

Anna Elisabeth Bauch

Die virtuelle Flugzeugevakuierungsanalyse



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2003

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 2003

ISBN 3-8316-0282-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG.....	1
1.1	MOTIVATION.....	1
1.2	AUSGANGSSITUATION	3
1.3	ZIEL DER ARBEIT.....	7
1.4	STRUKTUR DER ARBEIT.....	9
2	SICHERHEIT UND ERGONOMIE IN DER KABINENENTWICKLUNG.....	11
2.1	DER PROZESS KABINENENTWICKLUNG.....	11
2.2	SICHERHEIT IN DER KABINE	14
2.2.1	<i>Abgrenzung der ‚post-crash‘ Kabinensicherheit</i>	<i>20</i>
2.2.2	<i>Die Evakuierungssicherheit.....</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Die Evakuierungssicherheit im Kabinenentwicklungsprozess.....</i>	<i>26</i>
2.3	ERGONOMIE UND ANTHROPOMETRIE.....	28
2.3.1	<i>Ergonomie</i>	<i>28</i>
2.3.2	<i>Anthropometrie</i>	<i>32</i>
2.3.3	<i>Ergonomie in der Kabinenentwicklung – Status Quo und erkennbare Trends... ..</i>	<i>34</i>
2.4	ERGONOMISCHE MENSCHMODELLE	36
2.4.1	<i>Anthropometrische Menschmodelle.....</i>	<i>37</i>
2.4.2	<i>Einsatz anthropometrischer Menschmodelle in der Kabinenentwicklung</i>	<i>39</i>
3	VIRTUELLE SIMULATION.....	43
3.1	DIE SIMULATION.....	44
3.1.1	<i>Modellbildung und Simulation</i>	<i>44</i>
3.1.2	<i>Simulation und Animation.....</i>	<i>48</i>
3.2	VIRTUAL REALITY.....	50
3.2.1	<i>Definition Virtual Reality</i>	<i>51</i>
3.2.2	<i>VR Technologie für die virtuelle Simulation</i>	<i>53</i>
3.2.3	<i>Virtual Prototyping</i>	<i>57</i>
3.2.4	<i>Augmented Reality</i>	<i>60</i>
3.2.5	<i>Einsatz von VR in der Luft- und Raumfahrt</i>	<i>62</i>
3.3	VIRTUELLE MENSCHMODELLE	66
3.3.1	<i>Integration des virtuellen Menschen in VR</i>	<i>67</i>
3.3.2	<i>Einsatz VHMS in der Luft- und Raumfahrt.....</i>	<i>72</i>

4	DIE VIRTUELLE EVAKUIERUNG	75
4.1	VIRTUELLE ERGONOMISCHE KABINENTWICKLUNG	76
4.1.1	<i>Die virtuelle Kabinensimulation</i>	<i>76</i>
4.1.2	<i>Potential der virtuellen ergonomischen Kabinentwicklung</i>	<i>77</i>
4.1.3	<i>Einsatz der virtuellen Technologien für die ergonomischen Kabinentwicklung.....</i>	<i>80</i>
4.1.4	<i>Mehrwert der virtuellen ergonomischen Absicherung</i>	<i>84</i>
4.2	DAS KONZEPT VIRTUELLE EVAKUIERUNG	86
4.3	DAS SPEKTRUM DER VIRTUELLEN EVAKUIERUNGSANALYSE	90
4.3.1	<i>Der Evakuierungsprozess</i>	<i>92</i>
4.3.2	<i>Umgebungsbedingungen</i>	<i>95</i>
4.3.3	<i>Der Mensch</i>	<i>96</i>
4.3.3.1	<i>Verhalten und Einflussfaktoren.....</i>	<i>97</i>
4.3.3.2	<i>Typisches Fehlverhalten von Passagieren während einer Evakuierung.....</i>	<i>101</i>
4.3.4	<i>Die Kabine</i>	<i>103</i>
4.3.5	<i>Bewegungsabläufe und -strategien in der Evakuierung</i>	<i>105</i>
4.4	DIE METHODEN DER VIRTUELLEN EVAKUIERUNGSANALYSE	107
4.4.1	<i>Gestaltungsrichtlinien und -regeln.....</i>	<i>109</i>
4.4.1.1	<i>Grundlegende allgemeine Entwicklungsprinzipien und</i>	<i>109</i>
	<i>Gestaltungsrichtlinien.....</i>	<i>109</i>
4.4.1.2	<i>Spezielle Gestaltungsregeln im Hinblick auf den Evakuierungsablauf.....</i>	<i>110</i>
4.4.2	<i>Entwicklungsphilosophie und Zielgruppendefinition</i>	<i>110</i>
4.4.3	<i>Analysemethodik der virtuellen Evakuierung</i>	<i>114</i>
4.4.4	<i>Gefährdungsklassen zur Einstufung der Evakuierungssicherheit.....</i>	<i>115</i>
4.5	MINIMALE ANFORDERUNGEN AN DAS VR-SYSTEM.....	116
5	APPLIKATION DER VIRTUELLEN EVAKUIERUNG	121
5.1	DER VIRTUELLE TIBS KABINENSIMULATOR.....	123
5.2	DEFINITION UND AUFBAU DER EINGESETZTEN VHMS	124
5.2.1.1	Visualisierungsmodell AniPerson.....	125
5.2.1.2	VR Anthropos.....	126
5.3	IMMERSIVE ANALYSEN - EVAKUIERBARKEIT	129
5.3.1	<i>Immersive Analyse</i>	<i>129</i>
5.3.2	<i>Form & Fit Analysen – immersiver partieller Test.....</i>	<i>129</i>
5.3.3	<i>Versuchsanwendungen Form & Fit Analyse.....</i>	<i>131</i>
5.4	PARTIELLE TESTS	133
5.4.1	<i>Interaktiver partieller Test.....</i>	<i>134</i>
5.4.2	<i>Versuchsanwendungen interaktiver partieller Test.....</i>	<i>136</i>
5.4.3	<i>Virtueller Test.....</i>	<i>138</i>
5.5	VIRTUELLE EVAKUIERUNGSPROZESSANALYSE	138
5.5.1	<i>Immersive Notevakuierung.....</i>	<i>139</i>
5.5.2	<i>Immersiver Zertifizierungstest</i>	<i>141</i>
5.5.3	<i>Immersive Prozessanalyse</i>	<i>141</i>
5.5.4	<i>Virtueller Evakuierungstest.....</i>	<i>142</i>
5.5.5	<i>Bewegungsdatenbank für die immersive Notevakuierung</i>	<i>143</i>
5.5.5.1	<i>Bewegungsdatenbank AniPerson</i>	<i>145</i>
5.5.5.2	<i>Bewegungsdatenbank VR Anthropos</i>	<i>145</i>
5.5.6	<i>Die immersive Evakuierung auf Grundlage von airExodus</i>	<i>146</i>
5.5.6.1	<i>Der airExodus Postprozessor - airExodusPost</i>	<i>149</i>
5.5.6.2	<i>Vom Bewegungsablauf eines Passagiers zur zeitkritischen Darstellung eines Passagierflusses</i>	<i>151</i>

5.5.6.3	Einsatz des Menschmodells VR Anthropos	152
5.5.6.4	Das Beispielszenario TIBS-Kabinensimulator.....	153
5.6	TRAINING	156
6	GRENZEN UND FEHLERQUELLEN DER PRAKTISCHEN IMPLIKATION	159
6.1	PRÄZISION DER OBJEKTSIMULATION.....	159
6.2	DIE INTERAKTIONSSCHNITTSTELLE	161
6.3	POTENTIAL UND GRENZEN DER VHMS.....	161
6.3.1	<i>Interaktivität des VHMS</i>	162
6.3.2	<i>Güte der Bewegungsdarstellung</i>	162
6.4	DAS PROBLEM DER FEHLENDEN KINEMATISCHEN EIGENSCHAFTEN	163
6.5	AUSWIRKUNG DER SYSTEMDEFIZITE AUF DAS EINSATZPOTENTIAL	164
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	167
8	LITERATURVERZEICHNIS	173
9	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	183
10	GLOSSAR	185
11	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	189
12	TABELLENVERZEICHNIS.....	192
13	ANHANG	193
13.1	EIGENSCHAFTEN EINES VR-SYSTEMS FÜR DIE VIRTUELLE EVAKUIERUNG.....	193
13.2	GRUNDLEGENDE ANFORDERUNGEN AN ANTHROPOMETRISCHES MENSCHMODELLE IN DER VIRTUELLEN EVAKUIERUNG	194
13.2.1	<i>Biomechanik - Kinematik</i>	194
13.2.2	<i>Anthropometrie</i>	195
13.2.3	<i>Simulation – Animation</i>	196
13.2.4	<i>Ergonomie</i>	197
13.2.5	<i>VR-Umgebung</i>	198
13.2.6	<i>Diverses</i>	198
13.3	ÜBERSICHT ÜBER DIE VORSCHRIFTEN DER FAA ZUR EVAKUIERUNG.....	198
13.4	EVAKUIERUNGSABLAUF.....	204
13.5	BEWEGUNGSABLÄUFE EVAKUIERUNG	205
13.6	BEWEGUNGSDATENBANK ANIPERSON – VR ANTHROPOS	209
13.6.1	<i>Postures</i>	209
13.6.2	<i>Motions</i>	209
13.7	MODELLDATEN AIREXODUS	212

1 Einführung

1.1 Motivation

Trotz der Gefahr von Terroranschlägen auf Flugzeuge wird der Flugverkehr in den nächsten Jahren weiterhin zunehmen (Abb. 1-1). Da die Zahl der Flugbewegungen stark ansteigt, werden sich auch die Absolutwerte der Flugzeugunglücke in den nächsten Jahren erhöhen. In 20 Jahren, so Prognosen, könnte es im Abstand von wenigen Tagen zu einem Unfall¹ kommen. Zur Bewältigung des ständig anwachsenden Luftverkehrsaufkommens werden Flugzeuge benötigt, deren Transportleistung gegenüber den jetzt eingesetzten Flugzeugen gesteigert werden muss. Entsprechend der Wachstumsprognosen für den Luftverkehr ist besonders auf den Langstrecken eine Verdoppelung der Transportnachfrage zu erwarten. Gegenwärtige und zukünftige Flughafenstrukturen beschränken die Flugzeu glänge. Um die hohen Passagierzahlen zu bewältigen, müssen deshalb z.B. mehrere Passagierdecks (A380) genutzt werden oder es müssen neue Rumpfstrukturen wie der Flying Wing erarbeitet werden. Der Megaliner A380 wird mit bis zu 974 Passagieren und einer Nutzung aller drei Decks ausgelegt. Das führt zu einer hohen Passagierdichte in der Kabine und am Boden bei den flugzeugspezifischen Prozessen Abfertigung, Boarding und Deboarding und bei den Notfallprozessen wie z.B. der Evakuierung.

Um eine höchstmögliche Sicherheit im Luftverkehr bei wachsenden Flugbewegungen (gegenwärtig 4,9 % Wachstum p.a., vgl. Abb. 1-1) gewährleisten zu können, ist eine permanente Überprüfung und Wartung der Fluggeräte sowie eine strikte Einhaltung der Zulassungsvoraussetzungen bei Inbetriebnahme des Flugzeuges erforderlich. Obwohl die Unfallrate der Flug-

¹ Absturz, Crash, Notlandung; vgl. [Muel02]

zeuge schon gering ist, wird von Seiten der Flugzeughersteller alles versucht, die Sicherheit stetig zu verbessern um der Zunahme der Absolutwerte von Flugzeugunglücken entgegenzuwirken und die Überlebenschancen beim Eintreten eines Unfalles oder einer Störung zu erhöhen. Die Aufmerksamkeit aktueller Forschung und Entwicklung richtet sich im Wesentlichen auf den Bereich der aktiven Luftverkehrssicherheit - der Vermeidung des Unfalles an sich. Im Bereich der aktiven Sicherheit wird an neuen Anflugverfahren, optimierten Flugsicherheitssystemen, an einem ergonomisch optimierten Cockpit, orientiert an modernsten Sicherheitstechnologien aus der Automobilbranche, und an neuen Trainingsmethoden für die Piloten gearbeitet. Doch auch mit dem technisch sichersten Flugzeug und dem sichersten Flight Management System (FMS) können Unfälle passieren. Der Mensch ist das Wesen, das bei technischen Prozessen sofort in die meisten und die kompliziertesten Wechselwirkungen mit der Umgebung eintritt. Der Mensch steuert das Flugzeug und trotz der Bemühungen der Flugzeughersteller, das Flugzeug nahezu 99,99% sicher zu machen, und den meist optimal ausgerichteten Trainingsmethoden der Fluglinien, um den Human Error zu reduzieren, ist ein möglicher Unfall nicht auszuschließen. Tritt ein Fehler auf und führt zu einem Unfall bis hin zum Totalverlust des Fluggerätes, muss dieser Unfall für den Passagier und die Cabin Crew Mitglieder (CCM) überlebensfähig sein, d.h. die Nutzlastzelle muss crashsicher und auch unter Notfallbedingungen evakuierbar sein.

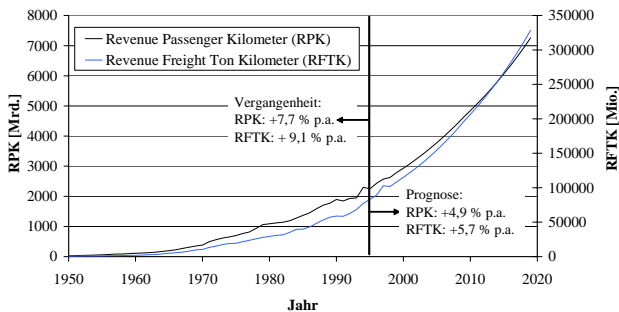


Abb. 1-1 Prognostizierte Entwicklung des Weltluftverkehrs bis 2020 [GRO97] [ICAO00]

Es muss somit auch die passive Sicherheit berücksichtigt werden, die den beteiligten Menschen vor den Auswirkungen des Fehlers bzw. des Unfalles schützt. Ziel muss sein, Passagiere und CCM während des Aufenthalts an Bord vor allen für sie gefährlichen Einwirkungen zu schützen, und im Falle einer Notsituation Sicherheit vor möglichen Bedrohungen aller Art zu schaffen. Speziell im Katastrophenfall ist die passive Kabinensicherheit von wesentlicher Be-

deutung. Sie umfasst die Evakuierbarkeit, die Brandsicherheit, Rauchentwicklung und das Crashverhalten des Flugzeugs. Oft wird ein Flugzeugcrash überlebt, aber Passagiere und CCM, die nicht schnell genug evakuiert werden, sterben an Feuer- und Rauchgaseinwirkung.

Bei der Auslegung der zukünftigen Großraumflugzeuge (A380, Flying Wing, etc.) mit bis zu 1000 Passagieren werden wegen der hohen Konzentration von Menschen auf engem Raum besondere Anforderungen an die Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen gestellt. Die hohe Passagierdichte in der Kabine und am Boden erfordert neue Maßstäbe speziell für die passive Kabinensicherheit. Am Beispiel der Evakuierung über zwei Decks lässt sich dies leicht zeigen. Durch die Unterbringung der Passagiere auf zwei übereinander liegenden Decks nimmt die Türschwelhöhe des Oberdecks gegenüber einem herkömmlichen Deck um etwa 80% zu. Um auch hier eine sichere und effiziente Evakuierung der Insassen zu gewährleisten, ist eine Optimierung des Evakuierungsvorgangs in der Kabine sowie aller beteiligter Bauteile wie Notrutschen unabdingbar. Es müssen völlig neue Evakuierungskonzepte für große Menschenmengen und neue Deckkonfigurationen erstellt werden. Da die Kabine im Wesentlichen die Schnittstelle zwischen Mensch und Technik darstellt, müssen für die Gewährleistung einer sicheren und evakuierbaren Kabine bei deren Entwicklung neben den Ingenieuren noch Psychologen und Ergonomen beitragen.

Der Mensch ist der Nutzer des Systems Luftverkehr und muss im Mittelpunkt der Entwicklung stehen. Um in diesem Sinne handeln zu können, muss man verstehen, welche Anforderungen vom Menschen resultieren und muss diese den gesamten Entwicklungsprozess transparent zugänglich machen. Hersteller von Produkten, die durch den Menschen mehr oder weniger körpernah genutzt werden, können durch die Beachtung der Körpermaße der ins Auge gefassten Nutzergruppe eine beträchtliche Qualitätssteigerung ihrer Produkte durch deren körperbezogene Dimensionierung erreichen. Der Faktor „Mensch“ muss innerhalb des gesamten Entwicklungsprozess in allen Stufen von der Requirementsphase über die Entwicklung bis hin zum Betrieb berücksichtigt werden (vgl. [FAA96]). Dafür müssen den Entwicklern und Konstrukteuren die notwendigen Hilfsmittel, Werkzeuge und Methoden zur Verfügung gestellt werden, die eine möglichst frühe Berücksichtigung der menschlichen Faktoren im Entwicklungsprozess erlauben.

1.2 Ausgangssituation

Während die Entwicklung von Flugzeugen vielfach durch computergestützte Modelle und Simulationswerkzeuge unterstützt wird, wird diese Methode für die Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) in der Kabine noch vergleichsweise wenig eingesetzt. Digital