

SYSTEMS ENGINEERING

Olaf Kreichgauer

**Quantitatives dynamisches Modell zur
Simulation von Systembelastungen in
Luftverkehrsabläufen**

2., unveränderte Auflage

UTZ
1974



Herbert Utz Verlag · München

UTJ

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte,
insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von
Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege
und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur
auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2006

ISBN 3-8316-0381-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utz.de

herutah

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung dieser Untersuchung	6
1.3	Vorgehensweise	8
2	Entwicklung und Belastungsbereiche im Luftverkehr	11
2.1	Flugsicherung	11
2.2	Flughafenkapazität	14
2.3	Probleme durch unterschiedliche Flugzeuggröße	16
3	Verfahren zur Gefahrenanalyse	19
3.1	Allgemeines	19
3.2	Failure Mode and Effect Criticality Analysis	20
3.3	Benötigte Systeminformation	21
3.4	Durchführung der Analyse	21
3.5	Beispiel zur Anwendung der FMEA	22
3.6	Ausfalleffektanalyse zur Bestimmung von Gefahrezuständen im Flugverkehr	23
4	Systemtechnisches Verfahren zur Modellierung und Simulation	25
4.1	Systemtechnisches Vorgehen	25
4.2	Formalisierung von Systemen	29
4.3	Modellentwicklung von Systemen	31
4.3.1	Systemanalyse	31
4.3.2	Vorgehensweise beim Modellbildungsprozeß	34

4.4	Komplexität von Systemen	37
4.5	Dynamische Simulation von Systemen	45
4.5.1	Grundlagen der dynamischen Simulation	45
4.5.2	Initialisierung des Modells	46
4.5.3	Quasistationäre Simulation und Konvergenz	47
4.5.4	Besonderheiten der Simulation mit Hilfe systemtechnischer Modelle	49
4.5.5	Anwendung der Netzplantechnik auf das systemtechnische Modell	51
5	Modellierung des Systems Luftverkehr	53
5.1	Zielsetzung und Anforderungen an das Modell	53
5.2	Das Bewertungsmodell	58
5.2.1	Zusammenhang zwischen Bewertungsmodell und Systemmodell	58
5.2.2	Aufbau des Bewertungsmodells	61
5.2.3	Ermittlung der Wichtungsfaktoren	65
5.3	Strukturierte Analyse des Systems Luftverkehr	70
5.4	Funktionsanalyse der Elemente	72
5.5	Element Flugzeug	73
5.5.1	Modellstruktur	73
5.5.2	Flugmechanisches Modell	74
5.5.3	Bewertung des flugmechanischen Zustandes	89
5.5.3.1	Strömungseinflüsse	89
5.5.3.2	Einflüsse der Position und der Lage	95
5.5.4	Hindernisbetrachtung	97
5.5.4.1	Einfluß der Höhe	97
5.5.4.2	Einflüsse beim Landevorgang	99
5.5.4.3	Kollisionsbetrachtung	100
5.5.5	Systemausfälle	101
5.5.6	Mensch-Maschine-Schnittstelle	101
5.6	Element Wetter	102
5.6.1	Modellstruktur	102
5.6.2	Sicht des Piloten	104
5.6.3	Geschwindigkeitsfeld in Wirbelschleppen	106
5.7	Element Pilot	115
5.7.1	Allgemeines	115
5.7.2	Modellstruktur	117

37	5.7.3 Belastungs-Beanspruchungs-Modell	120
45	5.7.3.1 Pilotenreaktionen	121
45	5.7.3.2 Pilotenbelastung	122
46	5.7.3.3 Einfluß der Erfahrung	124
47	5.7.3.4 Einfluß des Flugzeugzustandes	125
49	5.7.3.5 Einfluß der Wahrnehmung	125
51	5.7.3.6 Einfluß der Konversation	126
	5.7.3.7 Einfluß der Ergonomie	127
	5.7.4 Beanspruchung des Piloten	127
53	5.8 Rechnergestützte Realisierung des Modells	128
53	5.8.1 Programmtechnisches Verfahren	128
58	5.8.2 Initialisierung	130
58	5.8.3 Simulation	130
61	6 Simulation des Systems Luftverkehr	134
65	6.1 Möglichkeiten der Simulation	134
70	6.2 Simulation von Fallbeispielen	135
72	6.3 Allgemeine Aussagen	150
73	6.3.1 Variation der Erfahrung und der Procedures	151
73	6.3.2 Variation der Flugzeugklassen und der Staffelungsabstände	152
74	6.3.3 Variation der Systemredundanz	153
89	6.3.4 Variation der Flugsicherungskompatibilität	155
89	6.4 Weitere Simulationsmöglichkeiten	156
95	6.5 Berechnung der Komplexität	156
97		
97	7 Zusammenfassung und Ausblick	161
99		
100	Formelzeichen	164
101		
101	Literaturverzeichnis	170
102		
102	Struktur des systemtechnischen Modells des Luftverkehrssystems	178
104		
106	Legende (Bild 5.14)	180
115		
115		
117		

KAPITEL 1

Einführung

1.1 Problemstellung

Das Fliegen zum Zwecke des Transportes von Personen und Gütern ist weltweit zu einer alltäglichen und selbstverständlichen Angelegenheit geworden. Die Motivation für die aus dem historischen Gesichtspunkt sehr rasche Entwicklung von Flugzeugen liegt hauptsächlich in dem Vorteil der erheblich höheren Reisegeschwindigkeit des Flugzeuges gegenüber anderen Verkehrsmitteln wie Schiff, Bahn und dem Automobil, insbesondere wenn letztere orographisch behindert sind. Das Hauptanliegen des Luftverkehrs ist deshalb der schnelle und sichere, aber dennoch preiswerte Transport über mittlere und größere Distanzen. Durch die Entwicklung und den Einsatz immer neuer Technologien stellt das Flugzeug heute ein wirtschaftlich unentbehrliches Verkehrsmittel hoher Akzeptanz bezüglich Transportleistung, Komfort und Zuverlässigkeit dar.

Geregelt wird der Luftverkehr durch Vorschriften, Gesetze und Abkommen, verfaßt durch nationale und internationale Institutionen des Luftverkehrs, wie die ICAO (siehe *MENSEN /49/*). Beispielhaft für andere Nationen ist das Bundesministerium für Verkehr der Bundesrepublik Deutschland als oberste Bundesbehörde für Luftfahrtangelegenheiten zu nennen, welchem die Zulassung von Luftfahrtgesellschaften, die Genehmigung der Flugpläne und der Beförderungsbedingungen obliegt. Weitere Aufgabengebiete sind die Genehmigung des internationalen Linien- und Charterverkehrs, die Vertretung der Bundesrepublik Deutschland in internationalen Institutionen des Luftverkehrs, der Erlass von Rechtsverordnungen über die Durchführung des Luftverkehrs und die Dienst- und Fachaufsicht der nachgeordneten Bundesbe-

hörden, wie Luftfahrt-Bundesamt und Bundesanstalt für Flugsicherung. Zu den nachgeordneten Bundesbehörden gehören u.a. das Luftfahrt-Bundesamt (LBA) sowie die am 01.01.1993 aus der bisherigen Bundesanstalt für Flugsicherung (BFS) neu gegründete Deutsche Flugsicherung GmbH (DFS) als privatrechtliche Gesellschaft, die seither die Aufgaben der BFS wahrnimmt (POMPL /59/).

Die zur Flugsicherheit und zur Flugsicherung beitragenden und hierfür verantwortlichen Institutionen müssen durch weitreichende Strukturierungsmaßnahmen, wie z.B. durch Privatisierung im Falle der Bundesanstalt für Flugsicherung, und durch Einführung innovativer Technik steigender Kapazität mit einem stetig wachsendem Luftverkehr schritthalten. Hierbei stellt die Sicherung des Flugbetriebes aufgrund steigender Flugbewegungen immer höhere Ansprüche sowohl an die Technik als auch an die beteiligten Organisationen. Bild 1.1 zeigt die weltweite Entwicklung des Personentransportes im Linienluftverkehr in den Jahren von 1980 bis 1990 (ICAO, *Flight International* /54/).

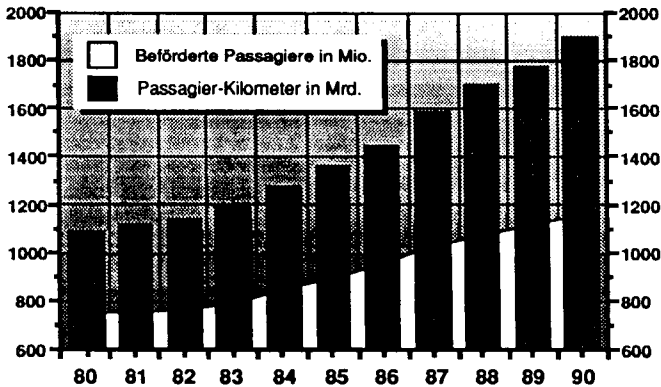


Bild 1.1: Weltweiter Personentransport im Luftverkehr der ICAO-Mitglieder (Quelle: ICAO)

Im genannten Zeitraum zeigt sich ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 3,5% für die beförderten Passagiere und ein Wachstum von fast 5,2% für die Passagier-Kilometer (siehe auch IATA-Statistiken in ECKHOFF /15/). In Gebieten hoher Bevölkerungsdichte und großem wirtschaftlichem Wachstum liegt die Steigerungsrate entsprechend höher.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Anzahl der Todesopfer und die auf die zurückgelegte Strecke bezogenen Todesopfer im Weltlinienluftverkehr über die Jahre

u den
A) so-
3) neu
schaft,

1970 bis 1991 (siehe Bild 1.2), so erkennt man den kontinuierlichen Rückgang der fatalen Ereignisse, trotz des Wachstums des Luftverkehrs in absoluten Zahlen (*Flight International* [52]).

wort-
, wie
durch
ndem
grund
k als
g des
CAO,

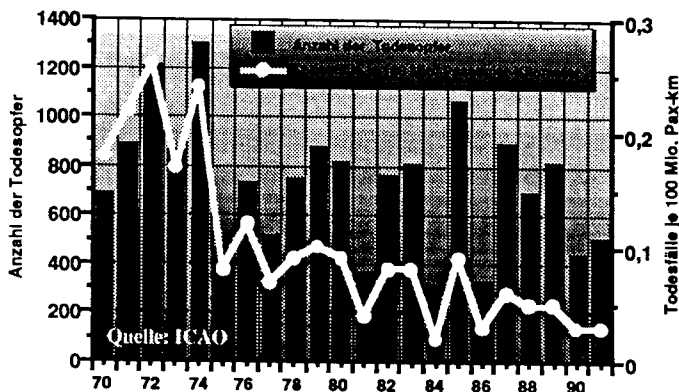


Bild 1.2: Todesfälle im Weltlinienluftverkehr (ICAO-Mitglieder) ohne Terrorismus

Ein Passagier kann heute durchschnittlich 2,8 Mrd. Kilometer mit dem Linienflugzeug zurücklegen, bis er Todesopfer eines Flugzeugunglückes wird. Unterstellt man eine durchschnittliche Geschwindigkeit eines Linienflugzeuges von 900 km/h, so müßte ein Mensch 355 Jahre ununterbrochen im Flugzeug verbringen, bis er durch einen Unfall getötet wird.

Bild 1.3 zeigt den Vergleich der Mortalität im Personentransport des Luftverkehrs zu den wichtigsten anderen Verkehrsmitteln Bahn und Straßenverkehr im Durchschnitt über die Jahre 1986 bis 1991 bezogen auf die zurückgelegten Personenkilometer.

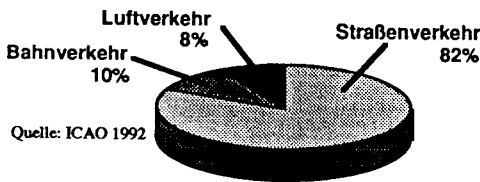


Bild 1.3: Prozentuale Verteilung der Todesopfer bzgl. der Verkehrsmittel bezogen auf Personenkilometer

Die positiven Tendenzen bezüglich der Vergrößerung der Luftfahrtsicherheit sind vor allem auf die ständigen Verbesserungen der Technik auf den Gebieten der Flug-

von
die
ho-
ger-

die
hre

sicherung und der Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Flugzeugen und deren Systeme einschließlich der Ausbildung der am Luftverkehr beteiligten Personen zurückzuführen.

Die Sicherheitsstatistiken des Luftverkehrs sind Ergebnis der Betrachtung von Unfallereignissen individueller Flugzeuge, welche in ihrer Gesamtheit den Luftverkehr bilden. Das einzelne Flugzeug kann einerseits durch Ausfall von Teilen seiner Untereinheiten bzw. durch Pilotenfehler verunglücken, andererseits können Wechselwirkungen zwischen dem Flugzeug bzw. den Piloten und anderen Teilnehmern des Luftverkehrs oder z.B. der Flugsicherung einen Unfall verursachen. Diese Betrachtungsweise führt zur Aufteilung der Gesamtheit aller Unfälle in die Möglichkeiten der Ursachen (siehe Bild 1.4):

1. Unfall im autonomen Flug
2. Unfall durch die Teilnahme am Luftverkehr
3. Unfall durch Kombination von 1. und 2.

Für die Sicherheit des Flugzeuges während des Fluges sind demnach zwei Aspekte verantwortlich. Zunächst muß das Flugzeug durch die Leistungsfähigkeit seiner Systeme, Ausrüstung und Piloten und durch die Summe seiner Eigenschaften einen sicheren Flug in Abhängigkeit von den Wechselwirkungen mit der Umgebung, vor allem mit dem Wetter, gewährleisten. Durch die Einbindung des Fluges des aktuell betrachteten Flugzeuges in den Luftverkehr, d.h. durch die Wechselwirkungen mit anderen sich im Luftraum befindlichen Flugzeugen, mit der Flugsicherung und den Flughäfen, sind andere Gefahrenquellen für die Sicherheit des Flugzeuges erkennbar, die weitestgehend unabhängig sind vom Flugzeug selbst (siehe Bild 1.4).

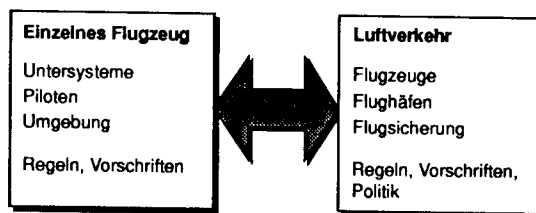


Bild 1.4: Möglichkeit der getrennten Betrachtungsweise von Unfallursachen

In der Literatur wird im Zusammenhang mit dieser Aufteilung einerseits von der Systemzuverlässigkeit des Flugzeuges selbst (z.B. *MADLUNG* /44/, *JACOB* /34/, *FORM* /21/, *FABER* /18/) und von der Flugsicherung bzw. der ATC (Air Traffic

Control) und ATM (Air Traffic Management) gesprochen (z.B. REICHMUTH /60/, SCHICK /69/, SCHÄNZER /65/, VÖLKERS /82/, v.VILLIEZ /78/). Im Bereich der Flugsicherung sind die enorm steigende Anzahl von Flugzeugen in einem Kontrollgebiet und die zum Teil erheblichen Kapazitätsprobleme von Flughäfen in Europa aber auch in vielen anderen Teilen der Welt zu bewältigen. Die Anzahl der Passagiere in Europa lag 1990 bei 306 mio. Paxen. Für 1995 ist von der International Air Transportation Association eine Anzahl von 383 mio. Paxen mit einer Steigerungsrate von ca. 5% für die weiteren 10 Jahre prognostiziert worden (siehe IATA und WINTER /84/). Diesem Anstieg der Flugbewegungen stand in Europa in den letzten 10 Jahren bis heute praktisch kein nennenswerter Ausbau der Flugsicherungskapazität gegenüber.

Ein weiteres Problem der Flugsicherung speziell in Europa ist die Unterschiedlichkeit der nationalen Flugsicherungsverfahren. Hier werden zur Zeit 22 unterschiedliche Flugsicherungssysteme auf engstem Raum eingesetzt (HEER /27/, HÜTTIG /32/). Deren Informationsaustausch und der damit verbundene Zeitaufwand könnte durch eine Entwicklung hin zu einem einheitlichen System, wie es die europäische Flugsicherungszentrale EUROCONTROL versucht, im Zusammenhang mit einer Liberalisierung des Luftverkehrs wesentlich verbessert werden (ECKHOFF /15/).

Vielfach wird die Ausrüstung der Flugsicherungen am Boden mit nicht mehr zeitgemäßen technischen Anlagen bemängelt. Dabei benutzen die Fluglotsen größtenteils noch den "Kontrollstreifen", obwohl bereits stärker automatisierte Verfahren existieren, welche eine manuelle Kontrolle vereinfachen. Diese Verfahren wie z.B. COMPAS (SCHICK /70/, SCHENK /67/) oder ACAS (FORM /22/) befinden sich teils in der Erprobung und im kleinen Umfang auch schon im Einsatz, aufgrund fehlender politischer Entscheidungen werden diese jedoch noch nicht flächendeckend eingesetzt. Die Situation des Mangels an technisch kompatibler und zeitgemäßer Ausrüstung der Flugsicherung im Zusammenhang mit der Kapazitätskrise einiger Flughäfen führt in manchen Fällen zu einer Kapazitätssättigung zu Spitzenzeiten (ECKHOFF /15/, HÜTTIG /32/, N.N. /54/).

Die Sicherheit eines Fluges unterliegt einer ganzen Reihe von Einflußfaktoren. Diese Faktoren selbst und deren Zusammenhänge sind Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen zum Thema der Sicherheit im Luftverkehr (z.B. GERLING /24/, HÄSSLER /26/, KNABE /37/, MENSEN /50/). In diesem Zusammenhang sind ebenso Untersuchungen zu nennen, die sich mit den Ausfällen von Untersystemen der Flugzeug beschäftigen (PETERS /58/, FORM /21/) wie Untersuchungen zum Mensch-

Maschine-System im Hinblick auf die Piloten und die Controller (z.B. MÜLLER /51/, OCH /55/, LYSAGHT /42/, ROSCOE /62/).

Im Zuge der Liberalisierung des Luftverkehrs in Europa ist ein starkes Anwachsen des Zubringer-Luftverkehrs gegenüber dem Großlinienverkehr zu erkennen (siehe auch Kapitel 2). Dabei spielen die Zubringerdienste von kleineren Flughäfen zu den internationalen Flughäfen (Hubs) eine große Rolle. Durch den weiteren Zuwachs des Regionalluftverkehrs sind Überlegungen hinsichtlich der Gewährleistung eines zumindest gleichbleibend hohen Sicherheitsstandards sowohl im Bereich der Flugsicherung als auch im Bereich des Luftverkehrs-Managements notwendig. Die Vielfalt unterschiedlicher Flugzeuge, deren Systeme, der Piloten, der Flughäfen, der Flugsicherung, der Wetterformen und der unterschiedlichen Abläufe des Luftverkehrs läßt erkennen, wie "komplex" sich das Luftverkehrssystem darstellt.

Die Unfallforschung im Luftverkehr versucht durch die Auswertung von Unfallstatistiken einerseits und durch Analysen der Auswirkungen von Ausfällen von Systemen andererseits, Erkenntnisse für die Verbesserung der Sicherheit im Luftverkehr zu gewinnen (SEIFERT /74/, WESTPHAL /83/, SCHÄNZER /65/). Im Regelfall bringen die statistischen Untersuchungen nur globale Erkenntnisse, z.B. der Anstieg der Unfallträchtigkeit des Flugzeuges bei schlechten Wetterbedingungen. Im Falle der Analyse von Auswirkungen von Untersystemausfällen im Flugzeug, wie z.B. der Ausfall des Hydrauliksystems eines bestimmten Flugzeuges, sagt wenig über die unmittelbare Gefährdung eines einzelnen Flugzeuges in seinem momentanen Flugzustand aus.

Nach Betrachtung aller genannten Einflüsse und Zusammenhänge wird die Frage nach der Möglichkeit der Gefahrenabschätzung eines Flugzeuges in beliebigen Luftverkehrsabläufen gestellt, in welcher die unterschiedlichen o.g. Einflüsse auf die Gefahr bzw. Nicht-Gefahr Berücksichtigung finden.

1.2 Zielsetzung dieser Untersuchung

Die Zulassungsvorschriften und die Betriebsvorschriften für Luftfahrtgerät beschreiben Lastannahmen und deren Grenzgrößen, die von Flugzeugen im Betrieb unterschritten werden müssen. Hierzu zählen die Die Airworthiness Standards FAR Part 25 (Federal Aviation Regulations), die JAR Part 25 (Joint Aviation Regulations) /89/, die Betriebsvorschriften FAR Part 121 /90/, die LuftBo /91/ und die DVO Luft BO /92/. Diese Nachweise der Unterschreitung dieser Grenzgrößen müssen bei der Zulassung

von F
anger

Im Lu
kehrs
den l
gisch
des L
Belas
genat
kann
Wecl
berü
Vors
Fälle
lastu
werd

Gege
Bela
Vors
wirk
Bild

Dazu
erwi
welc
belie
eine

KAPITEL 7

Zusammenfassung und Ausblick

Übergeordnetes Ziel des Betriebes von zivilen Luftfahrzeugen ist der sichere, wirtschaftliche und schnelle Transport von Passagieren und Gütern über mittlere und große Distanzen. Die Sicherheit des Luftverkehrs ist beispielhaft auch für andere Verkehrsmittel. Pro 100 Mio. Passagier-Kilometer treten heute durchschnittlich 0,03 Todesfälle im Luftverkehr auf, ca. 10 mal weniger als im Straßenverkehr. Jedoch kommt es durch starkes Anwachsen der Flugbewegungen und der zunehmenden technischen und prozeduralen Komplexität des Systems Luftverkehr vermehrt zu Gefahrenzuständen, welche einer Analyse bzgl. deren Art und deren Auswirkung bedürfen.

Die Gefahrenursachen können eingeteilt werden in technisch bedingte Ausfälle von Systemen des einzelnen Flugzeuges, in verkehrsbedingte Gefährdungen durch die Dichte des Luftraumes, insbesondere in Flughafennähe, in Gefahren, welche während des Flugbetriebes vom Menschen ausgehen, sei es als Pilot oder als Controller, sowie in multikausale Fälle.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Gefährdungsgröße eines einzelnen, beliebigen Flugzeuges während seines Fluges im Luftverkehrssystem, als Vorstufe zur Entwicklung von Vorschriften und Normen, welche auch weiterhin einen sicheren Luftverkehrsbetrieb gewährleisten. Hierzu wird die Eignung unterschiedlicher, bereits existierender Analyse-Verfahren untersucht. Danach kann festgestellt werden, daß sich die meisten Verfahren auf die Ausfalluntersuchung technischer Systeme beschränken. Aufgrund des Fehlens einer für die gewünschte Untersuchung geeigneten Methodik wird ein neues Verfahren entwickelt, welches beispielhaft die im Rahmen dieser Arbeit möglichen Einflüsse auf die Gefährdung des Luftverkehrs berücksichtigt.

Die Entwicklung eines quantitativen dynamischen Verfahrens zur Simulation von Systembelastungsfällen im Luftverkehr beruht auf der systemtechnischen Modellierungsmethodik, welche um die Möglichkeit der quantitativen dynamischen Modellierung und Simulation erweitert wird. Mit Hilfe dieses Werkzeuges wird das "komplexe" System des Luftverkehrs modelliert, wobei im Modell die Elemente des Systems, wie Flugzeug, dessen Systeme, Piloten, Wetter, Flugsicherungsanlagen, Flughafen usw. in hierarchischen Strukturen abgebildet werden. Durch die Zuordnung von Eigenschaften (meist physikalische Parameter) und Funktionen, kann das Verhalten der Elemente im Gesamtsystem beschrieben werden. Durch die Einführung von Relationen steht das jeweilige Element mit anderen Elementen in Verbindung, wodurch eine Simulation von Kausalketten im vernetzten System möglich wird.

Nach abgeschlossener Modellierung und anschließender Rechnerimplementierung werden die Flüge von "aktuell beobachteten" Flugzeugen im System Luftverkehr dynamisch simuliert. Gleichzeitig werden die jeweiligen zeitabhängigen Werte der Systembelastung und des daraus resultierenden Gefahrenpotentials der Flugzeuge quantitativ ermittelt. Hierzu werden eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. Als Simulationsbeispiele dienen einerseits einzelne Unfallszenarien aus der Statistik, andererseits werden aber auch Parametervariationen des Modells durchgeführt, um allgemeine Zusammenhänge von Parametern zu ermitteln, welche zur Systembelastung beitragen. Dabei wird insbesondere die Wechselwirkung von Linern und Regionalflugzeugen und deren Auswirkung auf die Gefährdung des Luftverkehrs analysiert. Als Einzelbeispiel zur Simulation wird u.a. der Flug des verunglückten Airbus A320 der Luftfahrtgesellschaft Air INTER im Januar 1992 dargestellt.

Die Ergebnisse der beispielhaft durchgeführten Simulationen zeigen, daß die Einhaltung folgender Faktoren die Gefährdung eines Flugzeuges im System Luftverkehr reduzieren können:

- Verbesserung der Pilotenausbildung und häufigeres Training insbesondere beim Wechsel des Flugzeugtypes
- Zum Teil höhere Redundanz und/oder höhere Qualität der Flugzeugsysteme
- Vergrößerung der Systemkompatibilität im Bereich der Flugsicherung und Vereinheitlichung der Flugsicherungssysteme
- Verringerung der Spitzenlasten im Flughafenbereich
- Bei gleichbleibendem Luftverkehrswachstum: Bau von Entlastungsflughäfen
- Erhöhung der Cockpitergonomie

Bei den sicherheitsgefährdenden Wechselwirkungen zwischen Linern und Regional-

flugzeugen tragen u.a. folgende unterschiedliche Eigenschaften der Flugzeugtypen zur Gefährdung bei

- Strömungsmechanische Sensibilität auf Störungen, z.B. Scherwinde, Wirbelschleppeneinflug (Staffelungsproblematik)
- Behandlung durch die Controller beim Sequencing

Das entwickelte Verfahren hat seine Anwendbarkeit auf vielfältige Fragestellungen zur Systembelastung und deren quantitative Bewertung im Luftverkehr gezeigt. Hierbei ist insbesondere die Möglichkeit der Analyse der zum Gefahrenzustand beitragenden Faktoren während des simulierten Fluges zu nennen. In einigen Punkten des entwickelten Verfahrens zur Gefahrenanalyse ist durch die weitere Vertiefung von physikalischen Zusammenhängen und durch Verbesserungen im Bewertungsverfahren eine noch größere Aussagekraft erzielbar. Der Einsatz des Verfahrens und seiner möglichen Weiterentwicklung ist u.a. denkbar als

1. Informationsinstrument für den Piloten im Cockpit zur simultanen Bewertung des Gefahrenpotentials des Flugzeuges während des Fluges oder im Simulator
2. Hilfsmittel zur Berücksichtigung des Sicherheitsaspektes in der Streckenplanung von Luftfahrtgesellschaften
3. Simulationswerkzeug im Bereich der Flugsicherung und Flughäfen

Das entwickelte systemtechnische Modell hat beispielhaften Charakter für die Vorgehensweise bei der Simulation von Belastungsfällen in Luftverkehrsszenarien. Es kann als Grundlage für die Entwicklung eines EDV-gestützten Systems verwendet werden, welches bei der Erstellung von Vorschriften und Normen im Bereich der Luftverkehrssicherheit eingesetzt werden kann.

Das zur Modellierung und Simulation von Belastungsfällen im Luftverkehr entwickelte systemtechnische Verfahren hat sich als allgemeingültig erwiesen, sodaß sich als Ergebnis dieser Arbeit nicht nur die quantitative Bewertung von Gefahrenzuständen im Luftverkehr über darstellt. Vielmehr konnte über die eigentliche Anwendung hinaus, als Beitrag zur Systemtechnik, ein eigenständiges und praktikables Verfahren zur formalen Analyse, Modellierung und Simulation von beliebigen dynamischen Systemen entwickelt werden.