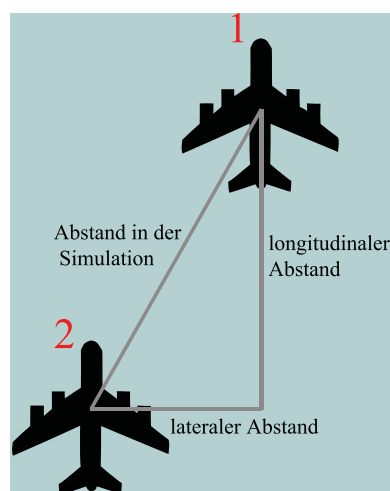


Abbildung 4.10 Bestimmung des Simulationsabstandes innerhalb der Formation

---

Zum Halten des Abstands wird die Geschwindigkeit nach der Mindest- und Höchstgeschwindigkeit im Horizontalflug flugzeugspezifisch variiert, was sich wiederum auf das Flugleistungsmodell (siehe Abschnitt 3.2.2) auswirkt.

Der Formationsführer muss neben dem Flug von einem Wegpunkt zum nächsten prüfen, wann der Formationsendpunkt erreicht wurde, um das Auflösen der Formation zu veranlassen und wann die optionale Rotation durchzuführen ist. Hierzu sind ebenfalls zyklische Ereignisse implementiert worden. Ein zyklisches Ereignis beendet im Falle des Formationsendes das zyklische Ereignis zum Folgen und zum Halten der Distanz zum vorausfliegenden Flugzeug.

Die Rotation wurde gemäß Algorithmus 3.4 (V-Formation und Echelon-Formation) umgesetzt und zur Evaluierung des Rotationszeitpunkts wird in Algorithmus 3.3 alle drei Sekunden dies geprüft. Der Rotationsalgorithmus ändert ausschließlich die Positionsnummern und die Namen der voraus- und dahinterfliegenden Flugzeugagenten, so dass dieses zyklische Ereignis die Flugzeugagenten in die richtige Position bewegt. Während des Rotationsmanövers wird die Luftwiderstandsreduzierung, die vom vorausfliegenden Flugzeugagenten verursacht wird, nicht berücksichtigt.

Der Rekonfigurationsalgorithmus ist ein Ereignis, das im Falle des Ausfalls eines Flugzeugagenten ausgeführt wird. Dieser wurde nach Algorithmus 2.42 (V-Formation) bzw. 2.43 (Echelon-Formation) implementiert und ändert wie bei der Rotation die Formationspositionen der voraus- und dahinterfliegenden Flugzeugagenten.

Das Flugleistungsmodell aus Abschnitt 3.2.2 wurde für alle Flugzeugagenten implementiert und nimmt für die gesamte Flugstrecke einen Horizontalflug an. Dieses zyklische Ereignis wird minutenweise ausgeführt und berücksichtigt die aktuelle Luftwiderstandsreduzierung, die durch den vorausfliegenden Flugzeugagenten verursacht wird (siehe Annahmen aus Abschnitt 3.2.1), die aktuelle Geschwindigkeit und Flughöhe. Für alle Flugzeugagenten wird die Flugleistung sowohl für den Formationsflug als auch für den Alleinflug berechnet, so dass die Kraftstoffeinsparungen im Formationsflug mittels des Ergebnisses des Alleinfluges validiert werden können.

Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulation, die durch das Flugleistungsmodells gewonnen werden, anhand verschiedener Szenarien diskutiert.

#### 4.1.4. Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulation anhand verschiedener Szenarien diskutiert. Für alle hier beschriebenen Szenarien wird der Flug von Europa nach Nordamerika und die optimale Positionierung innerhalb der Formation angenommen. Es handelt sich dabei um einen Relativvergleich, in dem für den Formationsflug und den Alleinflug der

Kraftstoffverbrauch in der Simulation berechnet wird. Es gelten für die Flugzeugagenten die angenommenen Luftwiderstandsreduzierungsdaten aus Tabelle 3.2 mit einem Mindestabstand von 1500 m. In Tabelle 4.2 werden die zugrunde gelegten Szenarien mit den zugehörigen Simulationsergebnissen dargestellt.

Tabelle 4.1 Zuordnungen für den Formationsflug

Abkürzung	Merkmale
<b>Formationsarten (F)</b>	
V	V-Formation
E <sub>r</sub>	Echelon <sub>Rechts</sub> -Formation
E <sub>l</sub>	Echelon <sub>Links</sub> -Formation
<b>Einflussmerkmale</b>	
R	Rotation
G	Formationsgröße
M	Flugzeugmix

Anhand der Zuordnungen in Tabelle 4.1 werden die unterschiedlichen Szenarien in Tabelle 4.2 definiert, die sich aus unterschiedlichen Kombinationen der Einflussmerkmale zusammensetzen. Die Formationsgröße wurde bei allen Szenarien zwischen 3 und 12 Flugzeugen variiert, dabei wurden beim Flugzeugmix die Flugzeugtypen A340-642 (A346), A380-841 (A888) und A330-301 (A333) berücksichtigt. Bei der schrittweisen Vergrößerung der Formationsgröße wurden verschiedene Missionen hinzugefügt, die immer der Reihenfolge nach eine A346, eine A888 oder eine A333 beinhalten. Ist kein Flugzeugmix vorhanden, wurde der kleinste Flugzeugtyp A333 angenommen, bei denen sich die jeweiligen Abflugmassen unter Bezug auf ihre Ziele geringfügig unterscheiden als beim Flugzeugmix. Für jeden Lauf eines Szenarios, der abhängig von der Formationsgröße durchgeführt wird, ist neben der zu berücksichtigenden Luftwiderstandsreduzierung auch der Alleinflug vorausgesetzt. So wird für jeden Flug anhand der Kraftstoffmenge am Formationstreffpunkt und am Formationsendpunkt die Ersparnis gegenüber dem Alleinflug berechnet. Für den Alleinflug wird im Gegensatz zum Formationsflug zunächst eine konstante Geschwindigkeit angenommen, da beim Formationsflug an den Wegpunkten Kurswechsel stattfinden und Geschwindigkeitserhöhungen bzw. -verringerungen nötig sind, um nach dem Manöver die Position hinter dem vorausfliegenden Flugzeug wieder einzunehmen. In Tabelle 4.2 und separat in Abbildung 4.11 werden die Mittelwerte der Kraftstoffersparnisse der verschiedenen Szenarien aufgelistet. Neben der Menge des Kraftstoffes wurde der durchschnittliche Kraftstoffpreis nach [TFI13] berechnet, der mit 0,60 €/l (Stand: 07.07.2013) angenommen wurde.



Tabelle 4.2 Versuchsmatrix für den Formationsflug (Legende siehe Tabelle 4.2)

Szenario-Nr.	Kombinationen der Einflussmerkmale				Versuchsergebnisse während des Formationsflugs (Formationsflug gegenüber dem Alleinflug)		
	F	R	G	M	Durchschnittliche Kraftstoffersparnis in Liter	Durchschnittliche Kraftstoffersparnis in Prozent	Durchschnittliche Kraftstoffersparnis in Euro
1	V	0	3-12	1	6298,73 l	11,78%	3779€
2	V	1	3-12	1	6008,78 l	9,89%	3605€
3	V	0	3-12	0	2593,37 l	6,09%	1556€
4	V	1	3-12	0	2633,31 l	5,99%	1580€
5	E <sub>r</sub>	0	3-12	1	5946,15 l	10,99%	2568€
6	E <sub>r</sub>	1	3-12	1	5728,49 l	9,95%	3437€
7	E <sub>r</sub>	0	3-12	0	2599,07 l	6,11%	1559€
8	E <sub>r</sub>	1	3-12	0	2629,12 l	5,99%	1577€
9	E <sub>l</sub>	0	3-12	1	5937,37 l	10,98%	3562€
10	E <sub>l</sub>	1	3-12	1	5735,79 l	9,96%	3441€
11	E <sub>l</sub>	0	3-12	0	2597,63 l	6,11%	1559€
12	E <sub>l</sub>	1	3-12	0	2632,35 l	6%	1579€

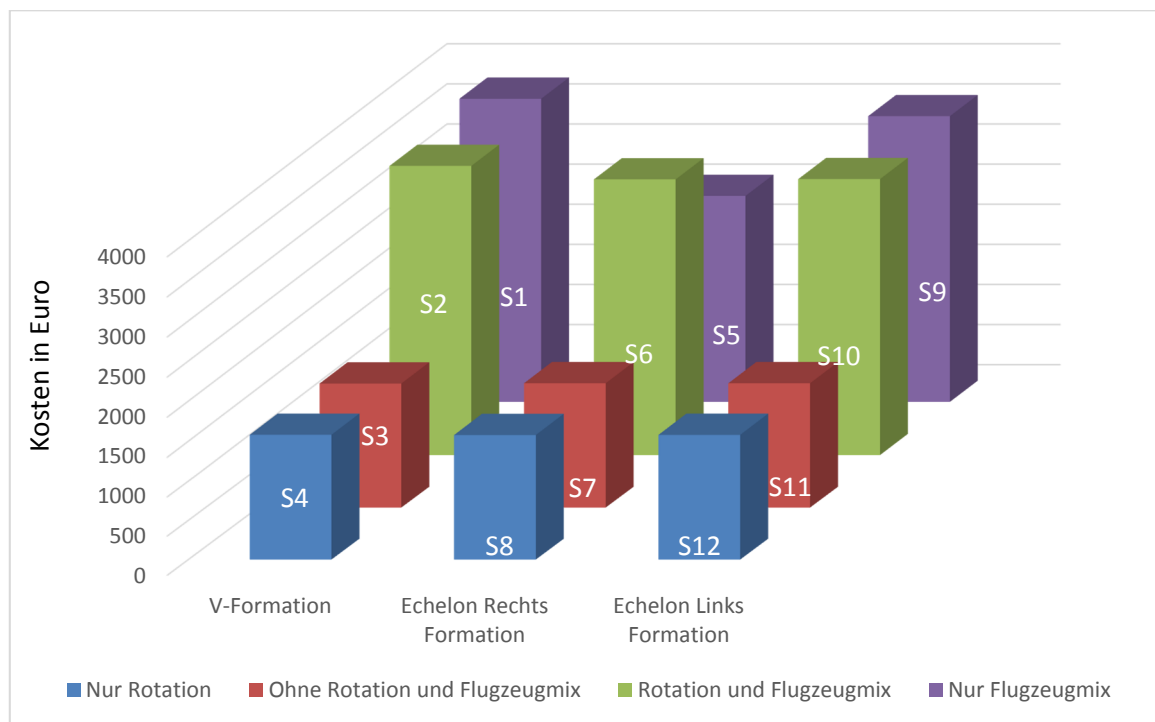


Abbildung 4.11 Kostenersparnis in der Formationsstrecke

In Abbildung 4.12 sind die Ergebnisse aus Tabelle 4.2 für den Flugzeugmix dargestellt. Alle Graphen weisen einen ähnlichen sinusförmigen Verlauf auf, was auf das Hinzufügen verschiedener Flugzeugtypen zurückzuführen ist. Die V-Formation ohne Rotation (Szenario 1 aus Tabelle 4.2) ist vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen am effizientesten. Die beiden Varianten der Echelon-Formation ohne Rotation folgen dann auf dem zweiten Platz. Bei allen Formationen sind leicht steigende lokale Maxima beim Hinzufügen der A888 bei 5,

8 und 11 Flugzeugen erkennbar, da die Treibstoffersparnis bei diesem Flugzeugtyp, das am größten ist, am höchsten ist. Dieses Ergebnis resultiert aus der getroffenen Annahme, dass ein bestimmter Flugzeugtyp immer eine bestimmte Luftwiderstandsreduzierung beim dahinterfliegenden Flugzeug verursacht und dies unabhängig vom Flugzeugtyp (siehe Abschnitt 3.2.1). Alle Rotationsvarianten haben einen nahezu gleichen Verlauf, dennoch ist mit einer Rotation (Szenarien 2, 4, 6, 8, 10 und 12 aus Tabelle 4.2) ein Verlust von knapp 2% an Kraftstoff im Vergleich zu den nicht Rotationsvarianten (Szenarien 1, 3, 5, 7, 9 und 11 aus Tabelle 4.2) erkennbar.

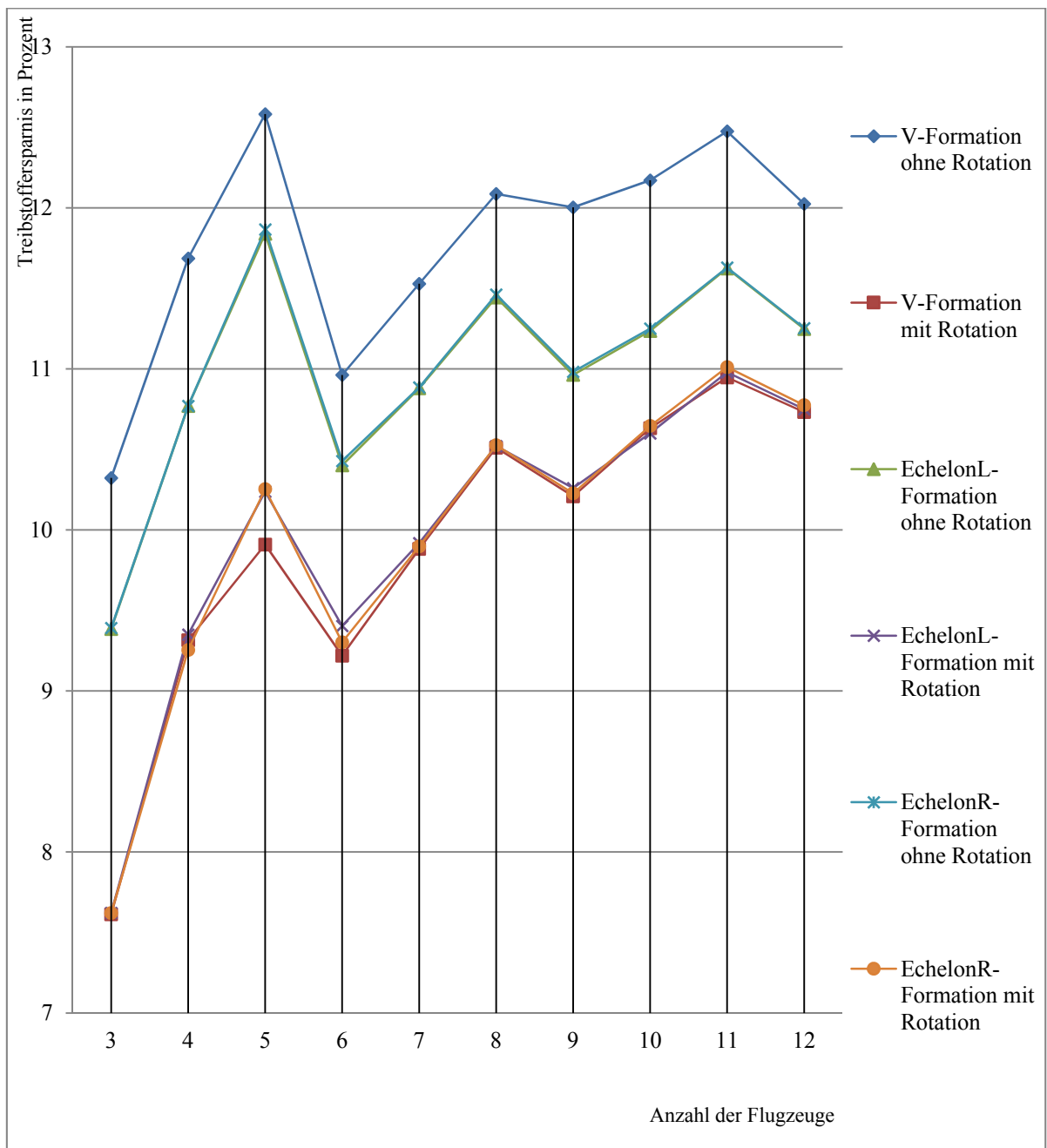


Abbildung 4.12 Treibstoffersparnis in der Formationsstrecke mit Flugzeugmix

In Abbildung 4.13 werden Szenarien ohne Flugzeugmix dargestellt. Hier ist erkennbar, dass der Verlauf ab fünf Flugzeuge monoton steigend ist.

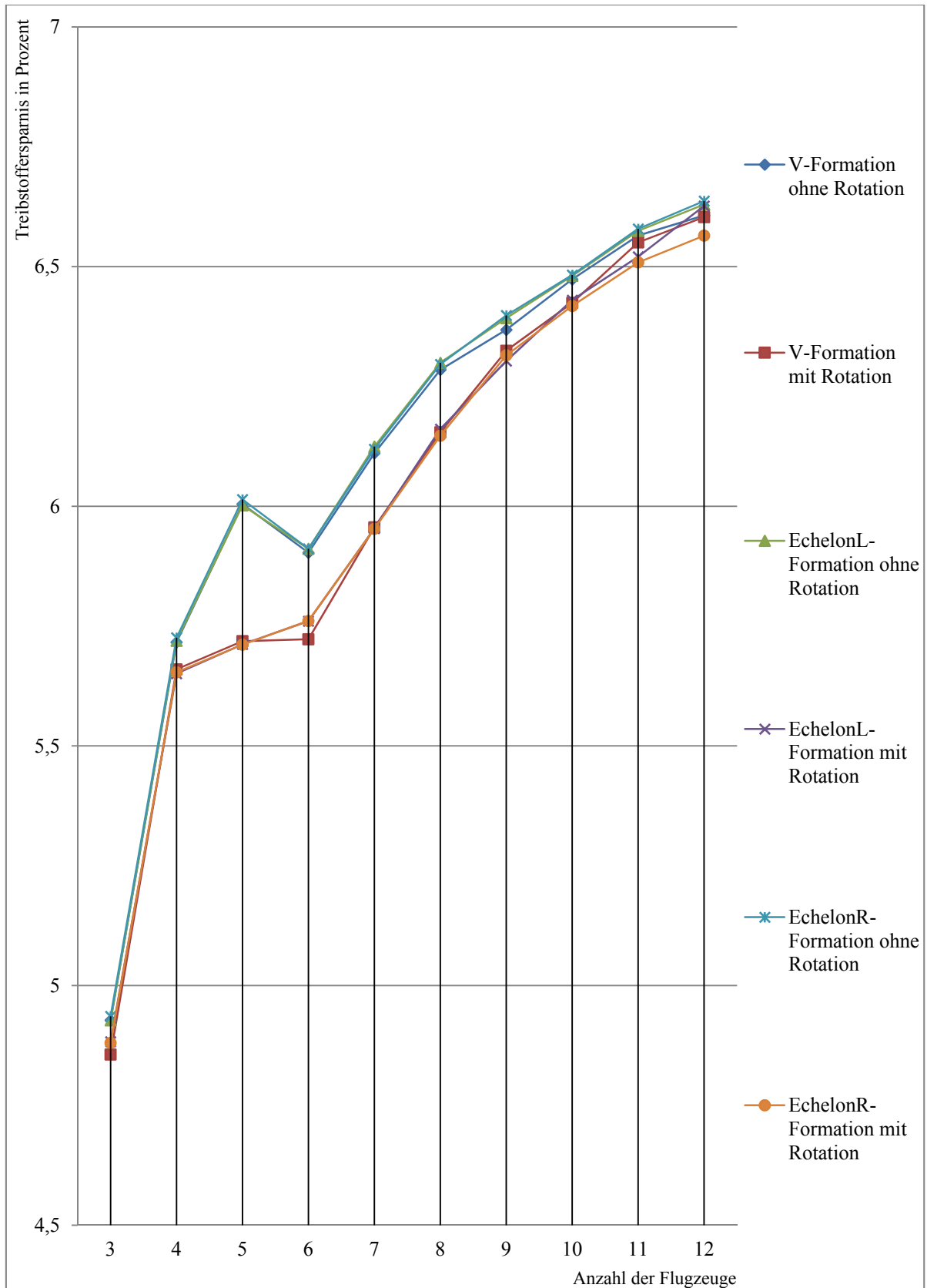


Abbildung 4.13 Treibstoffersparnis in der Formationsstrecke ohne Flugzeugmix

Nach den getroffenen Annahmen sind die Nicht-Rotationsvarianten besser als die Rotationsvarianten.

Neben den erörterten Gesamtergebnissen werden exemplarisch einige missionspezifische Ausgaben erstellt, die in den Abbildungen A.4.1 bis A.4.16 (im Anhang A.4) dargestellt sind. Alle Abbildungen entstammen den Szenarien mit einer Formationsteilnehmerzahl von 5 Flugzeugen. In allen Abbildungen wird im oberen Teil die prozentual reduzierte Luftwiderstandskraft über die Zeit und im unteren Teil der aktuelle Stand des Kraftstoffs über die Zeit im Formationsflug (rot) und im Alleinflug (blau) dargestellt. Den Abbildungen kann beim Formationsstart bzw. Formationsende ein Absenken bzw. Ansteigen der Kurve entnommen werden. Es werden die V- und Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation berücksichtigt, da bei der Szenarioanalyse keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Echelon<sub>Rechts</sub>- und der Echelon<sub>Links</sub>-Formation feststellbar waren.

Die Abbildungen A.4.1 bis A.4.8 stellen die Mission „MUCtoYYZ7290“ (Airbus A333 von München nach Toronto) unter Berücksichtigung der verschiedenen Szenarien dar (mit bzw. ohne Flugzeugmix und mit bzw. ohne Rotation). Es kann festgestellt werden, dass die V-Formation einen minimalen Vorteil gegenüber der Echelon-Formation aufweist. So sind bei der V-Formation ohne Rotation (Abbildung A.4.3) 24 l gegenüber der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation ohne Rotation (Abbildung A.4.1) eingespart worden und bei der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation mit Rotation (Abbildung A.4.2) 12 l gegenüber der V-Formation mit Rotation (Abbildung A.4.4). Diese minimale Abweichung ist bei einer Treibstoffmenge von 97530 l kaum nennenswert (0,025% bei 24 l bzw. 0,012% bei 12 l), dennoch wird gezeigt, dass der Zeitpunkt der Formationsführung eine minimale Rolle spielt. So bekommt die Mission bei der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation (Abbildung A.4.2) am Ende des Formationsflugs die Führungsrolle und bei der V-Formation (Abbildung A.4.4) nach der 2. Rotation. Dies ist vor dem Hintergrund der verschiedenen Wirbelstärken wichtig. Dieser Effekt verstärkt sich bei den Varianten ohne Flugzeugmix, da bei der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation (Abbildung A.4.6) nach der ersten Rotation die Führungsphase für diese Mission auftritt und bei der V-Formation (Abbildung A.4.8) diese nach der vierten und letzten Rotation und dabei bei der V-Formation ein minimalen Gewinn von 28 l festzustellen ist. Ohne die Rotation zeigt die V-Formation (Abbildung A.4.7) einen minimalen Gewinn von 4 l gegenüber der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation (Abbildung A.4.5).

Ähnliche Effekte können den Abbildungen A.4.9 bis A.4.12 entnommen werden, die die Mission „CDGtoBOS3478“ darstellen (Airbus A346 von Paris nach Boston). Hier sind die Unterschiede deutlicher: 1542 l spart die V-Formation ohne Rotation (Abbildung A.4.11)

gegenüber der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation ohne Rotation (Abbildung A.4.9) ein und 300 l spart die Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation mit Rotation (Abbildung A.4.10) gegenüber der V-Formation mit Rotation (Abbildung A.4.12) ein. In Abbildung A.4.12 sind die unterschiedlichen mit Rotation vorausfliegenden Flugzeuge für das schlechtere Abschneiden dieser V-Formation gegenüber der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation (Abbildung A.4.10) verantwortlich, da in Abbildung A.4.12 zunächst hinter einer A388, dann für längere Zeit hinter dem kleinsten Flugzeugtyp der A333 und nach der Übernahme der Führung erneut hinter einer A388 geflogen wird. In Abbildung A.4.12 wird dagegen einschließlich der Formationsführungsphase immer hinter einer A346 geflogen.

Bei der Mission „AMStoJFK5634“ (Airbus A380-841 von Amsterdam nach New York) werden analoge Ergebnisse sichtbar. So ist bei der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation mit Rotation in Abbildung A.4.14 eine Einsparung von 947 l gegen über der V-Formation aus Abbildung A.4.16 sichtbar. Dieser Unterschied ist auch hier auf die unterschiedlichen vorausfliegenden Flugzeuge zurückzuführen, die bei der V-Formation (Abbildung A.4.16) neben der eigenen Führungsphase zu gleichen Teilen eine A346 und eine A388 sind. Demgegenüber wird in der Mission in der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation (Abbildung A.4.16) entweder in Führung oder hinter einer A388 geflogen. Ohne Rotation zeigt sich, dass die V-Formation (Abbildung A.4.15) einen Gewinn von 141 l gegen über der Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation (Abbildung A.4.14) ausmacht.

Zusammenfassend ist bei der individuellen Betrachtung der Mission die V-Formation geringfügig besser. Dabei muss gerade mit einem Flugzeugmix die Positionierung innerhalb der Formation beachtet werden. Die V-Formation hat den wesentlichen topologischen Vorteil, dass neben dem kleineren Luftransportslot gegenüber der Echelon-Formation gerade beim Flugzeugmix und der genutzten optimalen Positionierung die Flugzeuge auf Position 2 und 3 von der Wirbelschleppe des vorausfliegenden Flugzeugs auf Position 1 profitieren (Abbildung 2.25). Dies wird auch durch die Szenarien in Tabelle 4.2 nachgewiesen. Die implementierten Algorithmen zeigen anhand der experimentellen Ergebnisse keine Schwächen auf.

Im nächsten Abschnitt wird dieses Kapitel zusammenfassend dargestellt.

## 4.2. Zusammenfassung

Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt. So konnte anhand des implementierten agentenbasierenden Prototyps der konzeptuelle Entwurf aus Kapitel 3 validiert werden.

Der Formationsflug wurde als zentrale Möglichkeit zur Abbildung von Schwarmverhalten in der Luft beschrieben (siehe Abschnitt 2.2). Das implementierte Simulationsmodell in

AnyLogic bildet den gesamten Flug vom Start bis zur Landung ab. Als Voraussetzung sind allen Missionen beim Start u.a. die Route bzw. Formationsroute, die Formationsform (z.Z. V- und Echelon-Formation), die optionale Rotation, die Formationsteilnehmer und die Positionierungsart bekannt. Vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen bezüglich der Reduzierung der Luftwiderstandskraft und des adaptierten Flugleistungsmodells wurden verschiedene Szenarien entwickelt und erste Aussagen über die Effizienz dieser verschiedenen Szenarien getroffen. Es wurde gezeigt, dass die V-Formation bei einem Flugzeugmix am effizientesten ist. Wird dagegen derselbe Flugzeugtyp verwendet und ist das Abfluggewicht gleich, sind die Abweichungen bei der prozentualen Treibstoffersparnis der verschiedenen Formationstypen geringer. Dennoch wäre die V-Formation vor dem Hintergrund des höheren Passagierdurchsatzes pro Lufttransportslot der Echelon-Formation vorzuziehen.

Zur Erhöhung der Aussagekraft des Simulationsmodells können die getroffenen Annahmen bezüglich der Reduzierung der Luftwiderstandskraft durch reale Daten aus dem Windkanal ersetzt werden, die dieser Arbeit nicht zur Verfügung standen. Hierzu müssen lediglich die Daten in der CPACS-Struktur angepasst werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1. Zusammenfassung

Schwarmverhalten kann in der Luftfahrt im operationellen Ablauf genutzt werden, um Kraftstoff und Emissionen einzusparen. Zur Modellierung dessen können agentenbasierte Modelle genutzt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, das Optimierungspotenzial von Schwarmverhalten mit Hilfe von agentenbasierter Modellierung für die Luftfahrt aufzuzeigen. Der Fokus dieser Arbeit sind die Algorithmen des Formationsflugs.

Der Formationsflug ist eine zukunftsweisende Möglichkeit, den Kraftstoffverbrauch und den Emissionsausstoß von Passagierflugzeugen zu reduzieren. Dabei wird durch das Anfliegen einer Wirbelschlepe eines vorausfliegenden Flugzeugs der Auftrieb erhöht und der Schub des entsprechenden Triebwerks bzw. der Triebwerke kann reduziert werden. Der Beitrag dieser Arbeit zu diesem Forschungsgebiet ist die konzeptuelle und prototypische Implementierung eines agentenbasierten Simulationsmodells, das als Testumgebung für solch ein Vorhaben von Flugzeugherstellern, Fluggesellschaften und der Flugsicherung genutzt werden kann. Dabei wurde der gesamte Flug von Start bis zur Landung modelliert. Es wurden formationsspezifische Algorithmen entwickelt, um Flugzeuge während des Formationsflugs entsprechende Formationen bilden zu lassen, sich auf allen Positionen optional abzuwechseln und bei einem seltenen Ausfall neu auszurichten. Der entwickelte Prototyp in AnyLogic bildet die V- und Echelon-Formation ab, dabei mussten zusätzlich Algorithmen entwickelt werden, um diese Formationen während des Fluges zu halten. Es wurden Annahmen bezüglich der Reduzierung der Luftwiderstandskraft getroffen, die sich an den Arbeiten von Beukenberg und Pahle et al. aus gerichtet haben. Diese und weitere flugzeug-, missions- und formationsspezifische Input-Parameter werden in der XML-basierenden CPACS-Struktur an das Simulationsmodell übergeben und sind austauschbar. Zur Untersuchung der Formationen wurde ein Flugleistungsmodell implementiert, das für jeden Flugzeugagenten auf der gesamten Flugstrecke ausgeführt wird. Darauf aufbauend wurden verschiedene Szenarien entwickelt und untersucht. Für homogene Formationen sind die beiden implementierten Formationstypen in ihrer Effizienz beinahe identisch, da neben denselben Flugzeugtypen dasselbe Abfluggewicht (MTOW) angenommen wurde. Bei inhomogenen Formationen, in denen eine optimale Positionierung genutzt wurde, indem nach der ICAO-Klassifizierung oder nach ihrem MTOW größere bzw. schwerere Flugzeuge weiter vorne platziert wurden, ist die V-Formation am effektivsten mit einem Kraftstoffersparnis von durchschnittlich ca. 8217 l pro Flugzeug und zugrunde gelegter Strecke (Nordatlantikroute). Die optionale Rotation hat

bei inhomogenen Formationen einen Nachteil von ca. 700 l pro Flugzeug und zugrunde gelegter Strecke (Nordatlantikroute).

Im folgenden Abschnitt werden Möglichkeiten aufgezeigt, um an diese Arbeit anzuknüpfen.

## 5.2. Ausblick

Zur Erweiterung des Prototyps können weitere Formationstypen wie die umgekehrte V-, Rauten- und Delta-Formation implementiert und ausgewertet werden.

Das implementierte Flugleistungsmodell wurde in dieser Arbeit zweckdienlich entwickelt und entspricht nicht der vollständigen Realität. Anhand des Relativvergleichs von Allein- und Formationsflug konnte eine Aussage über das entwickelte Modell und dessen Algorithmen getroffen werden. Zur Präzisierung wären die Abbildung aller Flugphasen (Start, Steigflug, Reiseflug, Sinkflug, Anflug) und die Auswahl verschiedener Flugmodelle wie „step climb“ oder „continuous climb“ denkbar. Dabei müssten die Flugzeugagenten wegpunktweise die Flughöhe und den Querneigungswinkel mit übergeben, um den Steig- und Sinkflug realistisch zu modellieren. Analog müsste das Flugleistungsmodell für diese Phasen erweitert werden. Unter diesen Voraussetzungen kann dann die tatsächliche Ersparnis berechnet werden und Aussagen über die Kraftstoffplanung gemacht werden, was nicht der Fokus dieser Arbeit war. Zu untersuchen sind die getroffenen Annahmen zur Luftwiderstandsreduzierung, da mit großer Wahrscheinlichkeit die weiter hinten in der Formation fliegenden Flugzeuge nicht nur von der Wirbelschlepe des vorausfliegenden Flugzeugs beeinflusst werden. So kann erwartet werden, dass die Kurven in den Abbildungen 4.12 und 4.13 durch die Erhöhung der Anzahl der Flugzeuge dann deutlich steiler ansteigen. Es wäre auch möglich die Wirbelschlepe jedes Flugzeugs als selbstständigen Agenten zu implementieren, die entsprechend durch Seitenwinde beeinflusst werden. Dadurch könnte auch der Einfluss auf weiter hinten fliegende Flugzeugagenten einfacher gezeigt werden. Hierfür muss jedoch der Einfluss von Wirbelschleppen auf dahinterfliegende Flugzeuge weiter untersucht und modelliert werden. Hierzu sind z.B. Wirbelschleppendaten der Flugzeugbauer nötig, die zum Abschluss dieser Arbeit nicht zur Verfügung standen.

Generell könnte ein Windmodell entwickelt werden, um den realistischen Grad zu erhöhen. Das Windmodell könnte ebenfalls als autonomer Agent entworfen werden und Interdependenzen mit den Flugzeug- und den Wirbelschleppenagenten könnten dann simuliert werden.

Im Falle eines Zwischenfalls wird z.Z. der Flug lediglich gestoppt. So könnte, wie in den Abschnitten 2.2.4.6 und 3.2.3.1 beschrieben, der restliche Workflow implementiert werden.



Die aktuelle CPACS-Struktur beinhaltet eine Reihe von Daten, die durch eigene Recherchen und mit Hilfe des DLRs erfasst wurden. Es ist zur Erstellung der Missionen geplant, ein noch in Arbeit befindliches System des DLRs zu nutzen, in dem zeitlich synchronisierte Missionen zu einer Formation zusammengefasst und in die CPACS-Struktur geschrieben werden. Vor diesem Hintergrund kann CPACS als Schnittstelle zum Prototyp dienen.

In Abschnitt 4.1.3 wurde verdeutlicht, dass die zu haltenden Abstände der Flugzeugagenten aufgrund des GIS Näherungswerte sind. Um diese zu verbessern, müsste jeder Formationsführer ein eigenes zweidimensionales kontinuierliches Koordinatensystem initialisieren, dessen Ursprung sich zur Flugrichtung des Formationsführers ausrichtet und auf das jeder Formationsteilnehmer zugreift. Die Formationsteilnehmer könnten sich anhand dieser Koordinaten bewegen und somit würde sich die Berechnung der aktuellen Längen- und Breitengrade erübrigen. Dieses Vorhaben lässt sich z.Z. nicht mit AnyLogic umsetzen, da in der Main-Klasse immer nur eine Umgebung hinzugefügt werden kann.

Um weitere Möglichkeiten für das Agentenverhalten aufzuzeigen, könnten wie in Abschnitt 3.2.3 beschriebene Flugzeuge spontan Formationen bilden, indem sie mit in der Nähe befindlichen Agenten kommunizieren und entsprechend ihre Routen ändern. Solch einer Simulation müssten alle vorhandenen Wegpunkte zur Verfügung gestellt werden und mit Hilfe von Algorithmen wie beispielsweise A\* oder Dijkstra könnte die Wegfindung implementiert werden. Hierbei wäre der Vorteil, dass keine zeitliche Synchronisierung nötig ist. Aber zum einen wäre die Nutzung von NATS nicht mehr gewährleistet und zum anderen wäre eventuell zu viel oder zu wenig Kraftstoff im Tank, somit müsste die ideale Kraftstoffmenge untersucht werden. Optional könnte dieses und das bereits implementierte Konzept erweitert werden, so dass sich die Flugzeuge nicht an einem Treffpunkt zur Formationsbildung treffen, sondern, dass dieser Vorgang allmählich stattfindet. Wie in der Natur würde eine Formation langsam wachsen. Der wesentliche Vorteil wäre, dass die zeitliche Synchronisierung nicht mehr am Treffpunkt erfolgt und die Flugzeuge aus entsprechendem Abstand zu der anfliegenden Formation starten könnten. Für dieses Konzept müssten weitere Sicherheitsaspekte über dicht beflogene Gebiete untersucht werden.

Die Algorithmen, die in dieser Arbeit für den Formationsflug entwickelt und zum Teil in der Simulation implementiert wurden, können für entsprechende Bordcomputer adaptiert werden, um Vorgänge wie die Formationsbildung, das Halten einer Position zum vorausfliegenden Flugzeug, die Rotation und die Rekonfiguration in einer realen Situation zu testen. Eine Aufgabe für zukünftige Arbeiten wäre der Entwurf solch eines Systems analog zum

eingestellten AFF-Projekt [RAY02], das verteilt den Autopiloten anweist, das Flugzeug in eine Position zu einem bestimmten Flugzeug zu bewegen.

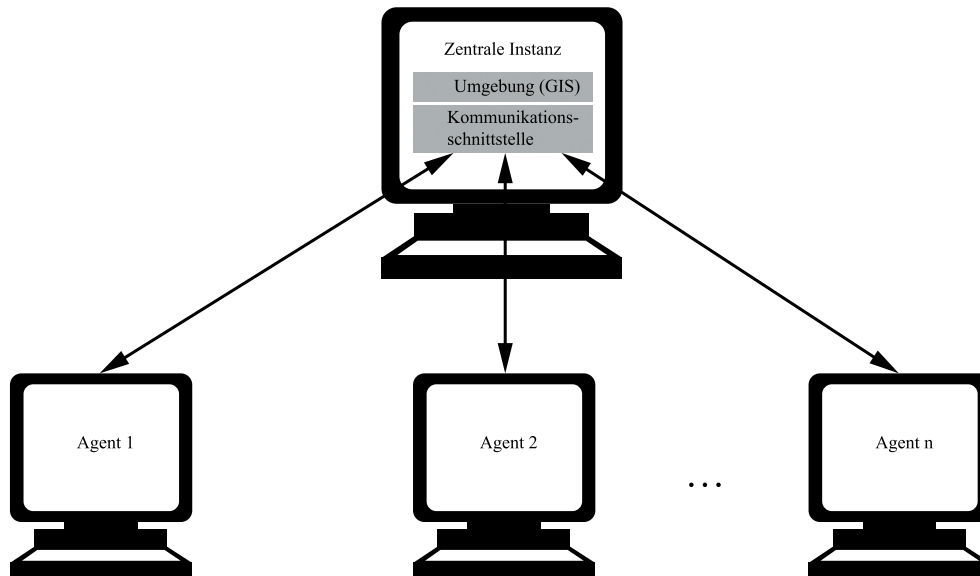


Abbildung 5.1 Verteilte Strukturierung der Simulation

In einem weiteren Simulationsentwurf wäre eine verteilte Implementierung der Simulation denkbar (siehe Abbildung 5.1). So wäre eine zentrale Instanz für die Umgebung zuständig und die verschiedenen Agenten würden über eine Schnittstelle miteinander kommunizieren. Mit Hilfe dieser verteilten Strukturierung könnten innerhalb einer Simulation verschiedene drahtlose Kommunikationsmöglichkeiten evaluiert werden.

## LITERATUR

- [ABS13a] Airbus. A340-600. 2013; Verfügbar in: [http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a340family/a340-600/?contentId=\[\\_TABLE%3Att\\_content%3B\\_FIELD%3Auid\]%2C&cHash=22935adf92fcbdd4ba4e1441d13383](http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a340family/a340-600/?contentId=[_TABLE%3Att_content%3B_FIELD%3Auid]%2C&cHash=22935adf92fcbdd4ba4e1441d13383).
- [ABS13b] Airbus. A330-300. 2013; Verfügbar in: [http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a330family/a330-300/?contentId=\[\\_TABLE%3Att\\_content%3B\\_FIELD%3Auid\]%2C&cHash=22935adf92fcbdd4ba4e1441d13383](http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a330family/a330-300/?contentId=[_TABLE%3Att_content%3B_FIELD%3Auid]%2C&cHash=22935adf92fcbdd4ba4e1441d13383).
- [ABS13c] Airbus. A380-800. 2013; Verfügbar in: [http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/a380-800/?contentId=\[\\_TABLE%3Att\\_content%3B\\_FIELD%3Auid\]%2C&cHash=22935adf92fcbdd4ba4e1441d13383](http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/a380-800/?contentId=[_TABLE%3Att_content%3B_FIELD%3Auid]%2C&cHash=22935adf92fcbdd4ba4e1441d13383).
- [ABS13d] Airbus. Express skyways. 2013; Verfügbar in: <http://www.airbus.com/innovation/future-by-airbus/smarter-skies/aircraft-in-free-flight-and-formation-along-express-skyways/>.
- [ACA01] Advisory Council for Aeronautical Research in Europe. European Aeronautics: A Vision for 2020. 2001.
- [ACA10] Advisory Council for Aeronautical Research in Europe. Aeronautics and Air Transport: Beyond Vision 2020 (Towards 2050). 2010.
- [ALC05] J. Alcock. Animal Behavior, Eighth edition. . 2005. 579.
- [BAK74] G.R. Baker, S.J. Barker, K.K. Bofah, und P.G. Saffman. Laser anemometer measurements of trailing vortices in water. Journal of Fluid Mechanics, 1974. 65(02): p. 325-336.
- [BAT00] G.K. Batchelor. An Introduction to Fluid Dynamics. 2000, Cambridge University Press.
- [BEN93] G. Beni und J. Wang. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems - Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?, P. Dario, G. Sandini, und P. Aebischer, Editors. 1993, Springer Berlin Heidelberg. p. 703-712.
- [BEU86] M. Beukenberg und D. Hummel. Flugversuche zur Messung der Leistungsparsnis im Verbandsflug. Jb. dt. Ges. Luft- und Raumfahrt 1986, 1986. 1: p. 133-145.
- [BEU90] M. Beukenberg und D. Hummel. Aerodynamics, performance and control of airplanes in formation flight. in 17th ICAS Congress. 1990. p. 1777–1794.
- [BLA10] C. Blank, C. Gertz, und S. Löwa. Domestic German Air - Rail competition depends on the efficiency of local urban transport systems. in ATRS Air Transport Research Society, 14th World Conference 2010. 2010 Porto.
- [CAM01] S. Camazine, J. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz, und E. Bonabeau. Self-Organization in Biological Systems. 2001, Princeton University Press. 538.
- [CAS06] C. Castle und A. Crooks. Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations. CASA Working Paper 110, 2006.

- [CUT94] C. Cutts and J. Speakman. ENERGY SAVINGS IN FORMATION FLIGHT OF PINK-FOOTED GEESE. *Journal of Experimental Biology*, 1994. 189(1): p. 251-61.
- [DAE11] G. Daeninck. Wakes shortly after rollip. 2011: Université catholique de Louvain.
- [DLR12] DLR. CPACS – A Common Language for Aircraft Design. 2012; Verfügbar in: <http://software.dlr.de/p/cpacs/home/>.
- [EUC11] European Commission. Flightpath 2050: Europe's Vision for Aviation, in Report of the High Level Group on Aviation Research, Publications Office of the European Union. 2011: Luxembourg.
- [EUR09] EUROCONTROL. The Base of Aircraft Data (BADA). 2012 [cited 2009; Verfügbar in: <http://www.eurocontrol.int/products/bada>.
- [EUR11] EUROCONTROL. Revising wake turbulence categories to gain capacity (RECAT). 2011; Verfügbar in: [http://www.wakenet3-europe.eu/fileadmin/user\\_upload/SpecificWorkshop\\_ConceptsCapacity/WN3E\\_Capacity\\_Workshop\\_RECANT\\_FAA\\_Lang.pdf](http://www.wakenet3-europe.eu/fileadmin/user_upload/SpecificWorkshop_ConceptsCapacity/WN3E_Capacity_Workshop_RECANT_FAA_Lang.pdf).
- [EUR12] EUROCONTROL. STATFOR - Air Traffic Statistics and Forecasts. 2012; Verfügbar in: [http://www.eurocontrol.int/statfor/public/subsite\\_homepage/homepage.html](http://www.eurocontrol.int/statfor/public/subsite_homepage/homepage.html).
- [EUR12a] Eurocontrol. BADA 3.10. 2012; Verfügbar in: <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/sesar/bada3.10-user-manual.pdf>.
- [EUR12b] EUROCONTROL. Revising wake turbulence categories to gain capacity (RECAT). 2012; Verfügbar in: [http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard\\_page/EEC\\_News\\_2008\\_3\\_RECANT.html](http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2008_3_RECANT.html).
- [FAA08] FAA. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge. 2008: Oklahoma City.
- [FAA12] FAA. Last updated North Atlantic Tracks. 2012; Verfügbar in: <https://pilotweb.nas.faa.gov/common/nat.html>.
- [FAR12] Y. Farschtschi, D.P.F. Möller und V. Gollnick. Concept of an Agent-based Framework for Modeling Civil Aircraft Swarm Behavior in Formation Flight in Summer Simulation Multiconference 2012. 2012 ACM Proceedings of Grand Challenges in M&S: Genoa. p. 24-30.
- [FAR13] Y. Farschtschi, D.P.F. Möller und V. Gollnick. Prototypical Implementation of an Agent-based Framework for Modeling Flight in Formation of Civil Aircrafts in Summer Simulation Multiconference 2013. p. 8. Im Druck.
- [FUE13] <http://fuelplanner.com>. Advanced Flight Simulation Fuel Planning. 2013 Verfügbar in: <http://fuelplanner.com/>.
- [GAL1907] F. Galton. Vox populi. *Nature*, 1907. 75: p. 450-451.
- [GAR70] M. Gardner. Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 1970: p. 120-123.
- [GNU13] GNU. GNU General Public License (GPL). 2013; Verfügbar in: <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>.

- 
- [GRA59] P.P. Grasse. La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. La theorie de la stigmergie: Essai d'interpretation des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 1959. 6: p. 41-83.
- [GRU12] Mitbetreute Seminararbeit (MMTL). M. Grube. Simulation eines Passenger-Flow in NetLogo am Beispiel des Terminal 1, Hamburger Flughafen, in AB TIS. 2012, Universität Hamburg. p. 23.
- [GRU12a] Mitbetreute Projektarbeit (EBS in MMTL). M. Grube. Agenten-basierte Simulation eines Flughafen-Terminals, in AB TIS. 2012, Universität Hamburg.
- [GUT90] H. Gutowitz. *Cellular Automata: Theory and Experiment*. 1990, The MIT Press.
- [HAR67] K.R. Hardy, J.J. Hicks, I. Katz, und C.R. Landry. Clear-air turbulence - Simultaneous observations by radar and aircraft. *SCIENCE*, 1967. 157: p. 2.
- [HAR89] W.H. Harman. TCAS: A System for Preventing Midair Collisions. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1989. 2(3): p. 437-458.
- [HEP12] A.J. Heppenstall, A.T. Crooks, L.M. See, und M. Batty. *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Vol. 1. 2012, Springer.
- [HOE07] M. Hoeing, P. Dasgupta, P. Petrov, und S. O'Hara. Auction-based multi-robot task allocation in COMSTAR. in *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. 2007 ACM: Honolulu, Hawaii. p. 1-8.
- [HOE90] B. Hoelldobler und E.O. Wilson. *The Ants*. Vol. 1. 1990, Harvard University Press: Cambridge. 746.
- [HUF70] R.M. Huffaker, A.V. Jelalian, und J.A.L. Thomson. Laser-Doppler system for detection of aircraft trailing vortices. *Proceedings of the IEEE*, 1970. 58(3): p. 322-326.
- [HUM83] D. Hummel. Aerodynamic aspects of formation flight in birds. *Journal of Theoretical Biology*, 1983. 104(3): p. 321-347.
- [HUM89] D. Hummel und M. Beukenberg. Aerodynamische Interferenzeffekte beim Formationsflug von Vögeln. *Journal of Ornithology*, 1989. 130(1): p. 15-24.
- [IAN02] B. Iannotta. Vortex Draws Flight Research Forward. 2002; Verfügbar in: <http://www1.aiaa.org/aerospace/Article.cfm?issuetocid=187&ArchiveIssueID=24>.
- [ICA09] ICAO. *North Atlantic MNPS Airspace Operations Manual Edition 2009*. 2009.
- [INFD12] InflationData. *Historical Crude Oil Prices*. 2012; Verfügbar in: [http://inflationdata.com/inflation/Inflation\\_Rate/Historical\\_Oil\\_Prices\\_Table.asp](http://inflationdata.com/inflation/Inflation_Rate/Historical_Oil_Prices_Table.asp).
- [JEN95] L.R. Jenkinson, R.E. Caves, und D.R. Rhodes. A preliminary Investigation into the Application of Formation flying to civil operation. *AIAA*, 1995. 3898.
- [KAP12] P.M. Kappeler. *Verhaltensbiologie*. Vol. 3. 2012.
- [KIR06] M. Kircher und T. Gerz. Airbus A380 Wirbelschleppen-Studie abgeschlossen – DLR-Unterstützung bei Messungen erfolgreich. 2006; Verfügbar in: [http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-4551/84\\_read-5692/](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-4551/84_read-5692/).

- 
- [KNO06] A. Knoll und J. Beck. Autonomous Decision-Making Applied onto UAV Formation Flight. 2006. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit -Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences.
- [KRA07] KrAtul. Earth Atmosphere. 2007.
- [KRA10] J. Krause, G.D. Ruxton, und S. Krause. Swarm intelligence in animals and humans. *Trends in ecology & evolution (Personal edition)*, 2010. 25(1): p. 28-34.
- [KRO10] D. Król and M. Drozdowski. Use of MaSE methodology for designing a swarm-based multi-agent system. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 2010. 21(3): p. 221-231.
- [KUC07] J.K. Kuchar und A.C. Drumm. The Traffic Alert and Collision Avoidance System. *LINCOLN LABORATORY JOURNAL*, 2007. 16(2): p. 277-296.
- [LAN60] A.H. Land und A.G. Doig. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica*, 1960. 28(3): p. 497-520.
- [LOE11] S. Löwa, C. Blank, und M. Bohnet. Evaluation von Einflussfaktoren auf die Verweildauer von Flugreisenden ab dem Hamburger Flughafen. 2011.
- [MAI12] K. Mainzer und L. Chua. *The Universe as Automaton: From Simplicity and Symmetry to Complexity*. 2012, Springer.
- [MCL05] D. McLean. Wingtip Devices: What They Do and How They Do It. in *Boeing Performance and Flight Operations Engineering Conference*. 2005 Boeing Airplane Company.
- [MGRD05] Montemanni, R. et al.: Ant Colony System for a Dynamic Vehicle Routing Problem. In *Journal of Combinatorial Optimization*, o.j., 10; S. 327–343.2005
- [MNN13] Mehta, S. et al.: Using agent-based simulation to evaluate technology and concepts for the National Airspace System. In. In *Aerospace Conference*, 2006.
- [NAN07] R.K. Nangia. Commercial Aircraft Efficiency Considerations & Meeting Environmental Challenges using Air-to-Air Refuelling & Close Formation Flying. in *7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference*. 2007 Belfast. p. 17.
- [NEU66] J. Von Neumann und A.W. Burks. *Theory of self-reproducing automata*. 1966, University of Illinois Press.
- [NIA11] M. Niazi und A. Hussain. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey. *Scientometrics*, 2011. 89(2): p. 479-499.
- [NIK09] C. Nikolai und G. Madey. Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2009. 12(2): p. 2.
- [NIK13] C. Nikolai und Wikipedia. Comparison of agent-based modeling software. 2013; Verfügbar in: [http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison\\_of\\_agent-based\\_modeling\\_software](http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software).
- [NIN10] A. Ning, T. Flanzer, and I. Kroo. Aerodynamic Performance of Extended Formation Flight. *AIAA Journal*, 2010. 48(3).
- [NOR06] M.J. North, C.N. T., und V.J. R. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 2006. 16(1): p. 1-25.

- 
- [NWA96] H.S. Nwana. Software Agents: An Overview. Knowledge Engineering Review. Cambridge University Press, 1996. 11(3): p. 205-244.
- [OCA05] J.J. O’Callaghan. Flight Control and Wake Turbulence Effects on American Airlines Flight 587. 2005, National Transportation Safety Board: Washington. p. 1.
- [OMG10] OMG. Unified Modeling Language. 2010; Verfügbar in: <http://www.uml.org/>.
- [ORA12] ORACLE. Java. 2012; Verfügbar in: <http://www.java.com/de/about/>.
- [ORA13a] Oracle. Swing Enhancements in the Java TM Standard Edition 6.0. 2013; Verfügbar in: <http://docs.oracle.com/javase/6/docs/technotes/guides/swing/6.0/index.html>.
- [ORA13b] Oracle. NetBeans IDE. 2013; Verfügbar in: <http://netbeans.org/>.
- [ORA13c] Oracle. Package org.w3c.dom 2013.
- [PAH12] J. Pahle, D. Berger, M. Venti, C. Duggan, J. Faber, und K. Cardinal. An Initial Flight Investigation of Formation Flight for Drag Reduction on the C-17 Aircraft, in AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference. 2012, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [PIL05] D. Pilone und N. Pitman. UML 2.0 in a Nutshell. 2005.
- [PRA1912] L. Prandtl. Flüssigkeitsbewegung, in Handwörterbuch der Naturwissenschaften. 1912, Gustav Fischer Verlag: Jena. p. 101-140.
- [PRI96] H.H.T. Prins. Ecology and Behaviour of the African Buffalo. Vol. 1. 1996, Chapman and Hall: London.
- [RAY02] R.J. Ray, B.R. Cobleigh, M.J. Vachon, und C.S. John. Flight Test Techniques Used to Evaluate Performance Benefits During Formation Flight. 2002, NASA Dryden Flight Research Center: Edwards, California (USA). p. 25.
- [REP13] Repast. Repast. 2013; Verfügbar in: <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/repastsg.htm>.
- [REPS13] Repast\_Simphony. Repast Simphony. 2012; Verfügbar in: <http://repast.sourceforge.net/>.
- [REX69] D.F. Rex. Climate of the Free Atmosphere. Vol. 4. 1969, Elsevier: New York. 450.
- [REY87] C.W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. SIGGRAPH Computer Graphics, 1987. 21(4): p. 25-34.
- [REY99] C.W. Reynolds. Steering Behaviors For Autonomous Characters. in Game Developers Conference 1999. 1999 Miller Freeman Game Group: San Jose, California. p. 763-782.
- [RIC91] C. Richardson und M. Schoultz. Formation flight system design concept. in Digital Avionics Systems Conference, 1991. Proceedings., IEEE/AIAA 10th. 1991. p. 18-25.
- [RIZ12] A. Rizzi, M. Zhang, B. Nagel, D. Boenke, und P. Saquet. Towards a Unified Framework using CPACS for Geometry Management in Aircraft Design. in ASM 2012. 2012 in print: Nashville.
- [RUP05] C. Rupp, J. Hahn, S. Queins, M. Jeckle, und B. Zengler. UML 2 glasklar - Praxiswissen für die UML-Modellierung und -Zertifizierung. Vol. 2. 2005.

- 
- [RUSNOR10] S.J. Russell und P. Norvig. Artificial intelligence : a modern approach. 3 ed. 2010, Pearson: Boston.
- [SAX13] saxproject. SAX. 2013; Verfügbar in: <http://www.saxproject.org/>.
- [SCH01] J.D. Schall. Neural basis of deciding, choosing and acting. *Nat Rev Neurosci*, 2001. 2(1): p. 33-42.
- [SCH13] Mitbetreute Seminararbeit (MMTL). S. Schatz. Implementierung eines einfachen Flugleistungsmodells in Java, in AB TIS. 2013, Universität Hamburg. p. 23.
- [SCHE71] T.C. Schelling. Dynamic Models of Segregation. *J. Math. Sociol.*, 1971. 1(2): p. 143--186.
- [SCHEI08] J. Scheiderer. *Angewandte Flugleistung*. Vol. 1. 2008, Springer: Köln.
- [SCHL42] H. Schlichting. Leistungersparnis im Verbandsflug. *Mitteilungen der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung*, 1942. 1: p. 97-139.
- [SCHL67] H. Schlichting und E. Truckenbrodt. *Aerodynamik des Flugzeugs: Grundlagen aus der Strömungsmechanik - Aerodynamik des Tragflügels (Teil 1)*. Vol. 2. 1967, Springer: Berlin
- [SCHL69] H. Schlichting und E. Truckenbrodt. *Aerodynamik des Flugzeugs: Aerodynamik des Tragflügels (Teil 2), des Rumpfes, der Flügel-Rumpf-Anordnung und der Leitwerke*. Vol. 2. 1969, Springer: Berlin.
- [SEE12] T.D. Seeley, P.K. Visscher, T. Schlegel, P.M. Hogan, N.R. Franks, und J.A.R. Marshall. Stop Signals Provide Cross Inhibition in Collective Decision-Making by Honeybee Swarms. *Science*, 2012. 335(6064): p. 108-111.
- [SPI06] C.R. Spitzer. *Avionics: Elements, Software and Functions*. Vol. 2. 2006, CRC PressINC. 232.
- [ST07] Seibel, F.; Thomas, C.: *Manifest Destiny: Adaptive Cargo Routing at SouthWest Airlines*, 2007.
- [SWBW13] Schaefer, L. A. et al.: *Decision Support For Advanced Aviation Concepts*. In *Simulation Conference, 2002*, 2; S. 1244–1250.
- [TFI13] theFinancials. *Jet Fuel*. 2013; Verfügbar in: <http://www.thefinancials.com/Default.aspx?SubSectionID=homesumm&ChartID=009579>.
- [TIS04] S. Tisue und U. Wilensky. NetLogo: A simple environment for modeling complexity. in *International Conference on Complex Systems*. 2004 Boston. p. 16-21.
- [TRA95] J.F.A. Traniello und S.K. Robson. Trail and territorial communication in social insects. *Chemical Ecology of Insects*, ed. W.J. Bell und R. Cardé. Vol. 2. 1995, Chapman and Hall: London. 241-286.
- [W3C13] W3C. *Extensible Markup Language (XML)*. 2013; Verfügbar in: <http://www.w3.org/XML/>.
- [W3C13a] W3C. *Document Object Model (DOM)*. 2013; Verfügbar in: <http://www.w3.org/DOM/>.
- [WEI01] H. Weimerskirch, J. Martin, Y. Clerquin, P. Alexandre, und S. Jiraskova. Energy saving in flight formation. *Nature*, 2001. 413(6857): p. 697-698.



- 
- [WIE11] K. Wieczorek. Internal Report. 2011, Bauhaus Luftfahrt - Visionary Aircraft Concepts - Aero-Thermal Elastics: Munich.
- [WIE1916] C. Wieselsberger. Beitrag zur Erklärung des Winkelfluges einiger Zugvögel. Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, 1916. 15: p. 225-229.
- [WIL88] E.O. Wilson und B. Hölldobler. Dense heterarchies and mass communication as the basis of organization in ant colonies. Trends in Ecology & Evolution, 1988. 3(3): p. 65-68.
- [WIL99] U. Wilensky. NetLogo (and NetLogo User Manual), Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. 1999; Verfügbar in: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- [WOO09] M. Wooldrige. An Introduction to MultiAgent Systems. Vol. 2. 2009, Wiley.
- [XJT13] xjTechnologies. AnyLogic. 2013; Verfügbar in: <http://www.anylogic.com/>.



## APPENDIX

### Appendix 1. Software Agent

Wooldridge beschreibt Software-Agenten als eigenständig und im Interesse des Benutzers handelnd. Darüber hinaus besteht ein Multi-Agentensystem nach Wooldridge aus mehreren Agenten [WOO09]. Software Agenten werden in verschiedenen Bereichen eingesetzt wie zur Kontrolle autonomer Fahrzeuge. So beschreiben Hoening et al. [HOE07] den Einsatz zur Kontrolle von unbemannten Luftfahrzeugen (engl. „unmanned aerial vehicle“; UAV) und der verteilten Aufgabenwahl der einzelnen Luftfahrzeuge bzw. Schwarmindividuen während eines militärischen Einsatzes. Es kann aber auch das Problem des Handlungsreisenden, wie von Król und Drozdowski beschrieben [KRO10], gelöst werden. Weitere Anwendungsgebiete sind im Bereich der dynamische Fahrzeugrouten-Führung [MGRD05], der simulative Untersuchung des Flugverkehrs bzw. Routenoptimierung im Frachtverkehr [SWBW13], [MNN13], [ST07] zu finden. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet von Software-Agenten ist die Simulation von mikroskopischen Modellen.

Es gibt verschiedene Klassifizierungsmöglichkeiten für Software-Agenten. Nach Nwana [NWA96] gibt es grundsätzlich drei verschiedene Agententypen:

- Autonome Agenten
- Lernende Agenten
- Kooperierende Agenten.

Diese Agentenattribute können, wie in Abbildung A.1.1 dargestellt, miteinander kombiniert werden. So sind nach Nwana die sogenannten „Smart Agents“ die höchste Stufe der Agentenintelligenz.

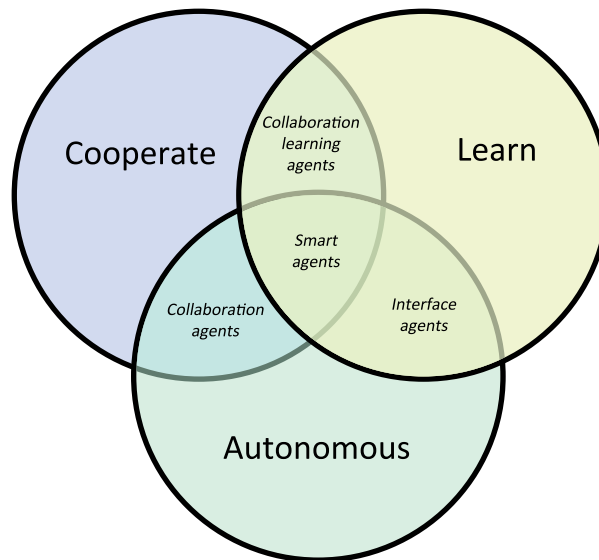


Abbildung A.1.1 Kategorien von Software-Agenten nach Nwana (vgl. Quelle: [NWA96] S.211)

Russell und Norvig beschreiben diese wie folgt:

Definition A.1.1: *Software-Agent*:

*"An agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through actuators."* (zitiert aus [RUSNOR10] S. 34)

Dabei unterscheiden Russel und Norvig verschiedene Agententypen:

1. Einfacher Reflex-Agent: Dieser handelt nach entsprechenden Regeln, dessen Bedingungen mit dem aktuellen Zustand bzw. der Wahrnehmung übereinstimmen. Diese Regeln werden für jeden Agententypen softwaretechnisch implementiert. (siehe Abbildung A.1.2)
2. Modellbasierter Reflex-Agent: Dieser kann anhand eines internen Modells den aktuellen Zustand des Merkmalraums verwalten und anschließend wie der Reflex-Agent eine Aktion wählen. (siehe Abbildung A.1.3)
3. Zielbasierter Agent: Dieser verwaltet den Zustand des Merkmalraums und eine Menge von Zielen, die zu erreichen sind. Anschließend wird die entsprechende Aktion gewählt, um die Ziele zu erreichen. Dieser Agententyp wird in der Literatur auch häufig als proaktiver Agent bezeichnet, da er aufgrund der Zielfunktion die Initiative ergreift. (siehe Abbildung A.1.4)
4. Nutzerbasierter Agent: Dieser verwendet ein Modell des Merkmalraums zusammen mit einer Nutzenfunktion, die seine Vorlieben im Hinblick auf die

verschiedenen Zustände der Welt bewertet. Anschließend wird eine entsprechende Aktion gewählt, aus der der am besten zu erwartende Nutzen zu ziehen ist. Dabei wird der Nutzen anhand des Durchschnitts aller möglichen Ergebniszustände ermittelt. Diese Ergebniszustände werden anhand der Wahrscheinlichkeit ihres Eintreffens zuvor gewichtet.

5. Lernende Agenten: Nach Russel und Norvig können alle Agententypen durch das Lernen ihre Leistung verbessern. D.h. jeder Agent kann in jedem Iterationsschritt (zeitlicher Zyklus) seine Handlung eigenständig bewerten und somit im nächsten anders handeln.

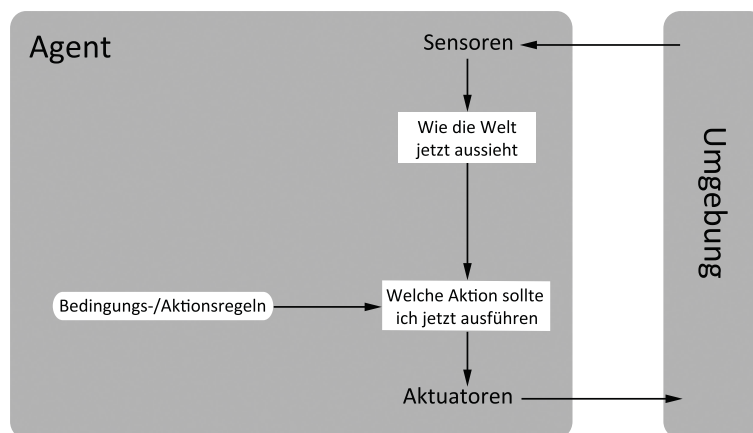


Abbildung A.1.2 Einfacher Reflex-Agent nach Russell und Norvig (vgl. [RUSNOR10] S.49)

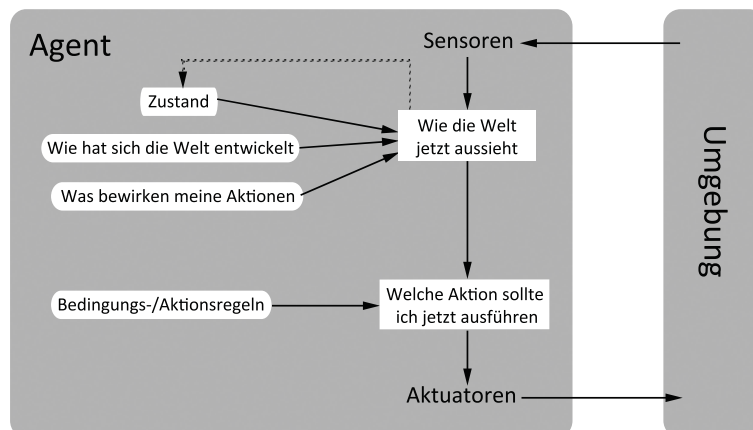


Abbildung A.1.3 Modellbasierter Reflex-Agent nach Russell und Norvig (vgl. [RUSNOR10] S. 51)

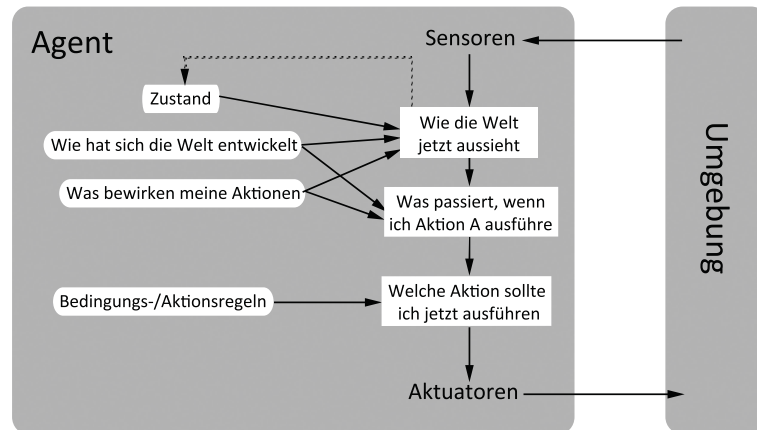


Abbildung A.1.4 Zielbasierter Agent nach Russell und Norvig (vgl. [RUSNOR10] S.52)

## Appendix 2. Klassendiagramm Flugleistungsmodell

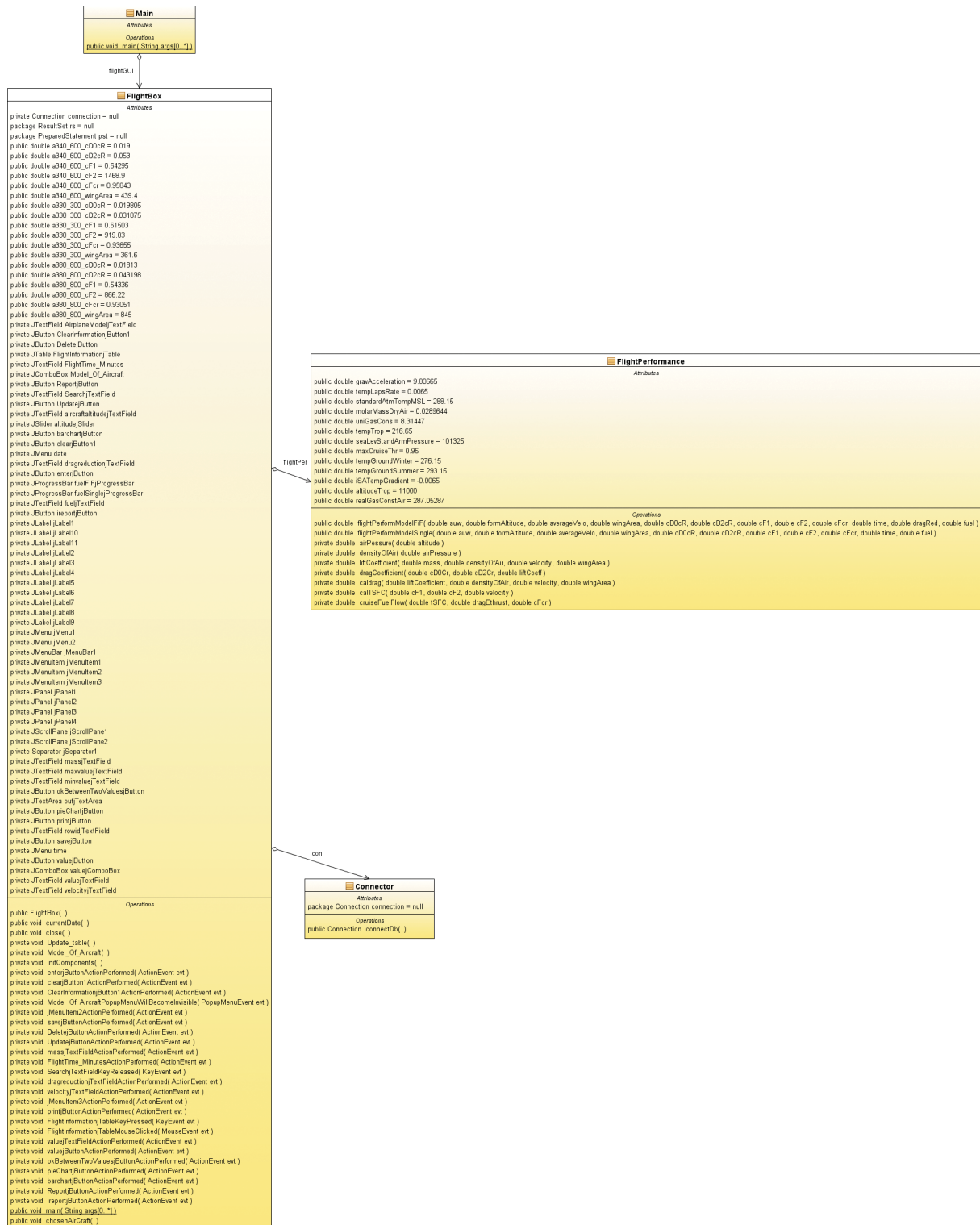


Abbildung A. 2.1 Klassendiagramm des Flugleistungsmodells

## Appendix 3. CPACS-Struktur

Tabelle A.3.1 CPACS Struktur

Name des Tags	Wert	Beschreibung
<b>cpacs</b>	<b>Beginn der Beschreibung einer CPACS Datei</b>	
header	Informationen über Ersteller, Version und Updates	
<b>vehicles</b>	<b>Beginn der Beschreibung der Beförderungsmittel</b>	
<b>aircraft</b>	<b>Beginn der Beschreibung der Flugzeugtypen</b>	
model uID="A346"	Beginn der Beschreibung des Flugzeugtyps A346 mit ID	
name	Airbus A340-642	Name des Flugzeugmodells
description	long-range four-engine wide-body commercial passenger jet airliner	Beschreibung des Flugzeugmodells
cruisingSpeed	Beginn der Beschreibung der Mindest- bzw. der Höchstgeschwindigkeit	
minSpeed unit="km/h"	861	Mindestgeschwindigkeit im Horizontalflug
maxSpeed unit="km/h"	905	Höchstgeschwindigkeit im Horizontalflug
amountOfFuel unit="liters"	195880	Maximale Kraftstoffmenge
mtow unit="kg"	368000	Maximales Abfluggewicht
<b>vortex</b>	<b>Beginn der Beschreibung der Wirbelschleppendaten</b>	
coordinates mapType="vector" unit="meter" description="x-axis/y-axis/z-axis"	4/6/1000; 4/12/1500; 4/18/1700; 2/18/1700; 4/24/2000; 2/24/2000	Wirbelschleppenkoordinaten (Annahme)
dragReduction mapType="vector" unit="factor"	0.151; 0.12; 0.091; 0.085; 0.076; 0.069	Luftwiderstandsreduzierung (Annahme)
cD0cR	0.019	Erster und zweiter spezifischer Kraftstoffverbrauchs- und Korrekturkoeffizient des Kraftstoffdurchflusses
cD2cR	0.053	
minDistance	500	Mindestdistanz, die aufgrund der Wirbelschleppe einzuhalten ist (Annahme)
wingSpan unit="m"	66	Spannweite
wingArea unit="square m"	439.4	Gesamtfläche der Tragflächen
Length unit="m"	75.3	Länge des Flugzeugs
icaoClass	3	ICAO Klassifizierung
model uID="A333"	Beginn der Beschreibung des Flugzeugtyps A333 mit ID	
model uID="A388"	Beginn der Beschreibung des Flugzeugtyps A388 mit ID	
<b>procedure</b>	<b>Beginn der Beschreibung der Prozedur</b>	
<b>formations</b>	<b>Beginn der Beschreibung der Formationen</b>	
Formation uID="EUNA1234"	Beginn der Beschreibung der Formationen EUNA1234 mit ID	
cruisingSpeed unit="km/h"	890	Geschwindigkeit der Formation
shape	V	Formationstyp (z.Z. V, Echelon <sub>R</sub> und Echelon <sub>L</sub> )
cruisingAltitude unit="m"	11000	Flughöhe der Formation



<b>rendevouzPoint</b>	Beginn der Beschreibung der Zeit am Treffpunkt und des Zeitfensters	
estimatedTime unit="date"	2012-06-11T14:40:00	Erwartete Zeit am Formationsstartpunkt
delayTime unit="min"	20	Erlaubte Verzögerung $\Delta t$
<b>participants</b>	Beginn der Beschreibung der Formationsteilnehmer	
<b>participant</b>	Beginn der Beschreibung eines Formationsteilnehmers	
name	LH4567	Formationsteilnehmer mit
mission	FRAtoEWR7896	Flugnummer und MissionsID
<b>participant</b>	Beginn der Beschreibung eines Formationsteilnehmers	
name	KL0643	Formationsteilnehmer mit
mission	AMStoJFK5634	Flugnummer und MissionsID
<b>participant</b>	Beginn der Beschreibung eines Formationsteilnehmers	
name	AC847	Formationsteilnehmer mit
mission	MUCtoYYZ7290	Flugnummer und MissionsID
<b>behaviour</b>	Beginn der Beschreibung des Verhaltens	
rotation	1	Rotation [Ja/Nein]
positioning	optimal	Positionierung [optimal nach der ICAO Klassifizierung/ nach der Ankunft am Treffpunkt]
safetyDistance unit="m"	1500	Einzuhaltender Sicherheitsabstand
<b>missions</b>	Beginn der Beschreibung der Missionen	
<b>mission uID="FRAtoEWR7896"</b>	Beginn der Beschreibung der Mission FRAtoEWR7896 mit ID	
name	LH4567	Flugnummer
description	Frankfurt to Newark	Beschreibung
aircraftType	A346	Flugzeugtyp
tot unit="date"	2012-06-11T13:30:00	Tatsächliche Abflugzeit
<b>fuelMassData</b>	Beginn der Beschreibung der Kraftstoff- bzw. Masseninformationen	
fuel unit="liters"	195000	Menge an Kraftstoff beim Abflug
auw unit="kg"	348000	Gesamtmasse beim Abflug
<b>flightPath</b>	Beginn der Beschreibung des Flugpfads	
waypoints mapType="vector"	EDDF; ESUPI; MASIR; ...	Wegpunkte nach ICAO
latitude mapType="vector"	50.033306; 50.058444; 50.254914; ...	Breitengrade der Wegpunkte
longitude mapType="vector"	8.570456; 8.121097; 7.737928; ...	Längengrade der Wegpunkte
inFormation mapType="vector"	0; 0; 0; ...	Formationsflugstatus (0: Alleinflug; 1: Formationsflug)

Appendix 4. Missionsergebnisse

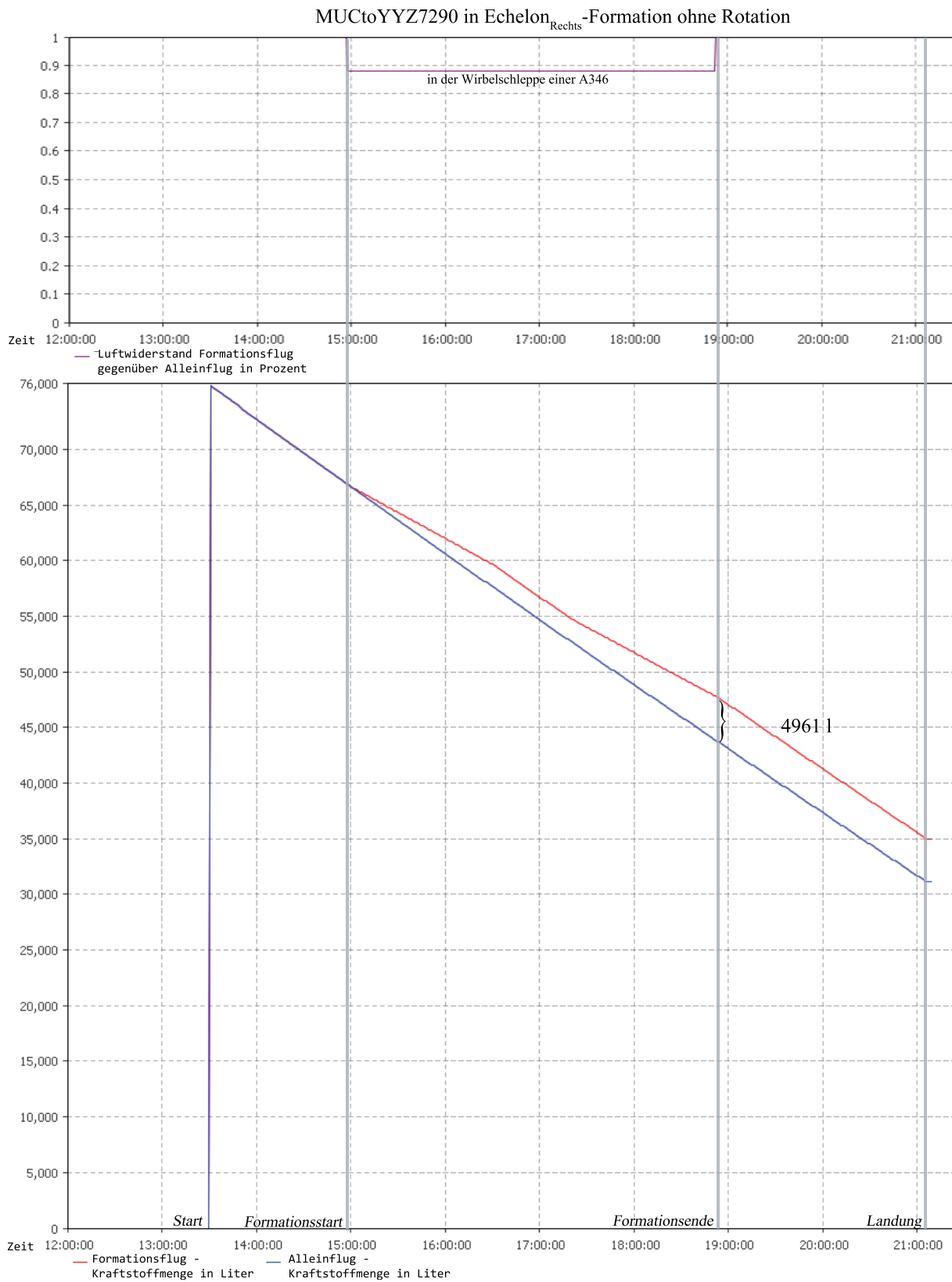


Abbildung A.4.1 Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix (A330-301)

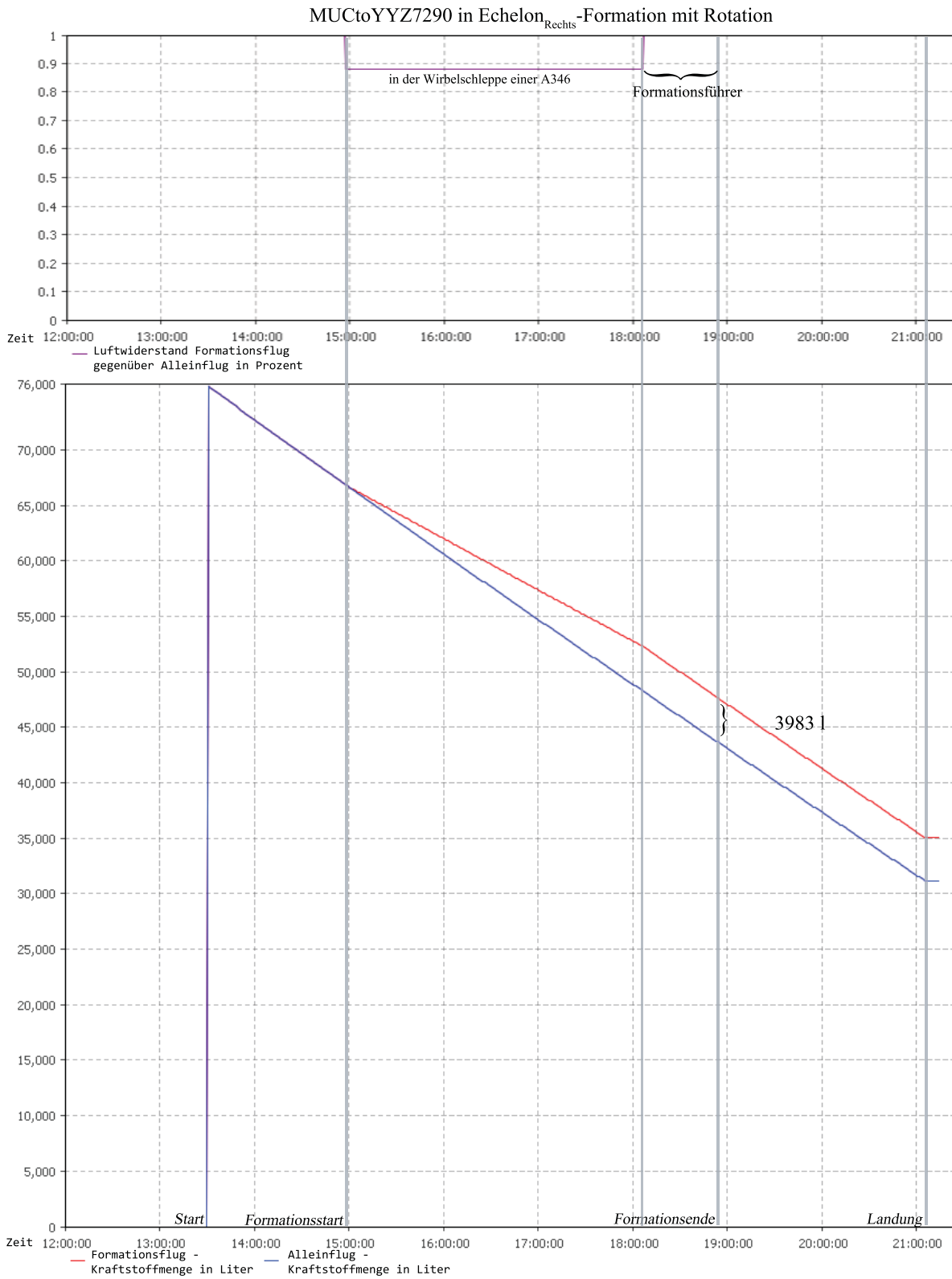


Abbildung A.4.2 Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix (A330-301)

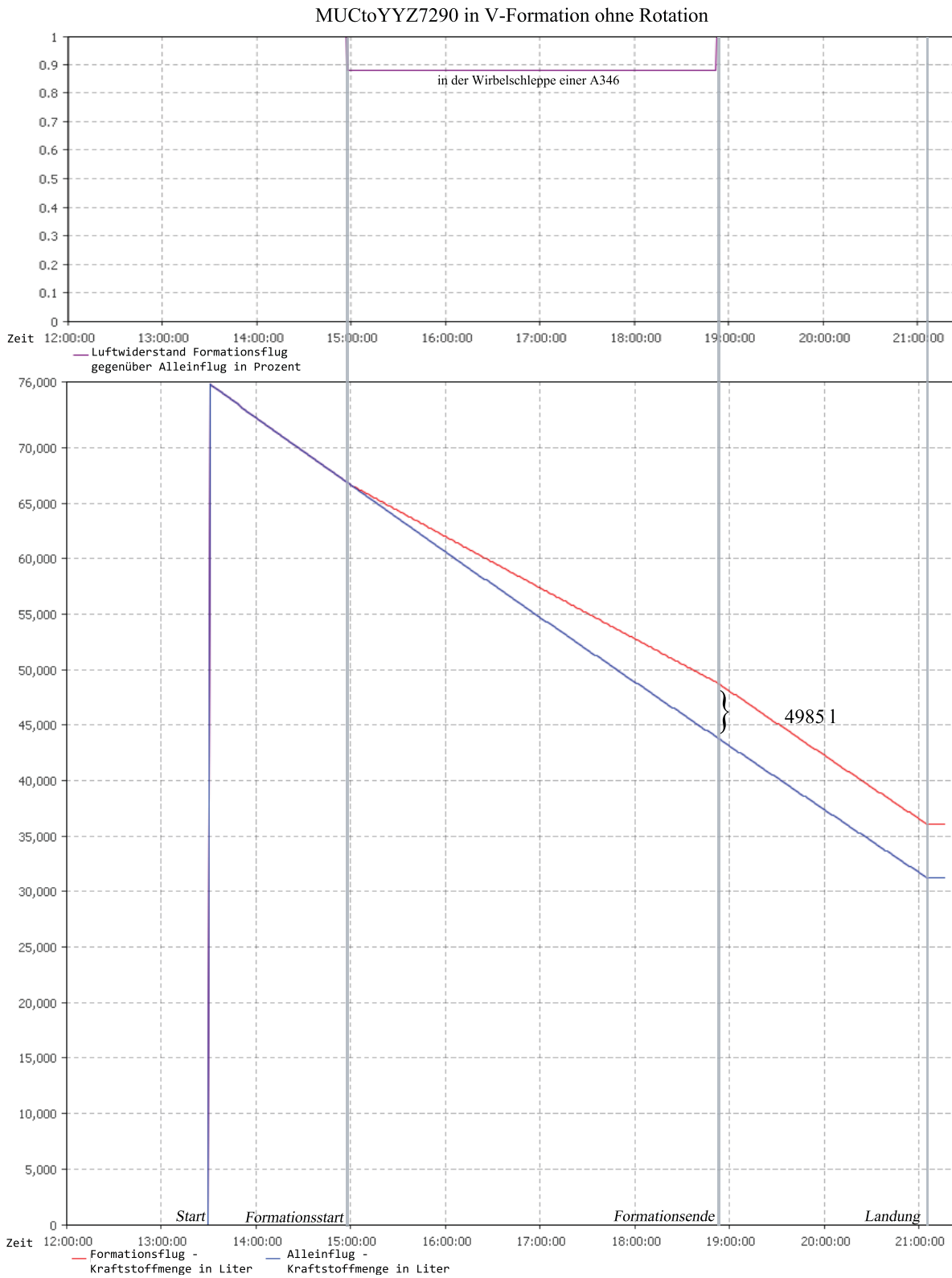


Abbildung A.4.3 Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix (A330-301)

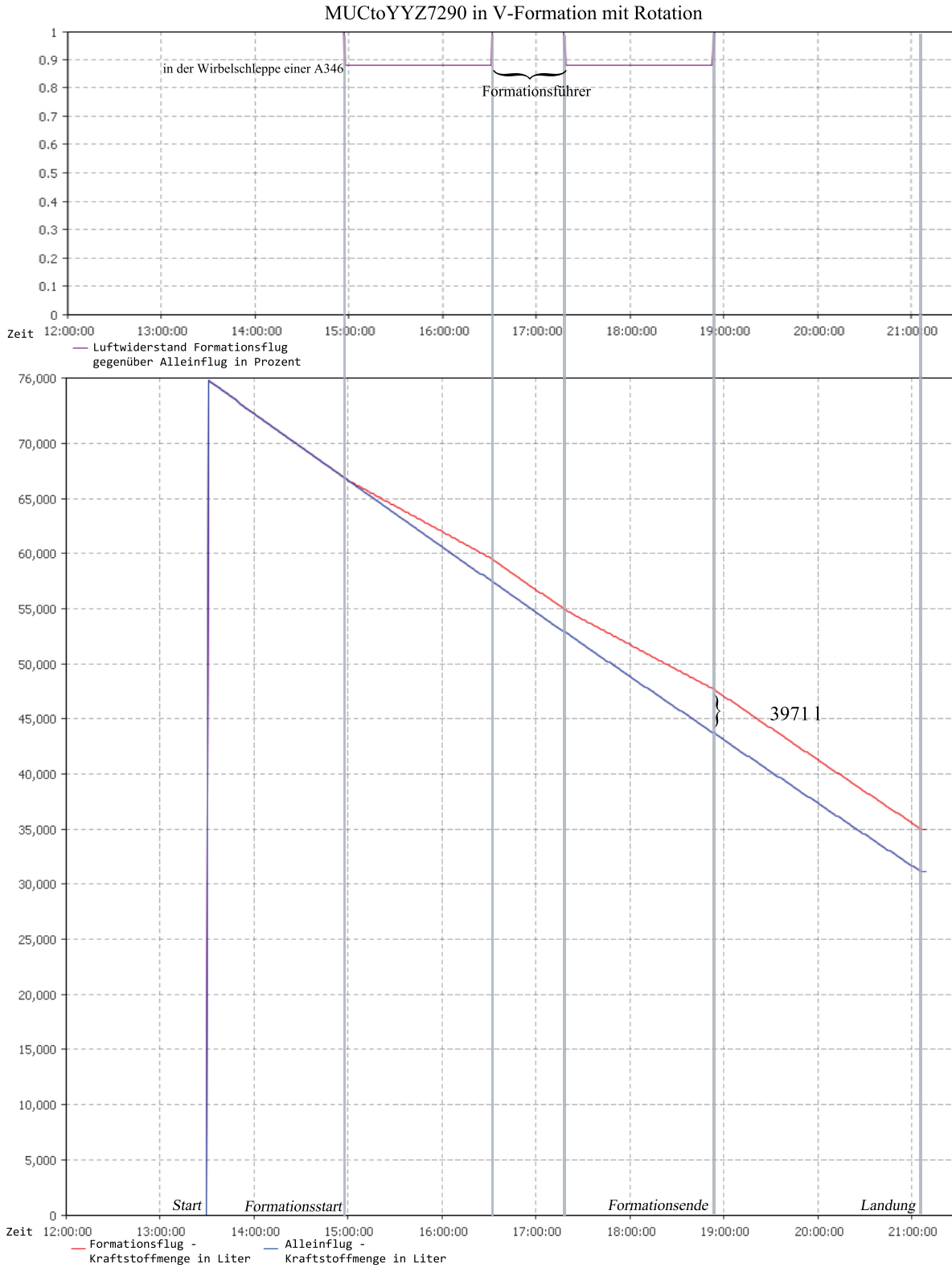


Abbildung A.4.4 Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix (A330-301)

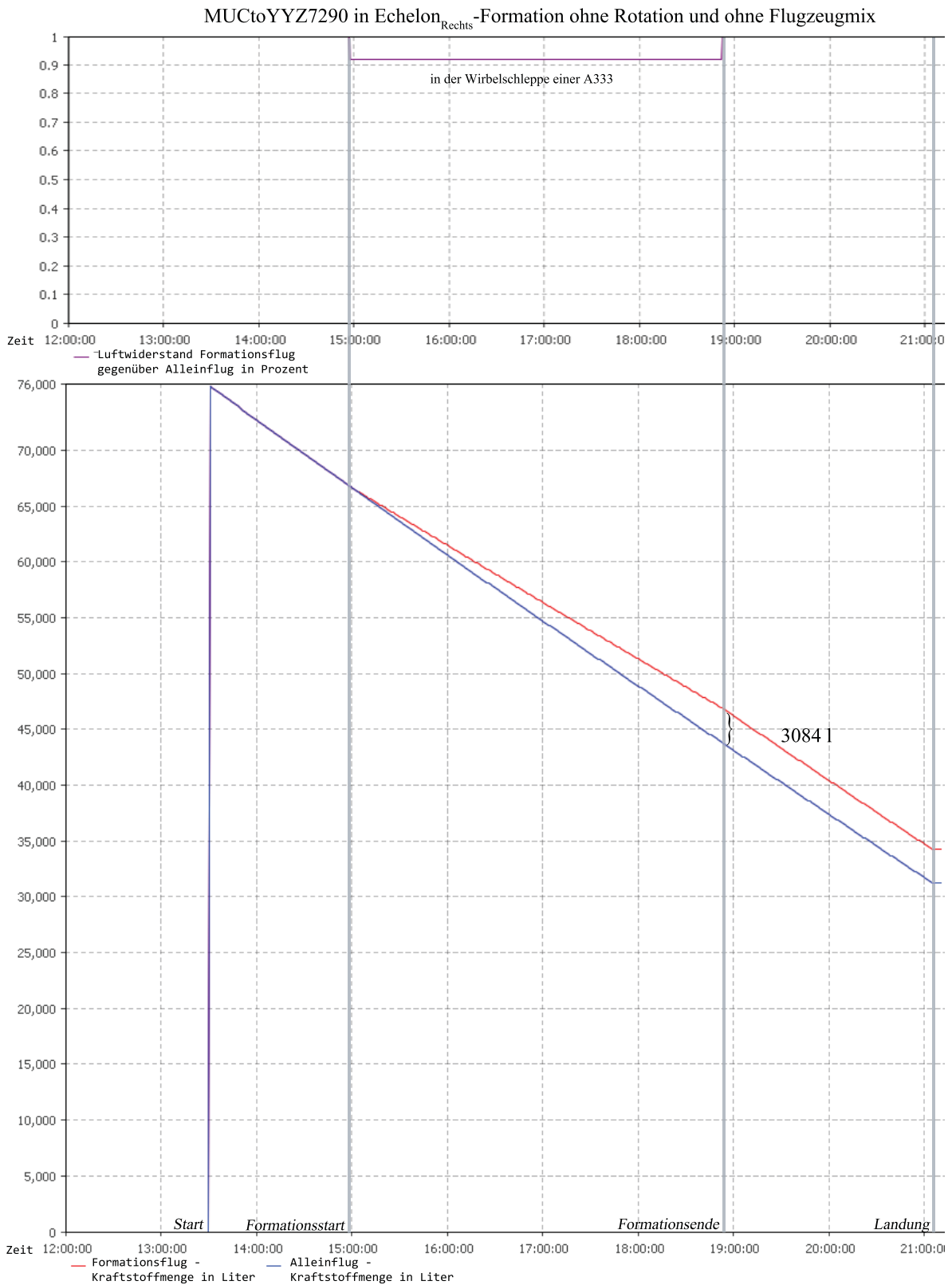


Abbildung A.4.5 Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation ohne Rotation und ohne Flugzeugmix (A330-301)

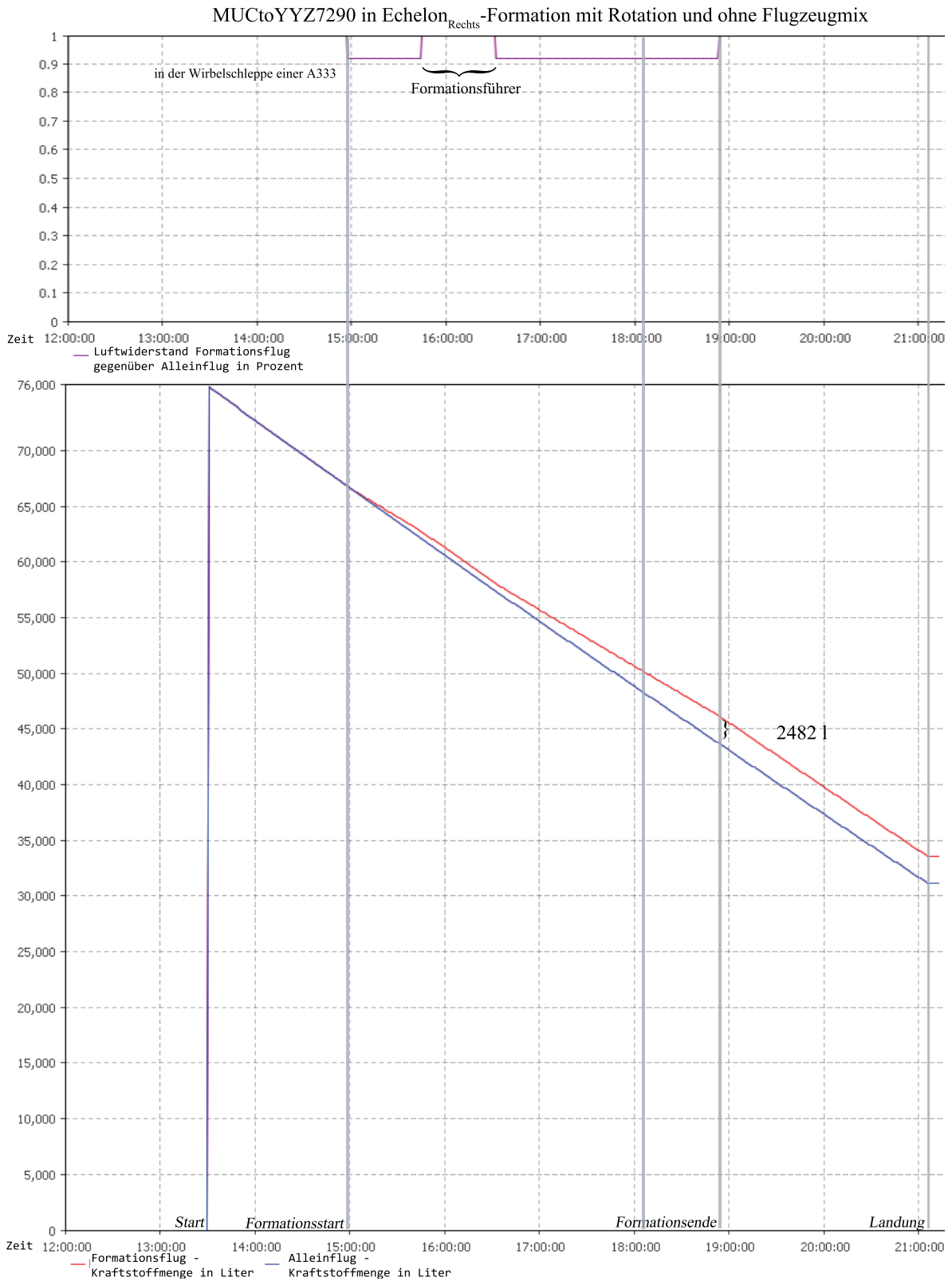


Abbildung A.4.6 Mission MUCtoYYZ7290 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation mit Rotation und ohne Flugzeugmix (A330-301)

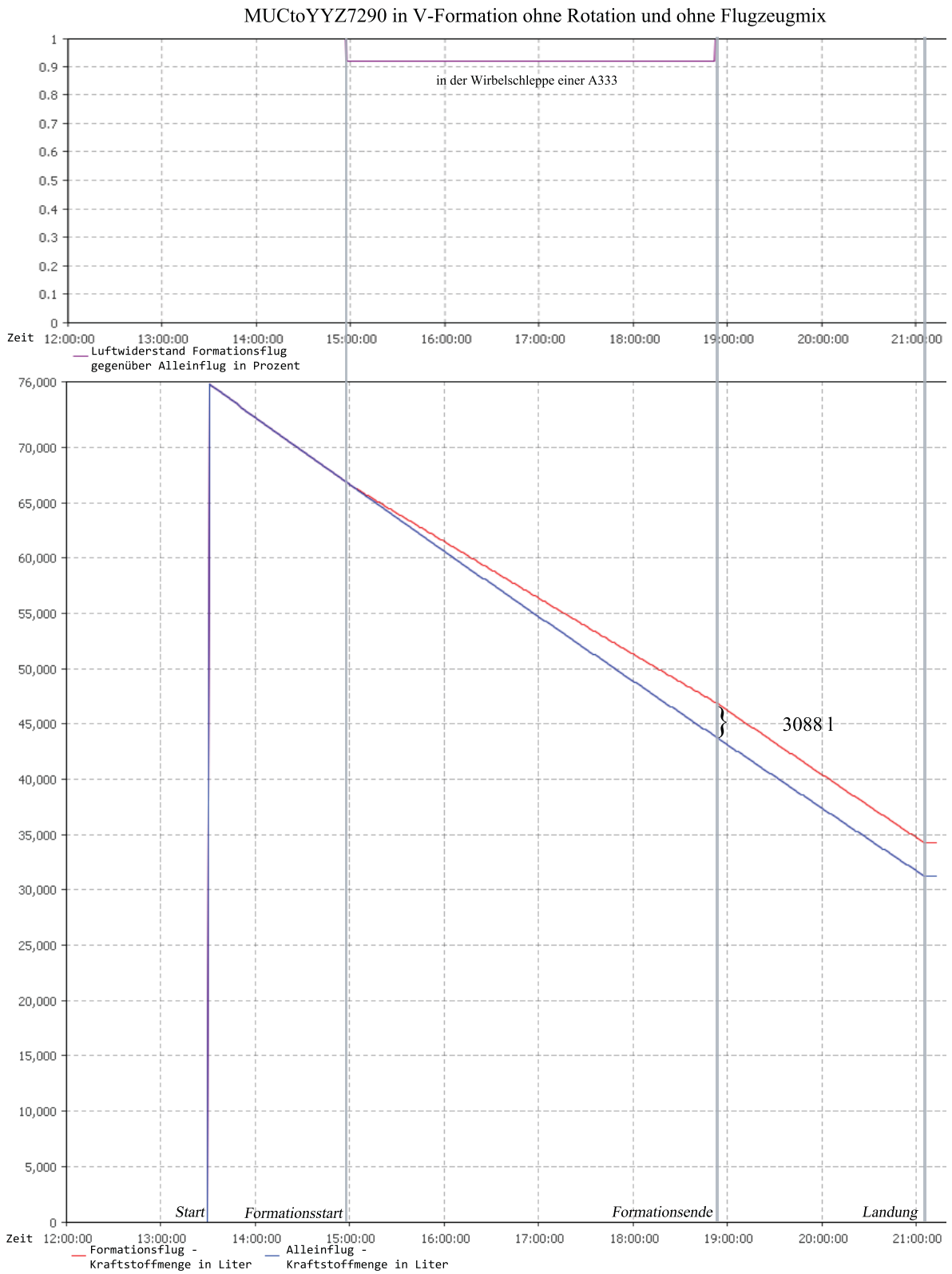


Abbildung A.4.7 Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation ohne Rotation und ohne Flugzeugmix (A330-301)



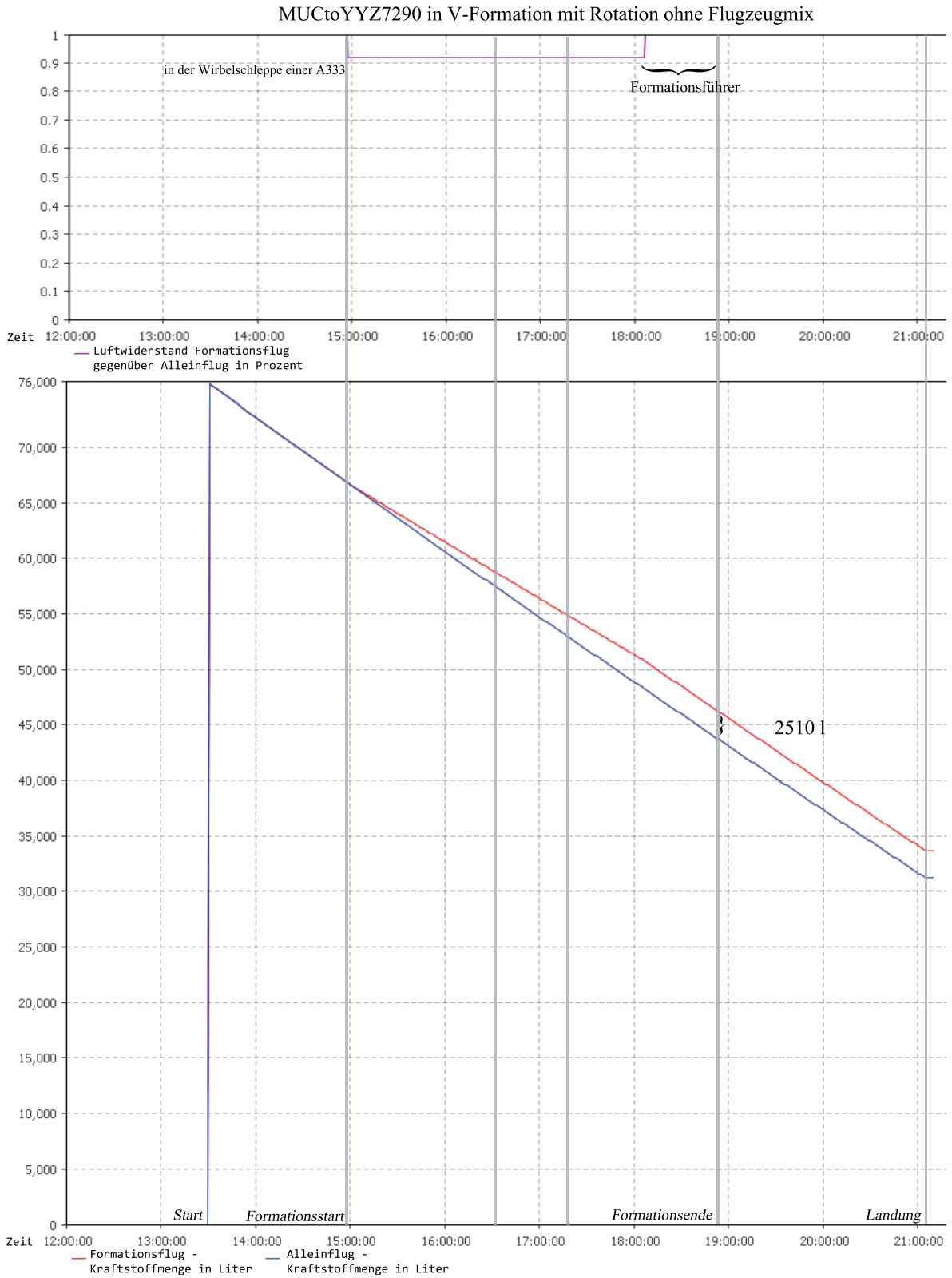


Abbildung A.4.8 Mission MUCtoYYZ7290 in V-Formation mit Rotation und ohne Flugzeugmix (A330-301)

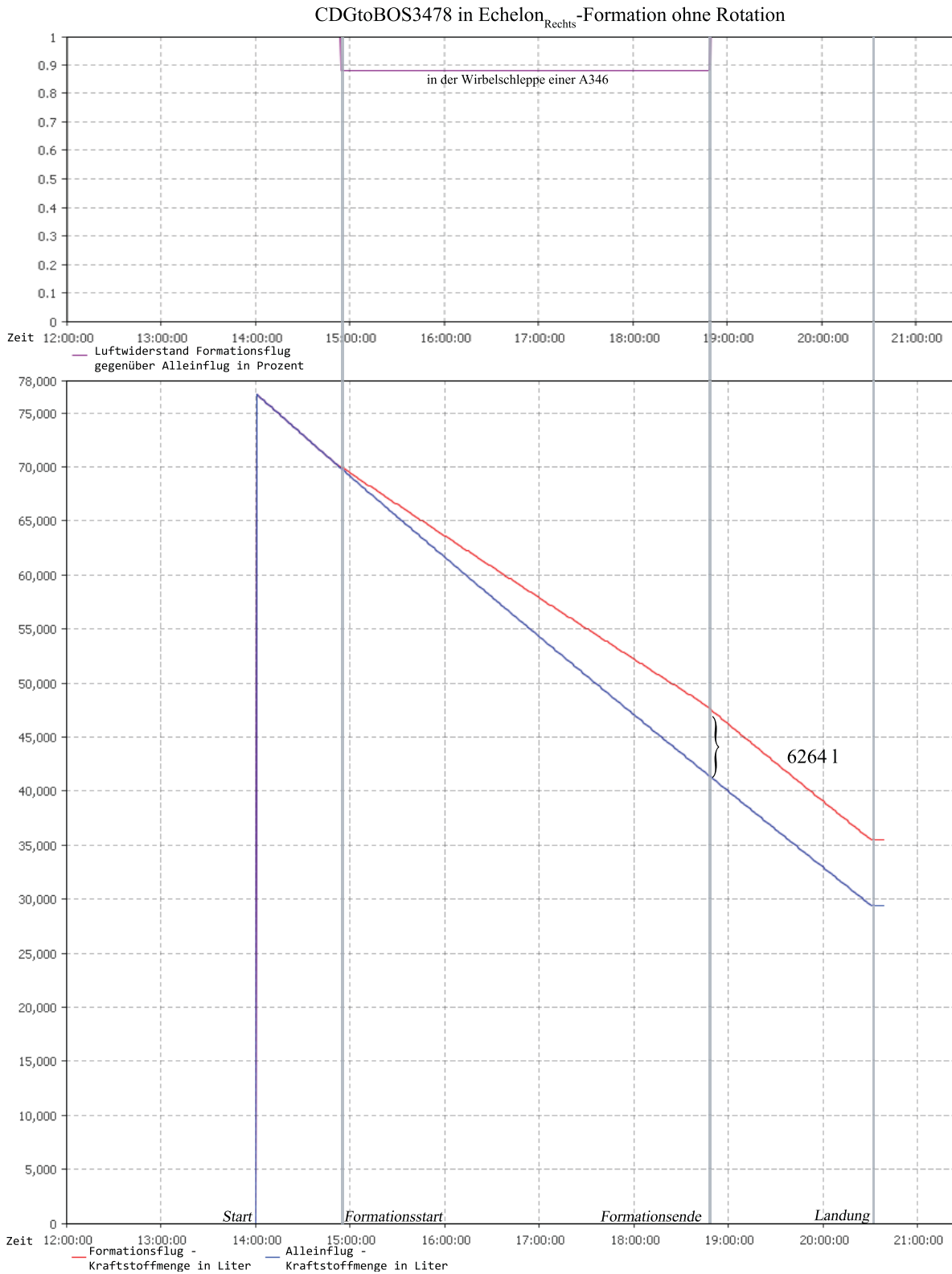


Abbildung A.4.9 Mission CDGtoBOS3478 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix (A340-642)

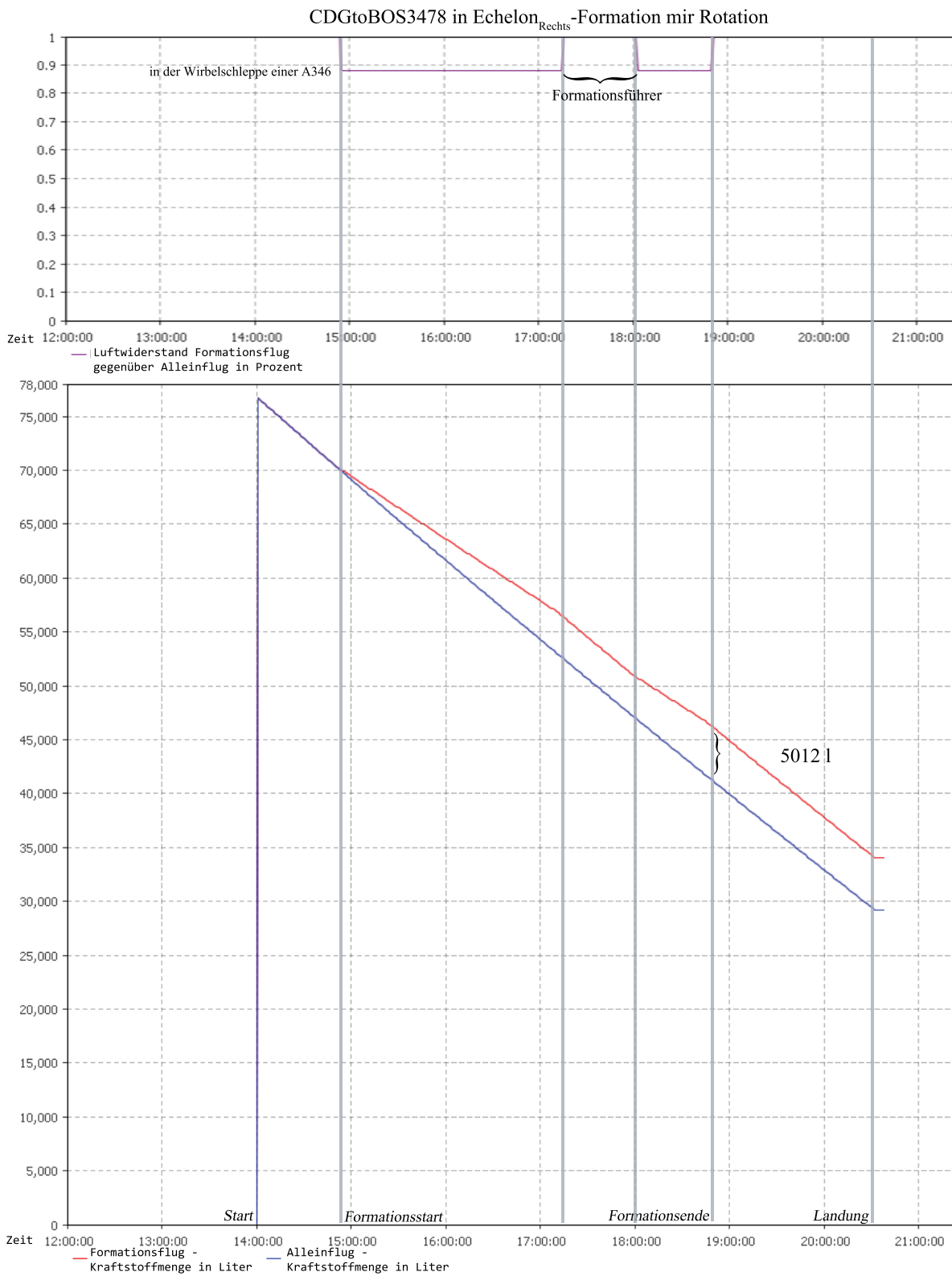


Abbildung A.4.10 Mission CDGtoBOS3478 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix (A340-642)

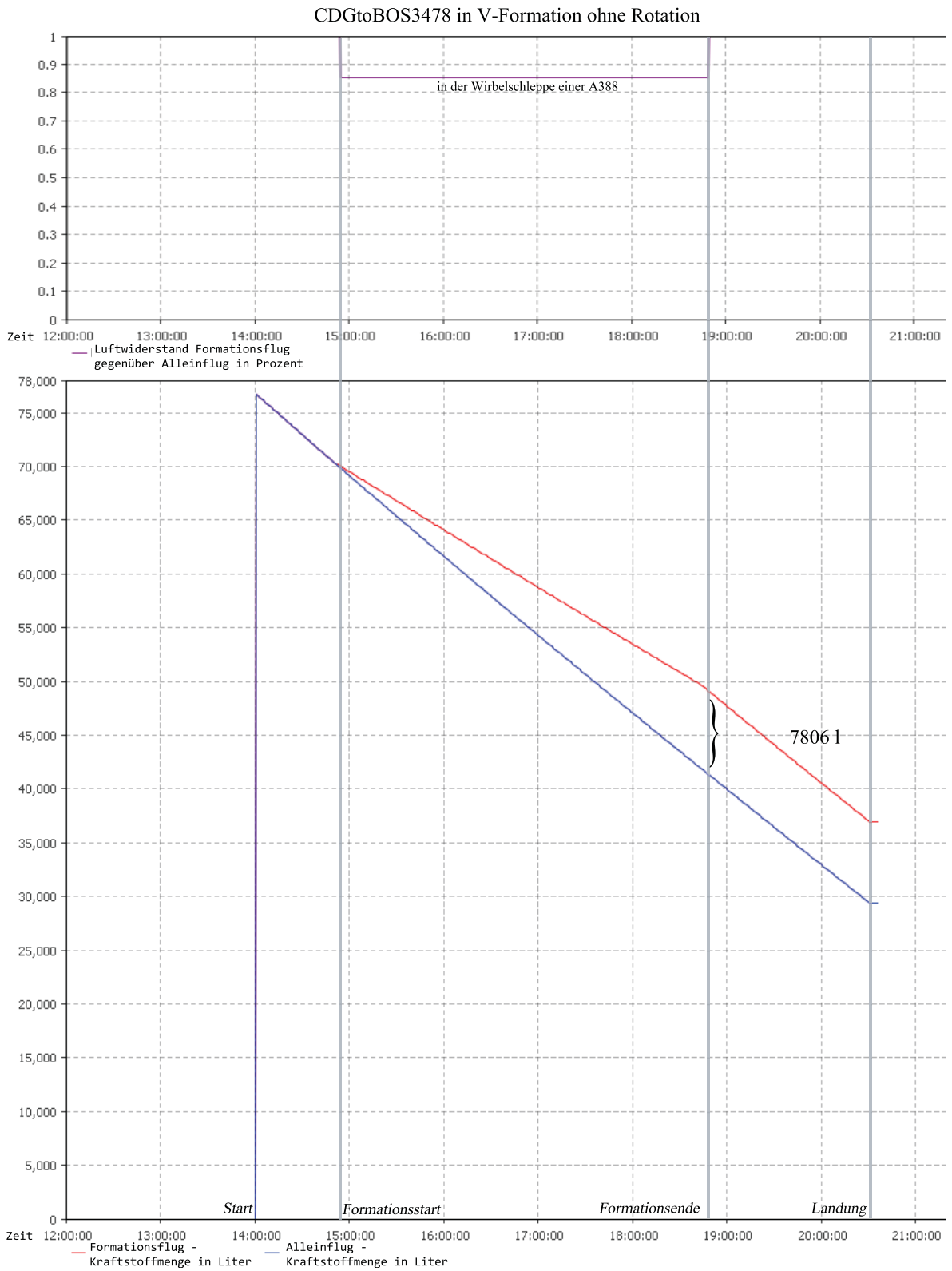


Abbildung A.4.11 Mission CDGtoBOS3478 in V-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix (A340-642)

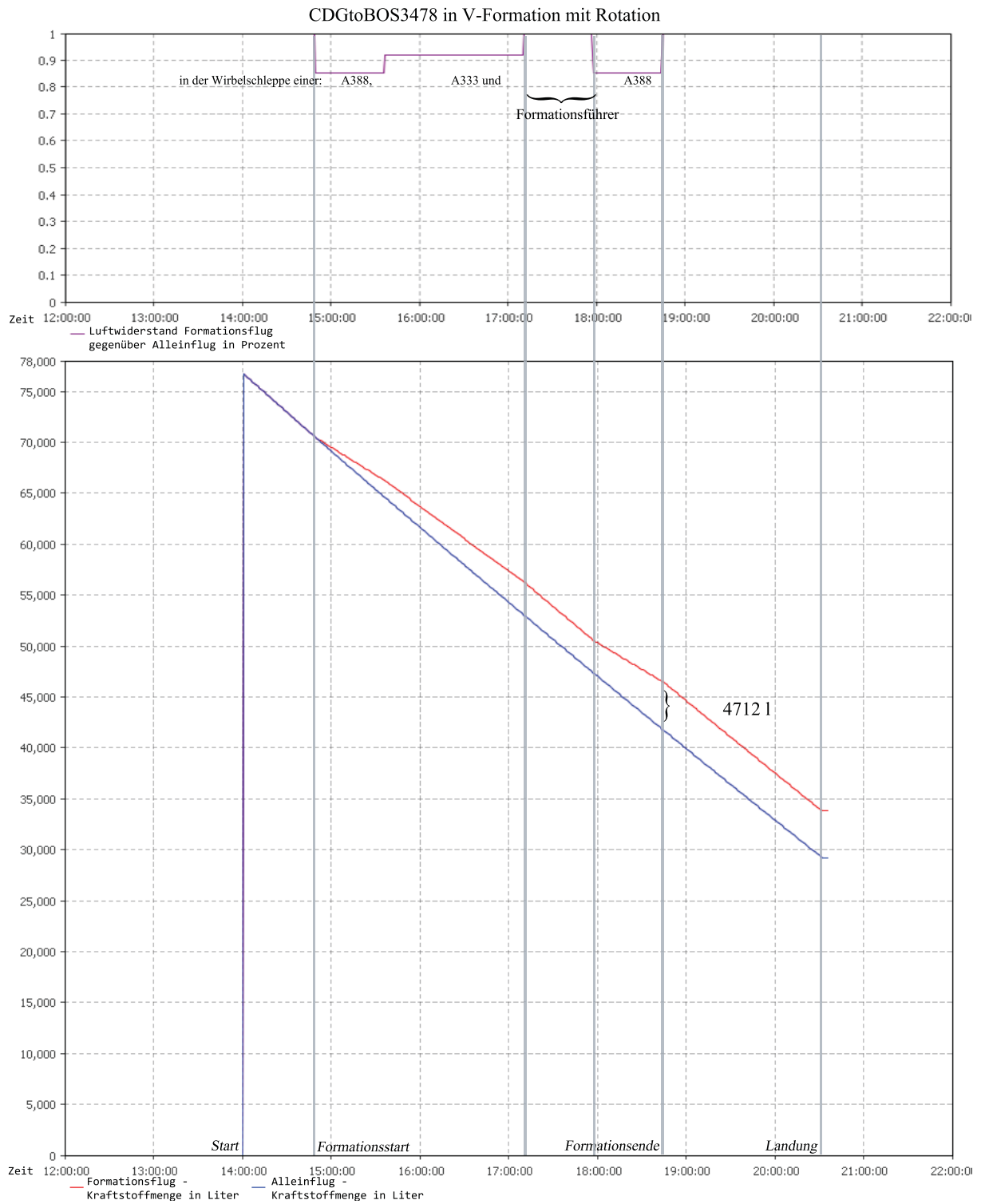


Abbildung A.4.12 Mission CDGtoBOS3478 in V-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix (A340-642)

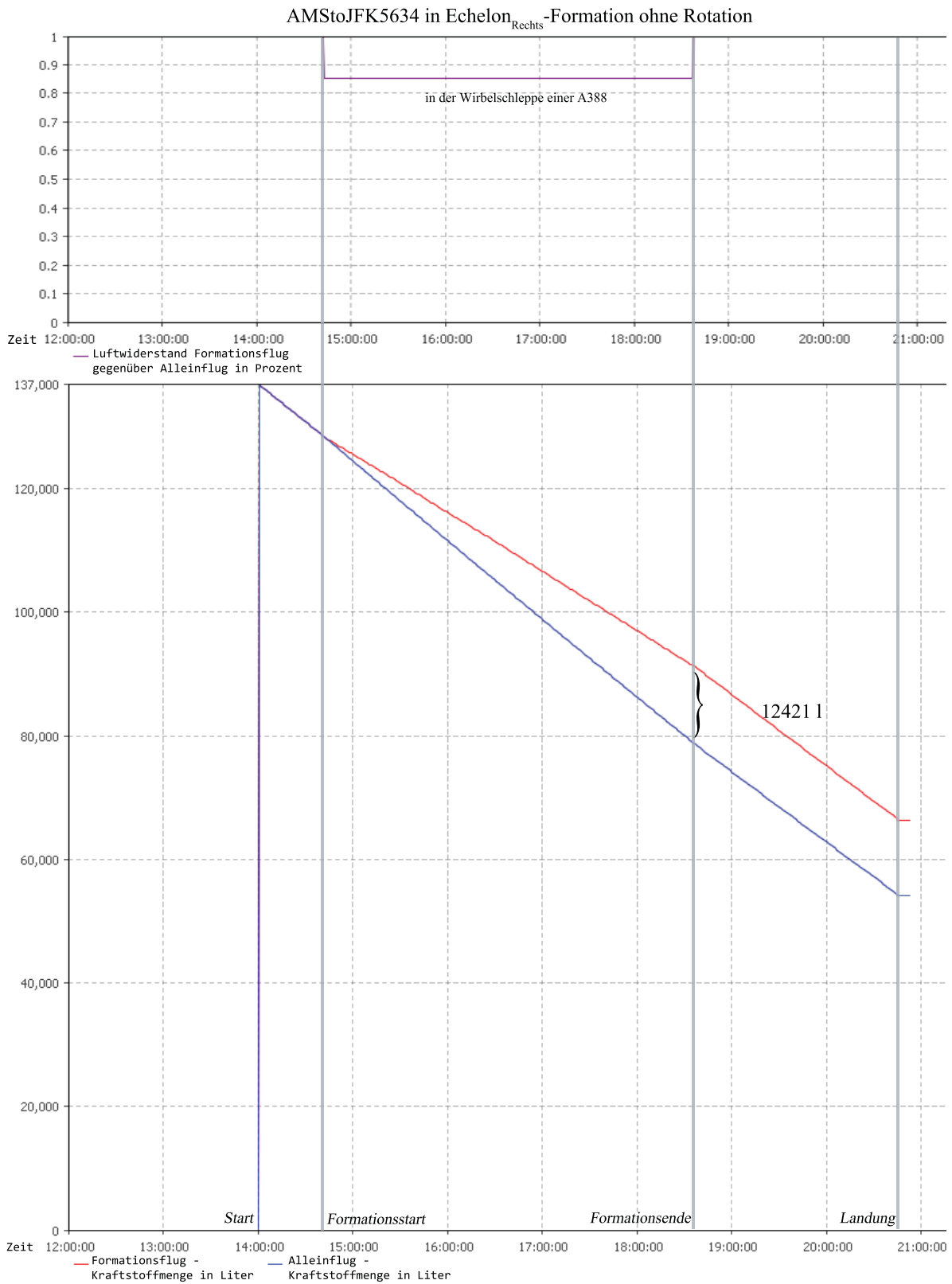


Abbildung A.4.13 Mission AMStoJFK5634 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix (A380-841)

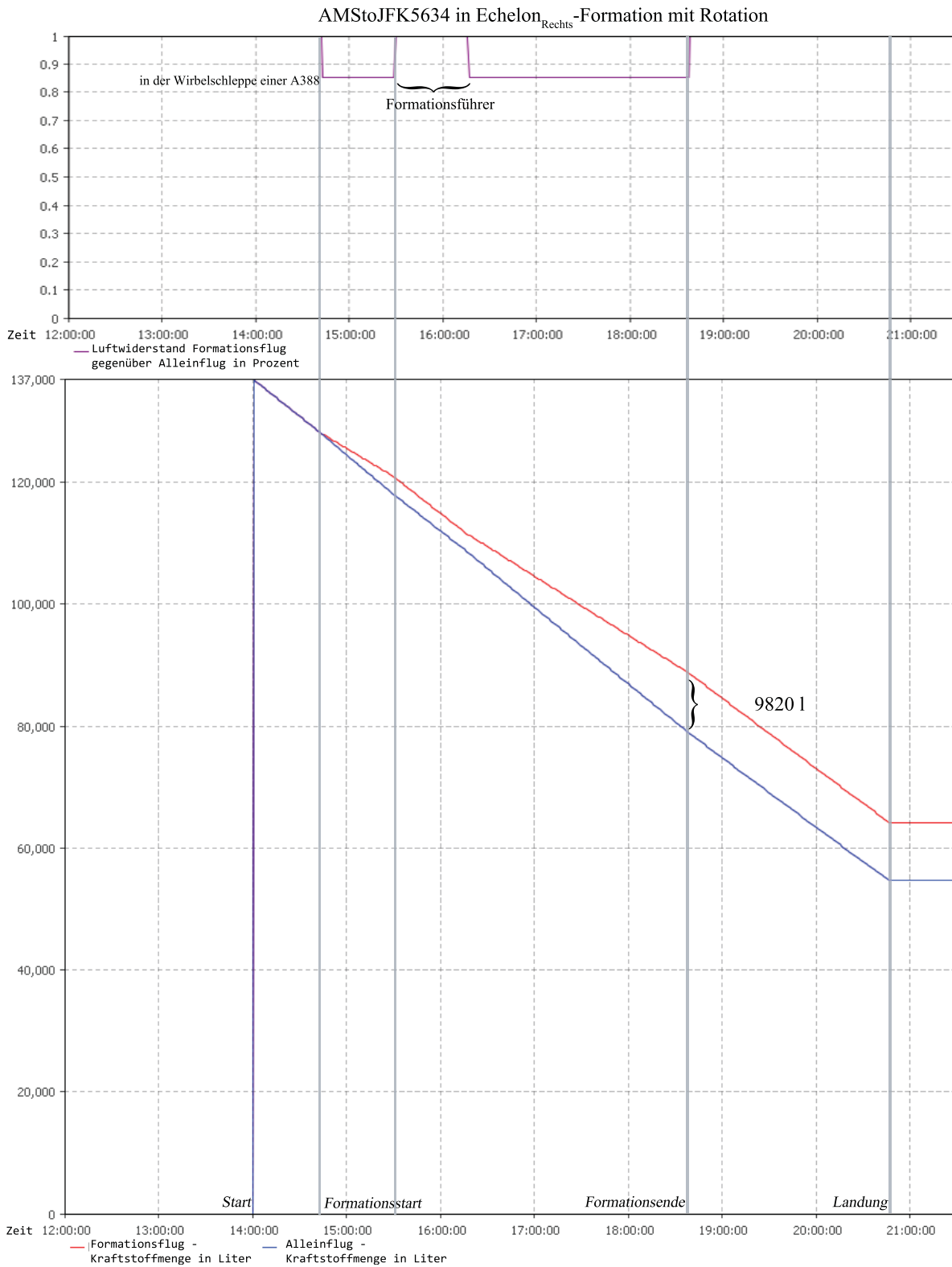


Abbildung A.4.14 Mission AMStoJFK5634 in Echelon<sub>Rechts</sub>-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix (A380-841)

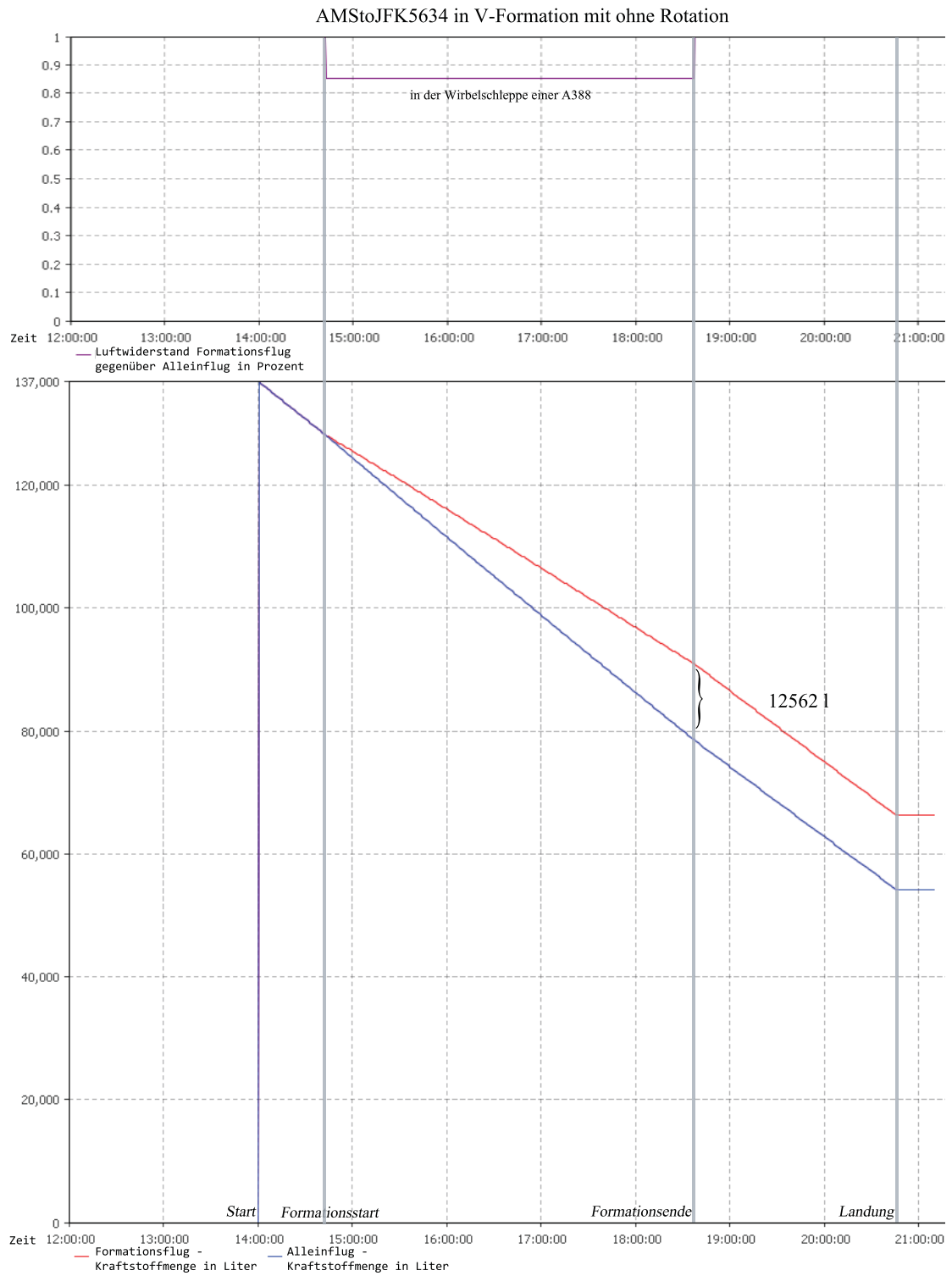


Abbildung A.4.15 Mission AMStoJFK5634 in V-Formation ohne Rotation und mit Flugzeugmix (A380-841)



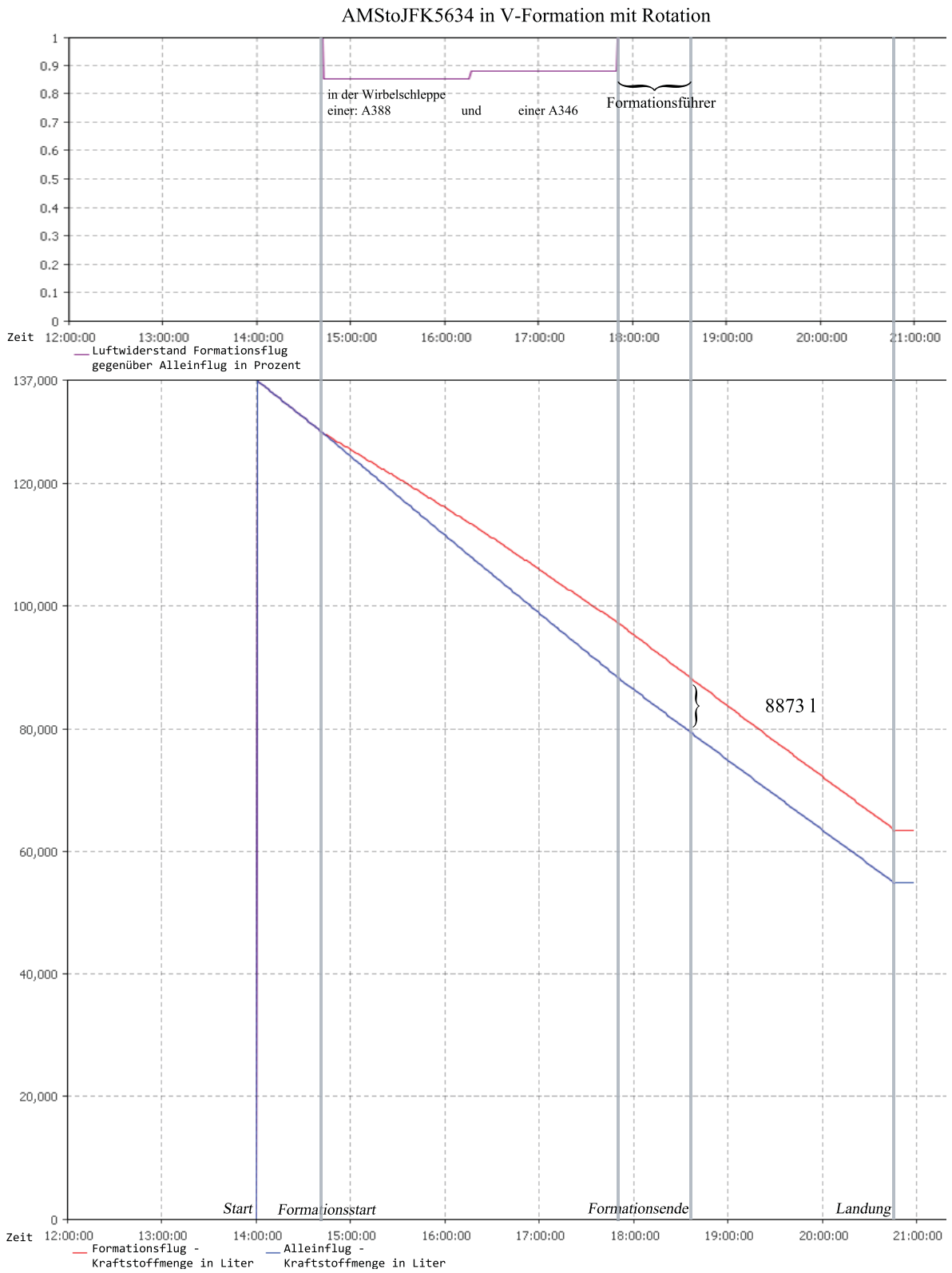


Abbildung A.4.16 Mission AMStoJFK5634 in V-Formation mit Rotation und mit Flugzeugmix (A380-841)