

Schlußbericht

LUFTFAHRTFORSCHUNGSPROGRAMM 1

**FORTSCHRITTLICHES
WASSERSYSTEM**

Arbeitspaket 6.1

Vollintegrierte Tanks

| | |
|--------------------|---------------------------|
| Laufzeit: | Juli 1995 - Dezember 1998 |
| Förderkennzeichen: | WIF 9503 J |
| Verfasser: | Dr. Karin Thudt |

MAN Technologie AG
Liebigstraße 5a
85757 Karlsfeld

Telefon: (08131) 89-1803
Telefax: (08131) 89-1914

Schlußbericht

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | BESCHREIBUNG DES VORHABENS | 2 |
| 1.1 | Ziel des Vorhabens | 2 |
| 1.2 | Planung und Ablauf der Arbeiten..... | 2 |
| 2 | ERGEBNISSE DES VORHABENS | 3 |
| 2.1 | Definition der Anforderungen | 3 |
| 2.1.1 | Tankstruktur | 3 |
| 2.1.2 | Integrierter Vereisungsschutz: Heizung und Isolation | 8 |
| 2.1.3 | Füllstandsmessung und Regelung..... | 11 |
| 2.2 | Konzepterstellung Technologieübersicht | 15 |
| 2.2.1 | Tankstruktur: Auslegung..... | 15 |
| 2.2.2 | Tankintegration..... | 26 |
| 2.2.3 | Integrierter Vereisungsschutz | 32 |
| 2.2.4 | Füllstandsmessung..... | 41 |
| 2.3 | Herstellung des Technologieträgers | 45 |
| 2.3.1 | Tankstruktur | 45 |
| 2.3.2 | Integrierter Vereisungsschutz: Heizung | 47 |
| 2.3.3 | Tankisolation | 50 |
| 2.3.4 | Füllstandsmessung..... | 51 |
| 2.4 | Erprobung des Technologieträgers..... | 53 |
| 2.4.1 | Tankstruktur | 53 |
| 2.4.2 | Integrierter Vereisungsschutz | 54 |
| 2.4.3 | Füllstandsmessung..... | 57 |
| 3 | ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE | 58 |
| 4 | LITERATURVERZEICHNIS | 59 |

ANLAGEN

Anlage 1: Tankintegration; Abbildungen

Anlage 2: Integrierte Heizung; Testergebnisse

Schlußbericht

1 Beschreibung des Vorhabens

1.1 Ziel des Vorhabens

Durch Integration einer Vielzahl von Bauteilen in den Tank können die Kosten der Tankkomplettierung reduziert werden und die derzeitigen hohen Anschaffungskosten einer Vielzahl von Einzelteilen unterschiedlichster Hersteller vermieden werden.

Die Integration folgender Funktionen der Frischwasser- und Abwassertanks in die mechanische Struktur ermöglichen eine optimale Gesamtlösung:

- Füllstandsmessung
- Temperaturmessung
- Redundanter Vereisungsschutz / Vorwärmung
- Isolation
- Übertemperaturschutz

1.2 Planung und Ablauf der Arbeiten

Im Rahmen des Arbeitspaketes 6.1 Vollintegrierte Tanks wurden folgende übergeordneten Themenbereiche untersucht:

- Gewichts und Kostenoptimierung der Tankstruktur
- Integrierter Vereisungsschutz: Heizung und Isolation
- Füllstandsmessung und Steuerung

Die Arbeiten zu den drei Themenbereichen wurden wie folgt gegliedert::

Anforderungsdefinition: Abstimmung der Anforderungen unter Berücksichtigung der Gesamtvorgaben eines fortschrittlichen Gesamtkabinensystems.

Technologieübersicht: Schaffung und Pflege einer verbindlichen Datenbasis unter Einbeziehung der Airlines, Product Support Organisationen und dem Flugzeughersteller DaimlerChrysler Aerospace Airbus zur Aktualisierung aller wesentlichen Systemerfahrungen, Konfigurations- und Systemdateien.

Konzepterstellung: Entwurf von Konzepten für die Subsysteme unter Berücksichtigung der Gesamtsystemanforderungen.

Konzeptbewertung und Auswahl: Schaffung von Bewertungskriterien zur Überprüfung des Entwicklungsergebnisses des Systems und seiner Übereinstimmung mit den globalen Projektzielen.

Systemdefinition: Detaillierte Definition der optimalen Subsysteme, Auslegung und Konstruktion des Technologieträgers.

Schlußbericht

Herstellung des Technologieträgers: Nutzung und Ausbau vorhandener Funktions- und Testaufbauten zu Kosteneinsparung (Mock-up Nutzung).

Erprobung des Technologieträgers: Einbau in Test-Rigs für die Bodenerprobung.

2 Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Definition der Anforderungen

2.1.1 Tankstruktur

Baugleicher Frischwasser- und Abwassertank

Die Forderungen nach baugleichen Rohtankstrukturen beim Frischwasser- und Abwassertank begründet sich primär in einer Reduzierung der Entwicklungs- bzw. Vorrichtungskosten.

Darüber hinaus ergeben sich weitere Vorteile:

- Reduzierung der Fertigungskosten durch große Stückzahlen pro Tanktyp
- Vereinheitlichung der Tanklagerung im Flugzeug (Multiplikationsfaktor)
- Reduzierung der Ersatzteilkhaltung
- Vereinfachung der Wartung durch Reduzierung der Teilevielfalt

Mit der Vereinheitlichung des Tankdesigns ist der Nachteil verbunden, daß die Tanks nicht gewichtsoptimiert auf das jeweilige Lastenkollektiv ausgelegt werden können.

Linermaterial

Das gemeinsame Linermaterial muß sowohl das Anforderungsprofil für Trinkwassertanks als auch für Abwassertanks erfüllen.

Die einzelnen Anforderungen lauten:

Trinkwassertank:

- Trinkwasserzulassung gemäß KTW-Empfehlung
- Beständigkeit gegen Reinigungs- und Desinfektionsmittel
 - Calciumperchlorat $\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$
 - Calciumhypochlorit $\text{Ca}(\text{OCl})_2$
 - Natriumhypochlorit NaOCl
 - in der Konzentration von 50 ppm für mindestens 4 Stunden pro Desinfektion
 - 100 ppm für mindestens 1 Stunde pro Desinfektion

Schlußbericht

- Wasserstoffperoxid 50 % in Wasser mit 0,05 % Silber (Handelsname Herlisil) in der Konzentration von 150 ppm (H₂O₂) für mindestens 1 h pro Desinfektion bei einer angenommenen Desinfektionshäufigkeit von 1 / Monat
- und übliche Reinigungsmittel

Hierzu gelten folgende Regelwerke:

- Handbook on Sanitation of Airlines, 1964 Revision US-Public Health
- Code of Federal Regulations CFR 21, Chapter 1 Food and Drugs
- Gesundheitliche Bearbeitung von Kunststoffen und anderen nichtmetallischen Werkstoffen im Rahmen des Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetzes für den Trinkwasserbereich Bundesgesundheitsblatt 20 und zugehörige KTW-Mitteilungen

Abwassertank:

- Fäkalienbeständigkeit
- Beständigkeit gegen Reinigungs- und Desinfektionsmitteln
- Beständigkeit gegen Impact-Lasten verursacht durch feste Gegenstände die über das Abwassersystem entsorgt werden:
 - ganze oder zerbrochene Flaschen bis ca. 4 cl. Größe
 - Lippenstifte
 - Rasierklingen
 - Einwegrasierer
 - Knöpfe bis ca. 40 mm Durchmesser

Tankmaterial

Als Materialien für den Tank werden Faserverbundwerkstoffe gefordert. Der Werkstoff muß die Fire-Smoke Toxicity-Anforderungen gemäß ABD 0031 Chapter 7.1.3, 7.3.2 und 7.4 bzw. die FAR 23.853 7.4 erfüllen.

Tankgeometrie

Die Tank- bzw. Linergeometrie ist so zu gestalten, daß die Tankrohstrukturen mit einem automatischen Wickelverfahren hergestellt werden können.

Die dadurch bedingten Polöffnungen sind so auszulegen, daß sie später als Tanköffnungen verwendet werden können. Es soll vermieden werden, daß Tanköffnungen im zylindrischen oder im sphärischen Bereich der Tankstruktur eingebracht werden. Anschlüsse in diesen Bereichen sind besonders kosten- und gewichtsintensiv aufgrund der zusätzlich notwendigen Tankverstärkungen.

Schlußbericht

Die Öffnungsdurchmesser sollten so klein wie möglich gehalten werden, um Spannungsspitzen und somit massive Flanschanbindungen zu vermeiden.

Mit der Forderung die Tanköffnung in die Polöffnung zu integrieren, ist eine nahezu vertikale Einbaulage verbunden.

Tankanschlüsse

Die Tankanschlüsse müssen in den beiden Poldeckeln integriert werden, um die Anzahl der Tankanbindungen in den anderen Bereichen zu minimieren.

Für den Trinkwassertank werden folgende Anschlüsse notwendig:

- Befüllleitung mit einem max. Durchmesser von $\frac{3}{4}$ " gemäß Handbook on Sanitation of Airlines Die Befüllleitung und Auslaßleitung sind in einem Anschluß an der Tankunterseite zu realisieren.
- Die Rücklaufleitung muß am unteren Poldeckel angeschlossen werden. Der Anschluß sollte derart gestaltet werden, daß eine Verwirbelung des Wasserinhalts zur gleichmäßigen Wärmeübertragung begünstigt wird. Darüber hinaus sollte ein teilweise Leerlaufen des Umlaufsystems durch eine geeignete Integration der Rücklaufleitung verhindert werden.
- Die Überlaufleitung muß mindestens einen Durchmesser von $\frac{3}{4}$ " besitzen und einen Druckanstieg über den maximal zulässigem Befülldruck verhindern. Die Einbindung muß eine 100% Befüllung für die Systemdesinfektion ermöglichen. Die Anordnung der Rücklauf- bzw. Überlaufanschlüsse ist letztlich von der Anordnung der Tanks und deren Integration in das System abhängig. So könnte der Überlauf über alle Tanks geführt werden und die Füllreihenfolge mittels einer Abstufung der Rohrleitungsdurchmesser definiert werden.
- Ein Druckanschluß für die Bleed Air/Compressor-Air ist vorzusehen. Die Notwendigkeit ist abhängig von der Auslegung des Systems.
- Ein Anschluß für den Druckschalter zur Regelung der Compressorversorgung kann in den Deckel integriert werden, sollte aber vorzugsweise in der zuführenden Druckleitung integriert werden.
- Der Anschluß für den Füllstandsgeber sollte nach Möglichkeit im Deckel integriert oder auf der Tankaußenseite wartungsfreundlich angebracht werden.

Für den Waste-Tank werden folgende Anschlüsse benötigt:

- Der Waste Separator soll am oberen Poldeckel angeschlossen werden.
- Die Druckausgleichsleitung wird ebenfalls am oberen Poldeckel angeschlossen. Der Durchmesser sollte mindestens 2,5 " betragen. Die Notwendigkeit der Ausgleichsleitung ist von der endgültigen Systemkonfiguration abhängig.
- Der Spülanschluß für die Tankreinigung und für die Precharge-Befüllung soll in den Deckel integriert werden. Hierbei ist besonders auf die Zuverlässigkeit des Reinigungssystems zu

Schlußbericht

achten. Bewegliche Teile, die verschmutzungsempfindlich sind, sollen vermieden werden. (z.B. Verteilerring mit mehreren statischen Düsen)

- Die Auslaßleitung muß am unteren Poldeckel angeschlossen werden und soll einen Durchmesser von mindestens 4 “ aufweisen. Die Auslaßleitung soll gleichzeitig als Balanceleitung dienen, falls dies erforderlich ist.
- Der Füllstandsensoren ist in den oberen oder unteren Poldeckel zu integrieren. Eine Befestigung auf der Außenseite des Tanks ist ebenfalls denkbar. Auf die Wartungsfreundlichkeit ist zu achten.
- Bei der Auslegung der Tankanschlüsse ist darauf zu achten, daß die Anzahl der Tankdurchbrüche (Öffnungen) auf ein Minimum beschränkt wird und der Integrationsgrad in den Poldeckeln optimiert wird.

Tankentleerung

Die Tankentleerung muß zu 100 % gewährleistet sein, dies betrifft insbesondere den Trinkwassertank. Die Auslaßanschlüsse sind entsprechend zu positionieren und zu gestalten.

Tanklagerung

Die Tanklagerung sollte aus Gewichts- und Kostengründen am Übergang Polschale / Zylinder vorgenommen werden. Des weiteren bietet dieses Lagerungskonzept zusätzliche Befestigungsmöglichkeiten für andere Ausrüstungsgegenstände an den Halteringen.

Tankdeckelmontage mit V-Schelle

Um eine schnelle Ausrüstung der Tanks zu gewährleisten, sollte die Montage bzw. Demontage der Tankdeckel mittels V-Schelle erfolgen.

Belastungen

Für die Auslegung der Tanks sind die nachfolgenden Belastungen zu berücksichtigen. Sie basieren auf der derzeitigen Maximalforderung für den A330/340 Waste und Trinkwassertank und können sich nach Festlegung der endgültigen Flugzeugdaten noch geringfügig verändern.

Ein Großteil der Druckbelastungen basiert auf möglichen Funktions- und Bedienungsfehlern von Ventilen, die mit dem Tank in Verbindung stehen.

Der maximale Betriebsdruck für den Trinkwassertank wurde von 2,2 bar auf 4,1 bar erhöht. Damit sollten folgende Zusatzforderungen abgedeckt werden:

- Ausreichende Druckversorgung für das 2te-Passagierdeck.
- Bessere Reinigung der Toilet Bowl bei geringerem Wasserverbrauch.
- Besseres Steuerverhalten für druckabhängige Regeleinheiten im Wassersystem.

Schlußbericht

Drücke

– Außendrucke von:

- 0,069 bis -0,638 bar (-1 bis -9,25 psi) für Operating Pressure (Vacuum)
- 0,638 bar (-9,25 psi) Proof Pressure
- 0,957 bar (-13,9 psi) Collapse Pressure
- Systemunterdruck
- Ventilversagen, z.B. Überlauf bleibt offen
- Drainage mit Unterdruck

– Innendrucke von

- 0-4,1 bar (0-60 psi) für Operating Pressure
- 8,6 bar (125 psi) Proof Pressure
- 13 bar (188 psi) Burst Pressure
- Systemdruck bei Druckförderung mit und ohne Umlauf
- Ventilversagen beim Befüllvorgang z.B. Überlauf bleibt zu (125 psi)

Statische Beschleunigungen

- Forward +x = 9 g
- Backward -x = -1,5 g
- Left/Right +/-y = +/- 4,5 g
- Upward -z = -3,6 g
- Down +z = 6,6 g

Temperaturen

- operating -15°C bis +100°C Gerätetemperatur
0°C bis +100°C Wassertemperatur
- non-operating -55°C bis +85°C gem. ABD 0007
Chapter 3-2, Category A2
- minimale Temperatur (mit Eis) -30°C

Tankvolumen

Das benötigte Trinkwasser-Tankvolumen bzw. Abwasser-Tankvolumen hängt wesentlich von der Auslegung des Grauwassersystems ab. In einem herkömmlichen Wassersystem ohne Grau-

Schlußbericht

wasseraufbereitung und Grauwasserableitung über Drain Masts sind Trinkwasservolumen und Abwasservolumen gleich groß:

- Trinkwasser: 2000 Liter
- Abwasser: 2000 Liter

Wird ein geschlossenes Wassersystem ohne Grauwasserableitung über Drain Masts vorgesehen, so muß das anfallende Grauwasser in den Abwassertanks gespeichert werden. Dadurch steigt das Abwasservolumen um etwa 2/3 und das Trinkwasservolumen bleibt gleich:

- Trinkwasser: 2000 Liter
- Abwasser: 3370 Liter

Wird eine Grauwasseraufbereitung im MEGALINER vorgesehen bei der für die Toilettenspülung aufbereitetes Händewaschwasser statt Trinkwasser verbraucht wird und kein Grauwasser über Drain Masts abgeleitet wird, so beträgt das Wasservolumen:

- Trinkwasser: 1330 Liter
- Abwasser: 2670 Liter

Lebensdauer

Als Lebensdauer für die Tanks sind 20 Jahre oder 80.000 Flugstunden zugrunde zu legen.

2.1.2 Integrierter Vereisungsschutz: Heizung und Isolation

Im Folgenden werden speziell die Anforderungen an den Vereisungsschutz der Tanks angegeben.

2.1.2.1 Heizung

Die integrierte Heizung muß die Anforderungen der DA-Spezifikation 3073 M1E 0105 01 erfüllen. In der Folge werden die spezifischen Punkte für eine Integration definiert.

Integration

- Gezielte Verteilung der Heizleiter, um den Verbundaufbau so homogen wie möglich zu gestalten.
- Verwendung eines geeigneten Trägermaterials zur Konfektionierung der Heizdrähte.
- Einfache Handhabung der Matten beim Einlegen im Wickelprozeß.

Schlußbericht

- Herausführung der Anschlußleitungen zu einer Steckverbindung am Tank.

Redundanz

Es muß eine 100% Redundanz verfügbar sein

Übertemperaturschalter

Gegen Überhitzung der Tankstruktur sind an der kritischen Tankwand zwei unabhängige Übertemperaturschalter anzubringen.

Temperatursensor

Der Sensor zur Regelung der Heizung ist an der Stelle der voraussichtlich niedrigsten Tanktemperatur anzubringen

Maximal zulässige Tanktemperatur

Die maximal zulässige Temperatur beträgt 70°C.

Selbstüberwachungsfunktion mit Schutzschaltung

Die fünfminütige Abfrage von Strom und Sensorfunktion durch die flugzeugseitige Regeleinheit WIPCU muß gewährleistet sein.

Eisbildung

Die Tankheizung muß in Verbindung mit einer entsprechenden Isolation und unabhängig vom Füllstand eine Eisbildung bei -40°C Außentemperatur für die Dauer von 16 Stunden bei einer maximalen Windgeschwindigkeit von 2m/s verhindern.

Tanktemperatur

Die Heizung muß gewährleisten, daß die innere Wandtemperatur unabhängig vom Tankinhalt nicht unter +1°C absinkt.

Stromversorgung

Die Versorgung beträgt 115 VAC, 400 Hz einphasig

Heizleistung

Als maximale Heizleistung stehen 380 VA zu Verfügung.

Schlußbericht

Fire-Smoke-Toxicity

Für die Komponenten der Heizung gelten die Anforderungen nach: ABD 0031

Regeleinheit

Es wird davon ausgegangen, daß die Regelung weiterhin mittels WIPCU erfolgt.

2.1.2.2 Isolation

Eine neuartige Tankisolation soll folgende Kriterien erfüllen oder Zusatzaspekte ermöglichen:

- Keine Erhöhung der Masse ohne verbesserte Isolationswirkung; Wärmeleitfähigkeit niedriger als 0,036 W/mK
- Dicke der Isolation kleiner als 25 mm
- Keine Erhöhung der (life-cycle-) Kosten (Herstellung, Betrieb und Entsorgung) ohne verbesserte Isolationswirkung
- Luftfahrtzulassung erreichbar oder vorhanden (Kriterien vgl. FAR 25.853, ATS 1000.001, DIN 5510)
- Gute Bearbeitbarkeit
- Dauerhaltbarkeit
- Eignung für die Übernahme von Strukturfunktionen

Schlußbericht

2.1.3 Füllstandsmessung und Regelung

2.1.3.1 Füllstandsmessung im Trinkwassertank

Regeleinheit

gem. ABD 0031.

Genauigkeit der Füllstandsmessung

- Meßwertangabe von 0 % - 120 % mit 4 bis 20 mA
- Meßwertabweichung von < 3 %
- Sensor mit verschiedenen Filterkonstanten
 - - Kurzzeitmessung (z.B. Precharge - Befüllung)
 - - Langzeitmessung (z.B. Ausgleich verschiedener kurzzeitiger Fluglagenänderungen)

Interfaces zur Signalverarbeitung

- Spannungsversorgung 28 VDC
- Stromausgang: 4 bis 20 mA
- Signalausgang für Precharge

Schnittstelle zur Heizung

Interface zur Tankheizung zur Regelung der Heizleistung

Meßprinzip

Meßprinzip unabhängig von Fluglage und Beschleunigungen

BITE-Fähigkeit

Wartung

- Wartungsfreier Sensor
- Kontaktlose Messung für problemlosen Austausch

Schlußbericht

Integration

Integration im Tankdeckel oder auf der Außenseite des Tanks

2.1.3.2 Füllstandsmessung im Waste-Tank

Funktionsbeschreibung des Wastesystemes auf den Tank bezogen, am Beispiel A340

Es handelt sich um ein Vacuumtoilettensystem. An dem Waste Tank sind durchschnittlich 4-5 Toiletten über eine Wasteline angeschlossen. Beim Spülen der Toilette wird ein Ventil zur Wasteline geöffnet und die Fäkalien werden durch Differenzdruck zwischen Waste Tank und Toilette mit hoher Geschwindigkeit in den Tank befördert. Am Boden wird der Differenzdruck durch einen Vacuumgenerator erzeugt. Im Flug steht der Differenzdruck zwischen Außendruck und der Kabine zur Verfügung. Beim Eintritt der Fäkalien in den Waste Tank werden sie im Wasteseparator von der nach außen weiterströmenden Luft getrennt und im Waste Tank gesammelt.

Meßgrößen des Sensors

- Ziel ist die Ermittlung des Abwasservolumens im Waste Tank.
- Die Versorgungsspannung beträgt: 28 VDC
- Stromausgang soll 4 bis 20 mA für den Bereich des Füllstandes von 0 bis 120 % betragen
- Die Meßwertabweichung soll kleiner oder gleich 3% sein.
- Der Sensor muß für Pre-Charge und verschiedene Fluglagen unterschiedliche Filterkonstanten besitzen.

Schlußbericht

Waste Tank Spezifikation (A340)

Um die Untersuchungen im Arbeitspaket „Füllstandmessung“ parallel zum Arbeitspaket „Tankstruktur“ durchzuführen zu können, wurde zunächst ein A340 Waste Tank verwendet. Der Waste Tank ist ein gewickelter CFK-Tank mit Stahl liner. Der Stahl liner ist mit der Struktur des Flugzeuges verbunden. Das maximale Füllvolumen beträgt ca. 350 Liter. Für die Sensorik gibt es zwei Zugangsöffnungen im Tank: eine von oben und eine von unten.

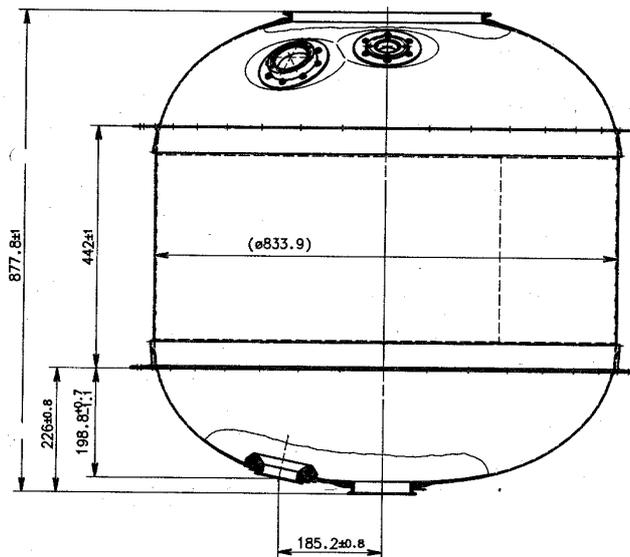


Abbildung 1: Waste Tank A340/330

Schlußbericht

Beschreibung des Mediums „Waste“

Die Fäkalien setzen sich zusammen aus:

| | |
|--------------------|------|
| Fäkalien fest : | 30 % |
| Fäkalien flüssig : | 35 % |
| Spülwasser : | 35 % |

Die festen Fäkalien werden beim Absaugen durch den Unterdruck stark zerkleinert, so daß der überwiegende Tankinhalt flüssige Konsistenz hat.

Weitere Stoffe, die mit in den Waste Tank gelangen:

| | |
|------------------|---|
| Toilettenpapier | wird beim Absaugen zerfasert |
| Papierhandtücher | gelangen z.T. unzerkleinert in den Tank |
| Damenbinden und | |
| Tampons | gelangen z.T. unzerkleinert in den Tank |

kleine Flaschen, Knöpfe, Münzen ...

Bedingungen für die Füllstandsmessung

- - Flugzeuganstellwinkel -5 bis + 20 Grad
- - Betriebstemperatur : -15 bis 70 Grad
- - Lagertemperatur Sensor -40 bis 125 Grad
- - Beschleunigung bis 1,5g in alle Richtungen
- - Druckverlauf 0 bis -600 mbar
- Nebelbildung beim Spülvorgang
- Filzbildung im Einströmbereich der Fäkalien nach längerer Betriebszeit
- Luftfeuchtigkeit von 10% bis 100%
- spezifisches Gewicht (keine einheitliche Dichte)

Schlußbericht

Besonderheit : BITE

Durch Anforderung mittels eines Testsignals soll der aktuelle Sensor-Meßwert um mindestens 4% erhöht werden. Ziel ist die Überprüfung der kompletten Sensorelektronik.

Ist-Probleme

- Der jetzige Sensor wird durch Feuchtigkeitseinwirkung zerstört.
- Das jetzige Meßprinzip ist abhängig von Fluglagen und g-Lasten
- Der jetzige Sensor muß durch externer Filterung mit Hilfe des VSC´s korrigiert werden (Flush, Fluglagen)

Wartungsanforderungen

- Wartungsfreier Sensor
- Anordnung der Sensoren außerhalb des Tanks, d.h. außerhalb des Mediums
- Austausch bei Defekt mit vollem Tank möglich

2.2 Konzepterstellung Technologieübersicht

2.2.1 Tankstruktur: Auslegung

Zur parametrischen Auslegung der Trinkwasser-und Abwassertanks wurde ein Rechenprogramm erstellt.

Annahmen und Randbedingungen zur parametrischen Tankauslegung waren:

- Beulen eines orthotropen Zylinders unter Außendruck nach J.R. Vinson und R.L.Sierakowski
- Materialwerte: GFK und CFK
 - E-Modul: GFK: E1 in Axialrichtung = 18 100 MPa
 - E2 in Umfangsrichtung = 38 100 Mpa
 - CFK E1 in Axialrichtung = 43 000 MPa
 - E2 in Umfangsrichtung =145 000 Mpa
- Liner:
 - Edelstahl
 - Dicke konstant
- Für Waste Tank Auslegung wurde eine mittlere Wandstärke angenommen für die Annahmen:
 - Außendruck: -1,0 bar
 - Tankdome als Halbkugeln

Schlußbericht

- Tankmasse ohne Anschlüsse
- Monolithischer Aufbau

Die Ergebnisse der Tankauslegung sind in Abbildung 2 bis Abbildung 11 zusammengefaßt.

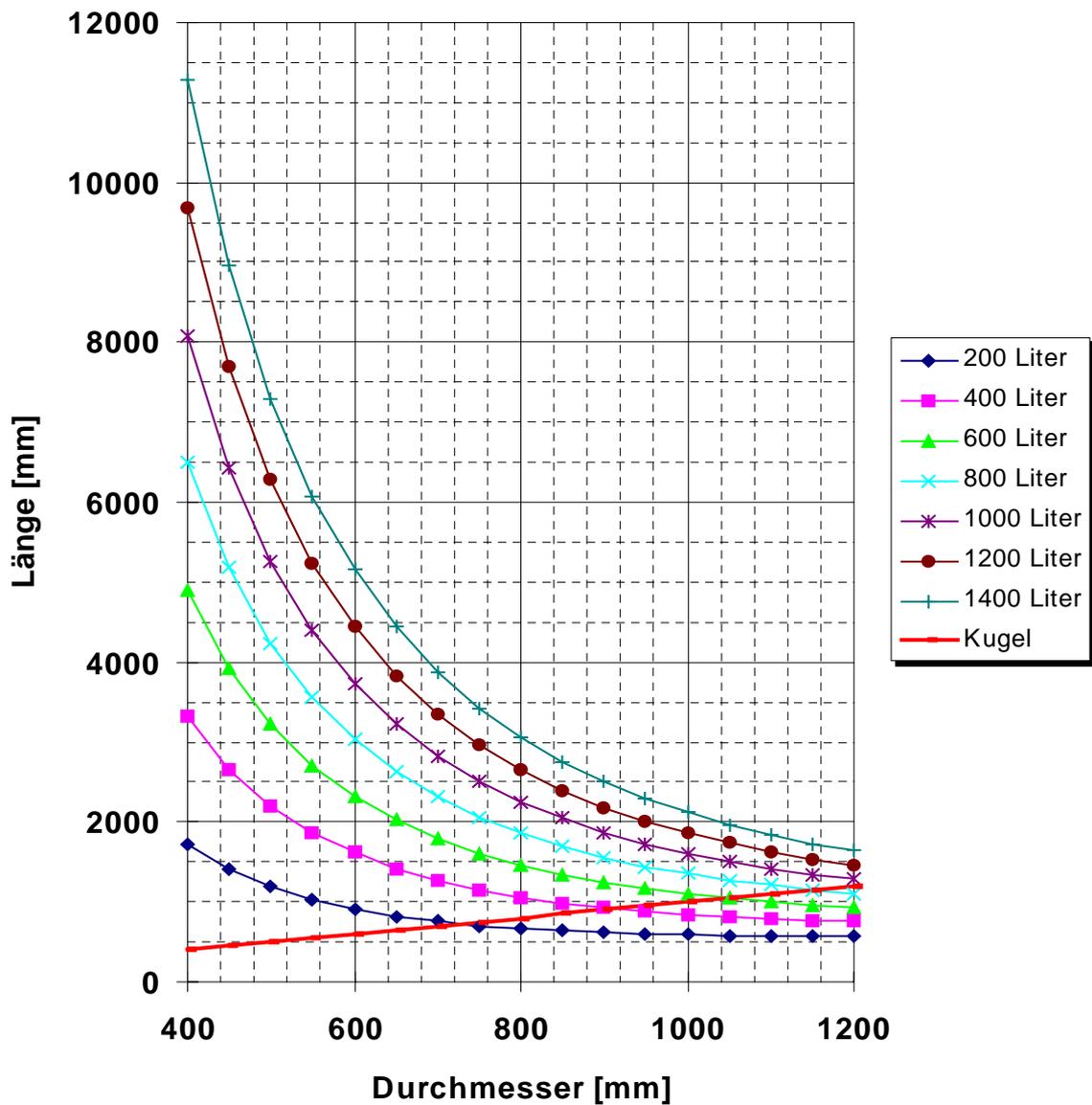


Abbildung 2: Tankdimension in Abhängigkeit vom Volumen

Schlußbericht

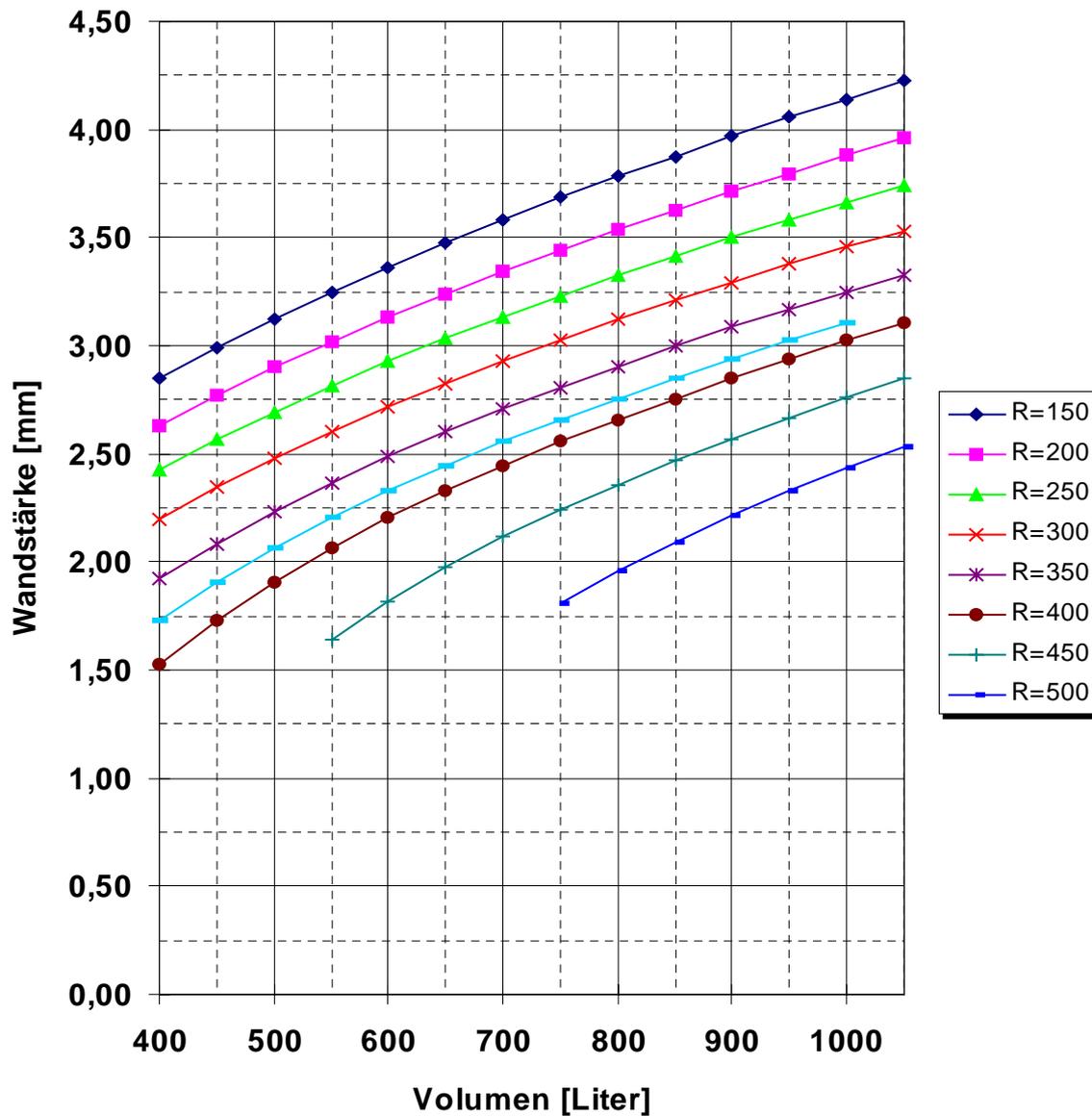


Abbildung 3: CFK-Trinkwassertank
Wandstärke in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

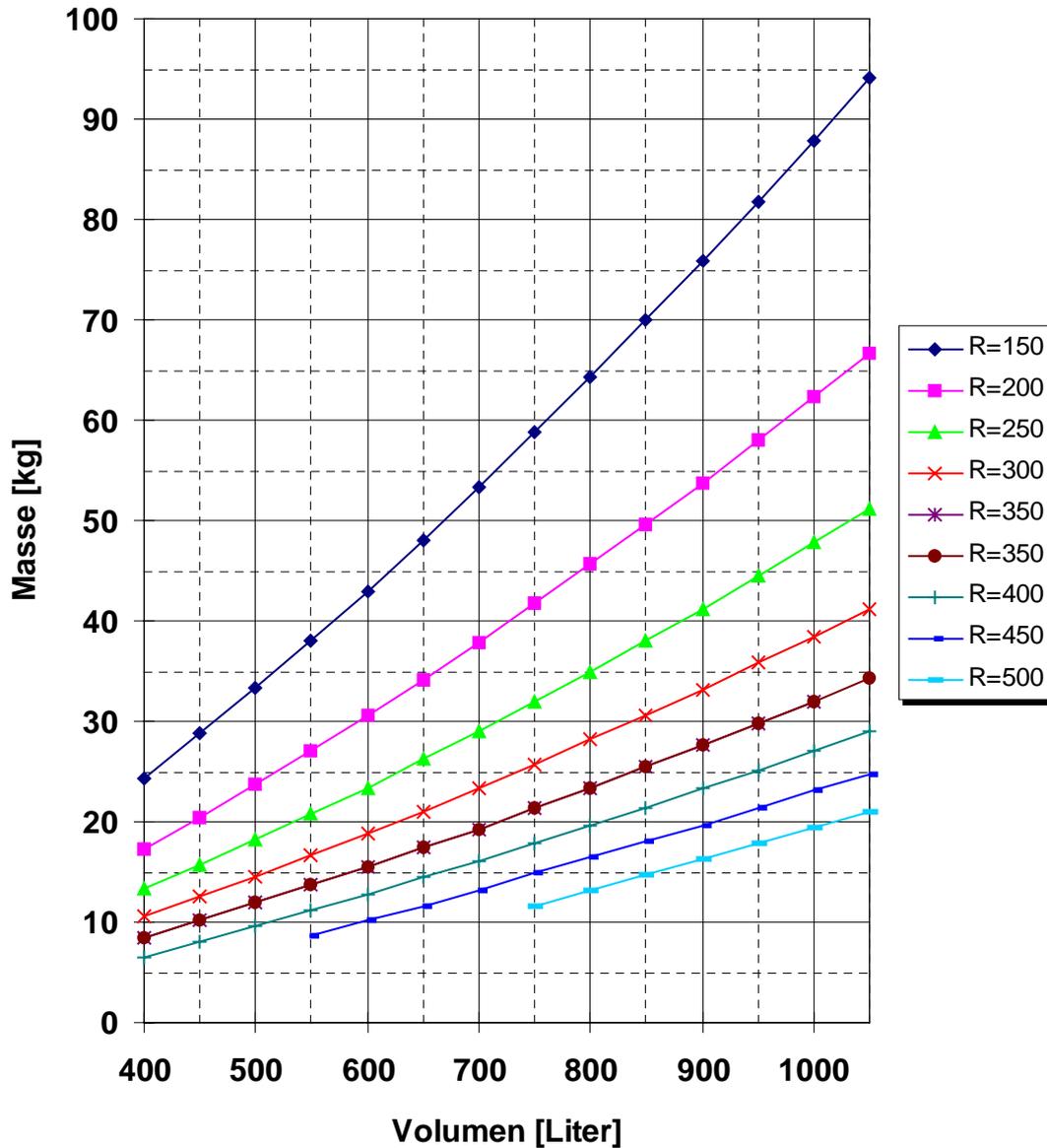


Abbildung 4: CFK-Trinkwassertank
 Tankmasse in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

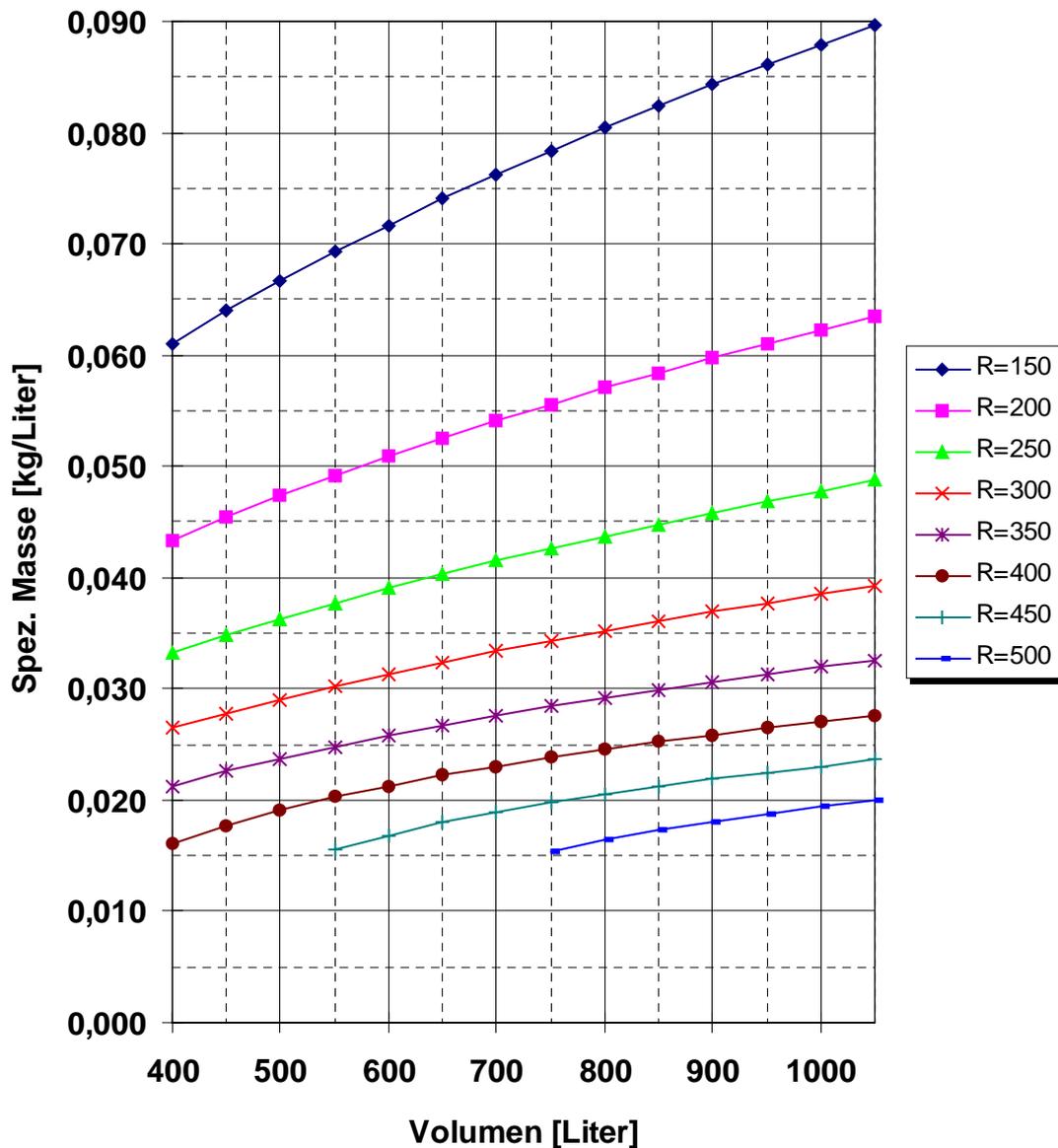


Abbildung 5: CFK-Trinkwassertank
Spezifische Tankmasse in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

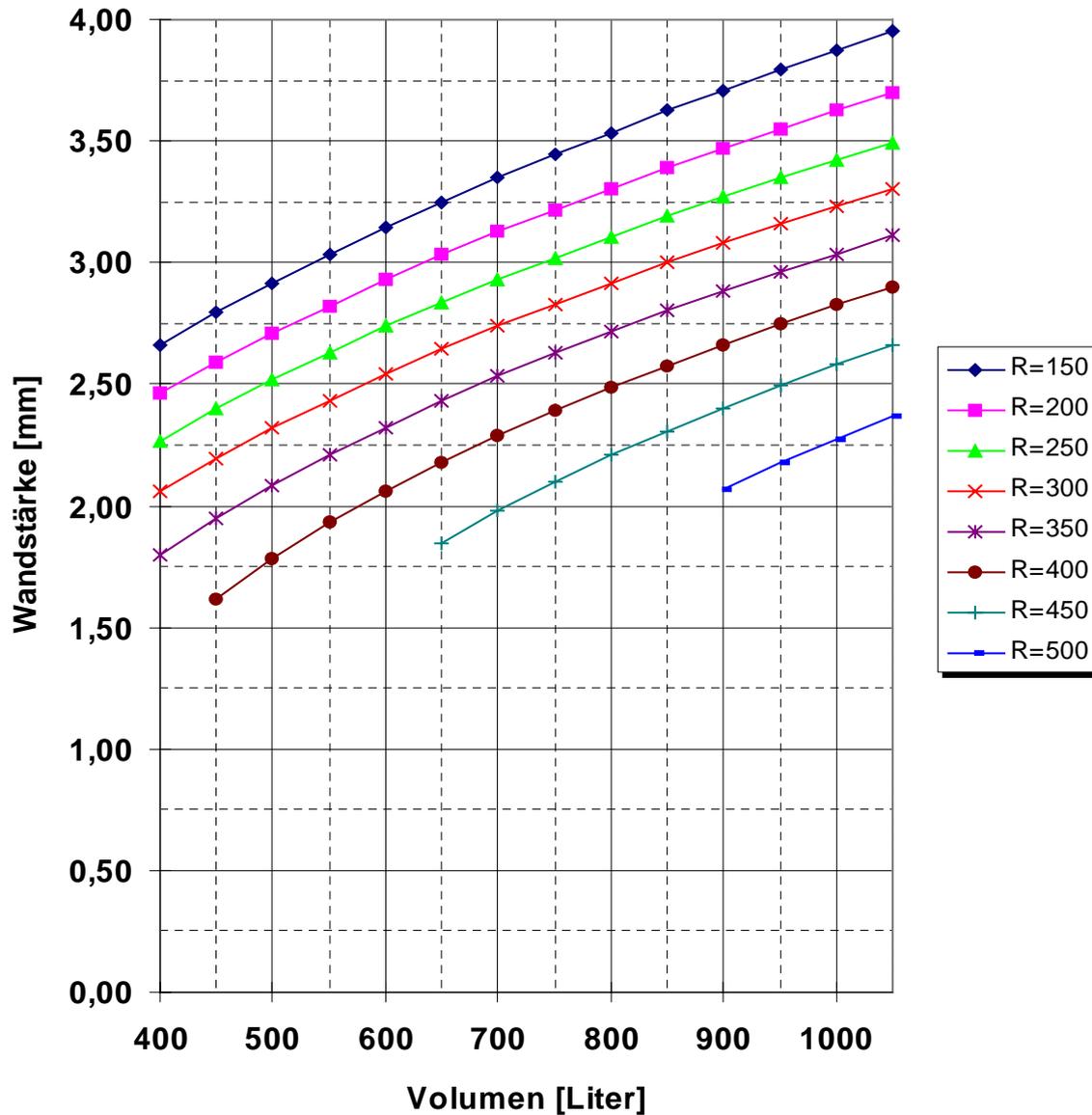


Abbildung 6: CFK Waste Tank
 Wandstärke in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

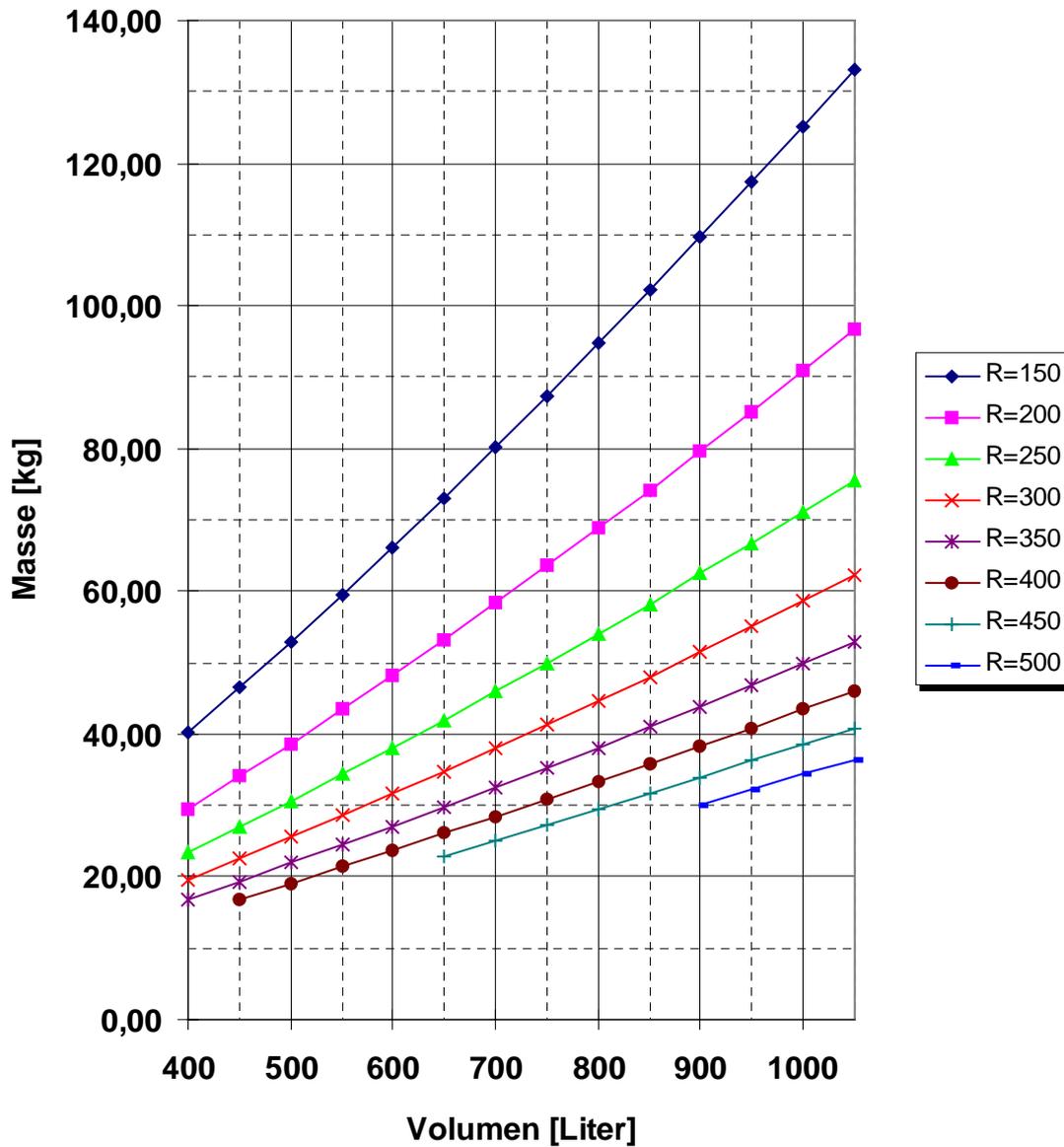


Abbildung 7: CFK Waste Tank
Tankmasse in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

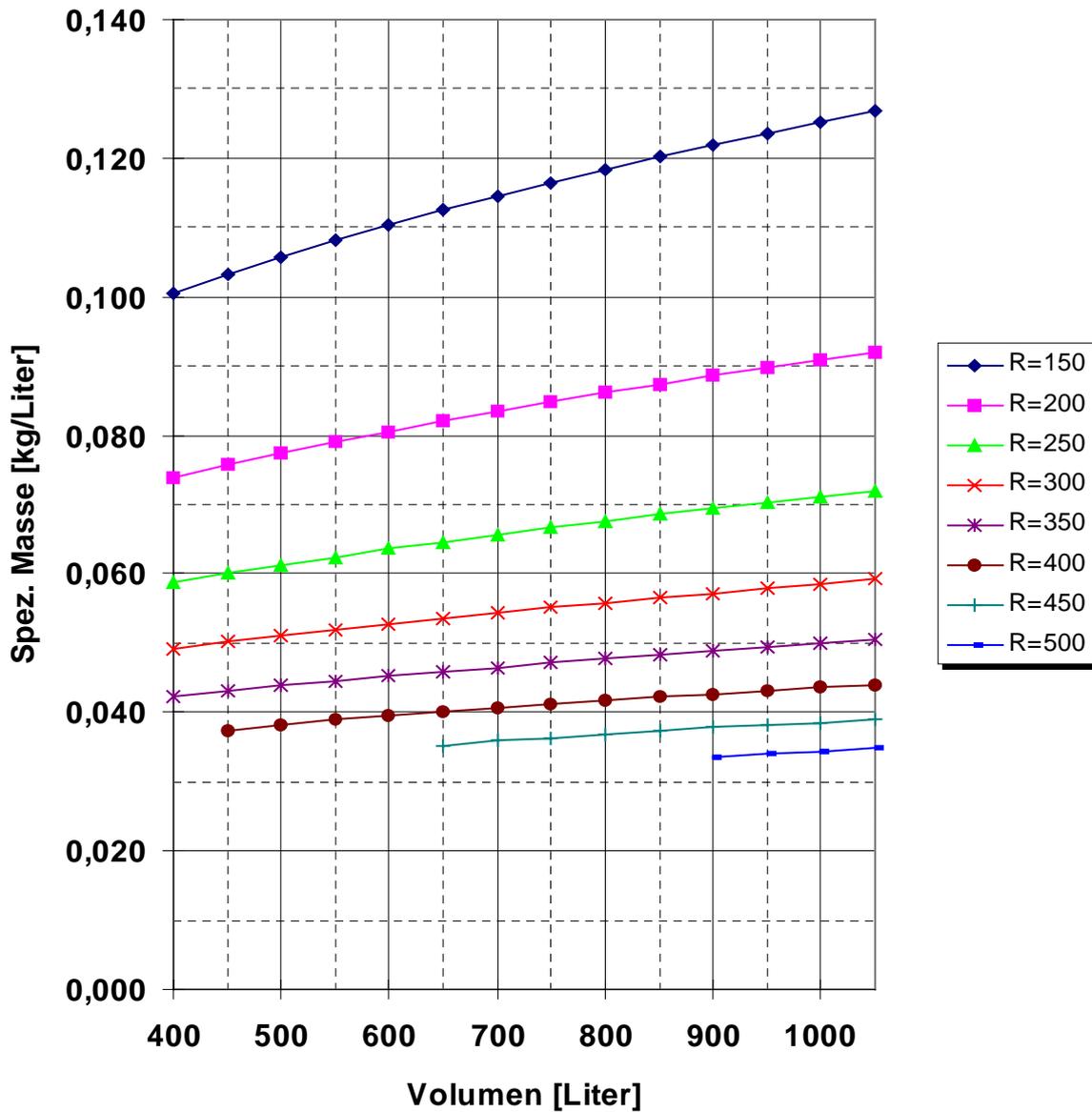


Abbildung 8: CFK Waste Tank
 Spezifische Tankmasse in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

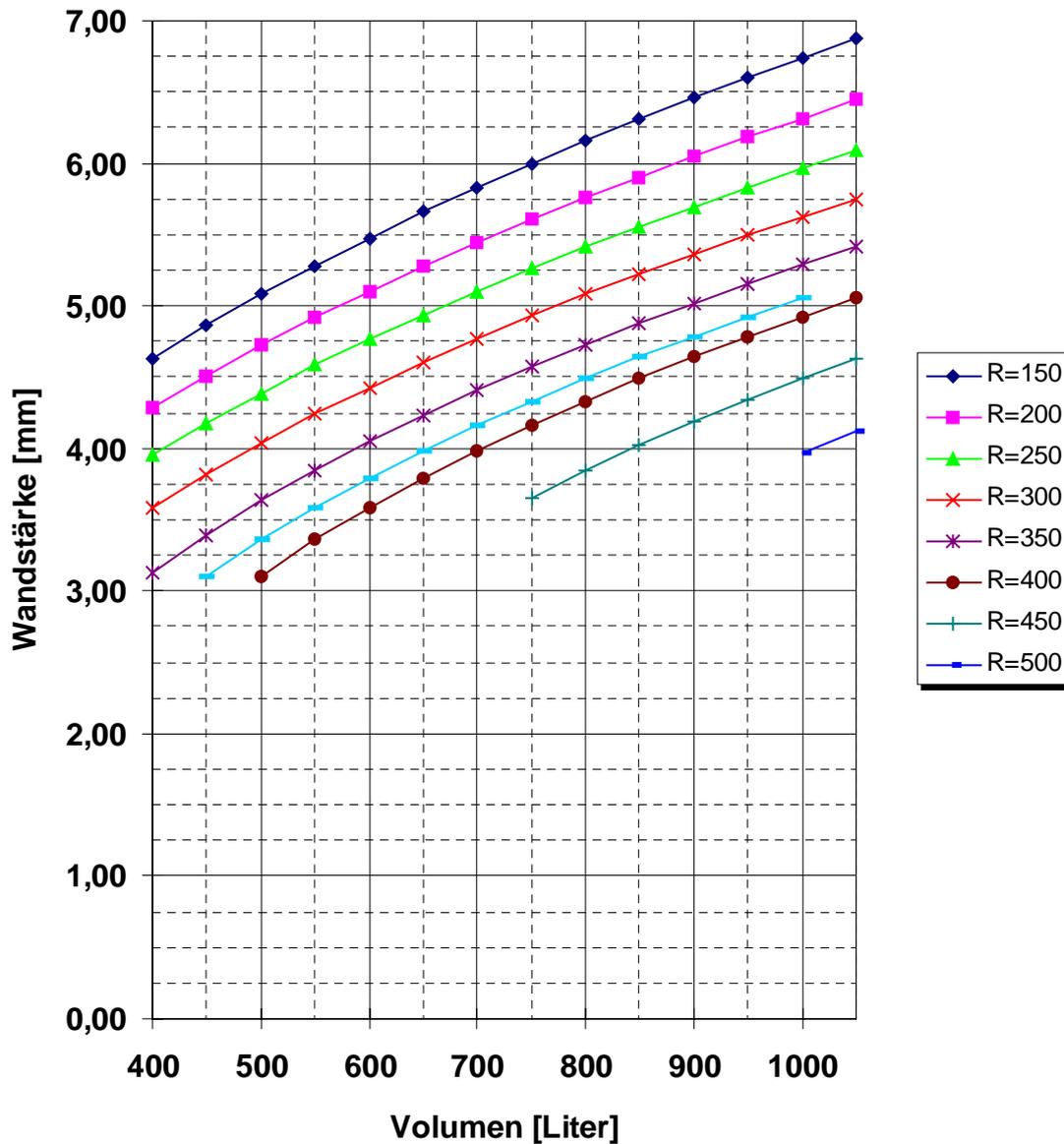


Abbildung 9: GFK-Trinkwassertank
 Wandstärke in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

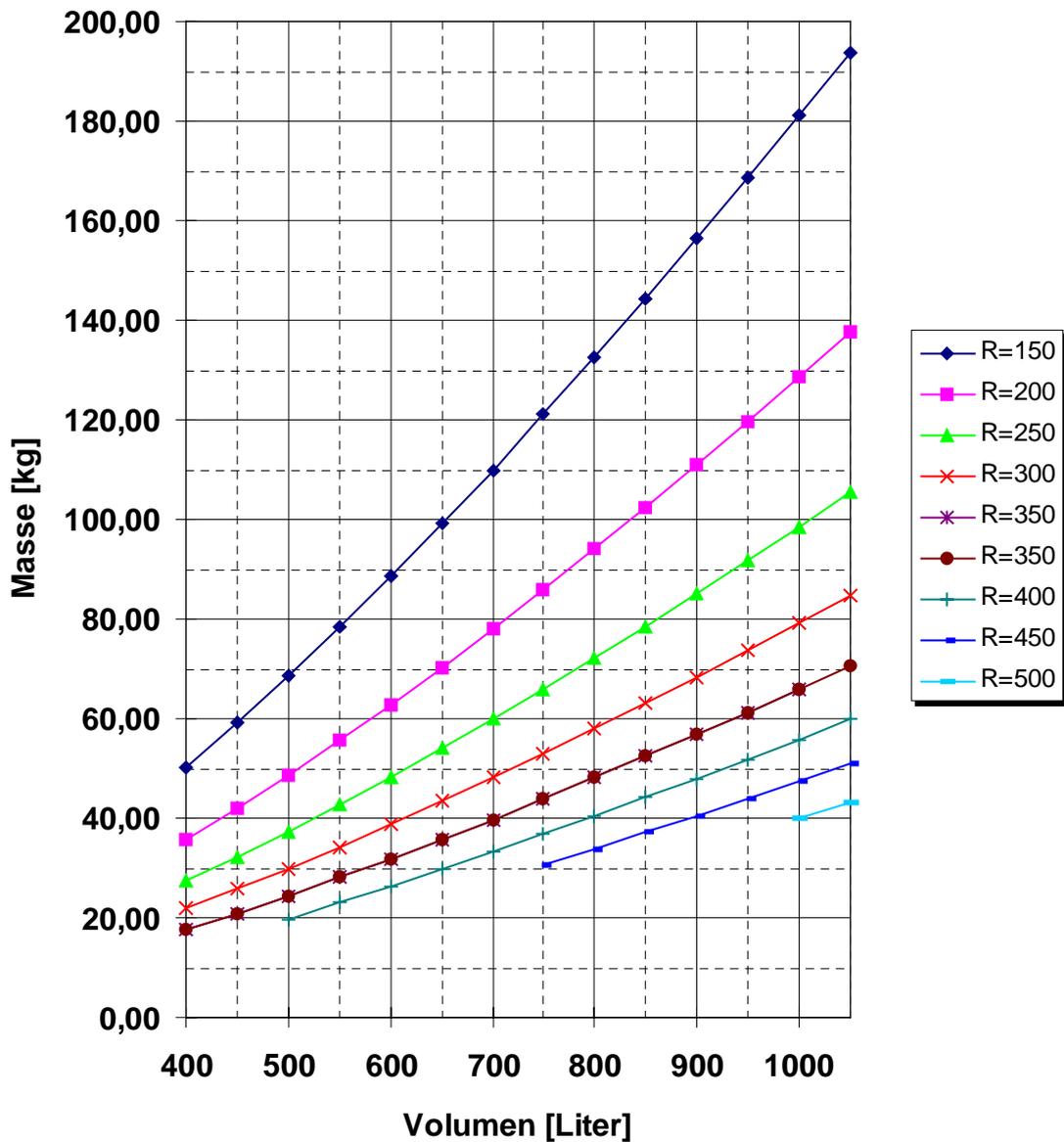


Abbildung 10 GFK-Trinkwassertank
 Tankmasse in Abhängigkeit von Volumen und Radius

Schlußbericht

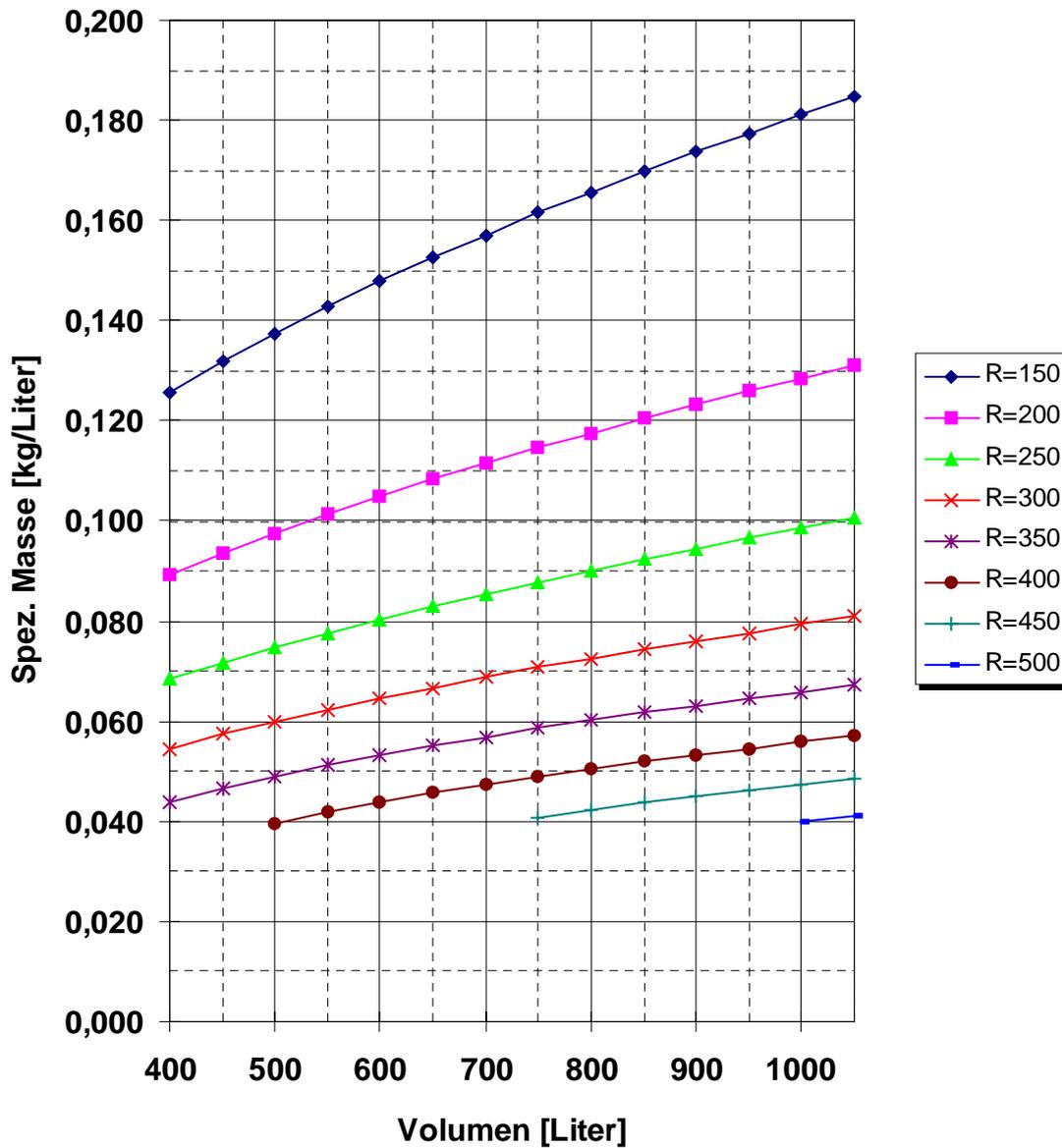


Abbildung 11 GFK-Trinkwassertank
 Spezifische Tankmasse in Abhängigkeit von Volumen
 und Radius

Schlußbericht

Ergebnisse der parametrischen Tankauslegung

Mit Hilfe der parametrischen Untersuchung der Tankauslegung kann die gewichtsoptimale Tankgeometrie eines Trink –und Abwassertanks mit gegebenem Volumen einfach bestimmt werden.

- Unter Berücksichtigung des Domeinflusses nimmt die Wandstärke eines zylindrischen CFK - Trinkwassertanks nimmt mit steigendem Volumen bei gleichem Radius stark zu. Sie beträgt z.B. für einen 400 Liter Tank mit einem Radius von 400 mm nur 1,50 mm und für einen 1000 Liter Tank und gleichem Durchmesser 3,10 mm. Die Wandstärke eines 1000 Liter Tanks kann durch Vergrößerung des Radius von 400 auf 500 mm von 3,10 mm auf 2,4 mm reduziert werden.
- Entsprechend nimmt die Masse des CFK - Tanks mit steigendem Radius ab. So kann z.B. die Masse eines 1000 Liter Tanks mit einem Radius von 150 mm von 88 kg auf 21 kg reduziert werden, wenn der Radius des Tanks 500 mm beträgt.
- Die Masse eines 400 Liter Trinkwassertanks aus CFK mit annähernd gleicher Geometrie wie ein A340 - Abwassertank beträgt nur ca. 9 kg
- Ein A340-Abwassertank ist aufgrund des Stahl liners schwerer und wiegt ohne Anschlüsse ca. 17 kg.
- Die spezifische Masse eines GFK-Trinkwassertanks ist etwa doppelt so hoch wie die eines CFK-Tanks.

2.2.2 Tankintegration

In der Anlage 1 „Tankintegration: Abbildungen“ sind die Konstruktionszeichnungen die im Rahmen der Tankintegrations-Untersuchung durchgeführt wurden, enthalten.

In Absprache mit Dasa Airbus wurde der Einbauort für Trinkwasser- und Abwassertanks im Heck festgelegt. Die Geometrie und angenommenen Abmessungen des verfügbaren Einbauraums sind in Abbildung 1 bis 3 (Anlage 1) dargestellt.

Die Tankintegrations-Untersuchung wurde mit folgendem Ziel durchgeführt:

- Um zu prüfen ob der vorgesehene und spezifizierte Einbauraum ausreicht
- Um eine geeignete Tankkonfiguration zu definieren

Aus Gründen der Redundanz wurde festgelegt, daß sowohl das Trinkwassersystem als auch das Abwassersystem aus mindestens zwei unabhängigen Subsystemen bestehen soll. Es wurde daher je eine linke und eine rechte spiegelsymmetrische Systemhälfte definiert.

Das Innenvolumen der Tanks wird vom benötigten Wasservolumen (Tankkapazität) und dem Füllgrad der Tanks bestimmt. In erster Näherung wurde ein Füllgrad von 91% angenommen. Die Anforderungen an Trinkwasser- und Abwasser- Tankvolumen in Abhängigkeit vom Wassersystem-Konzept sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt.

Das geforderte Trinkwasser-und Abwassertankvolumen hängt wesentlich davon ab, welches Grauwasser-Systemkonzept im Megaliner realisiert wird.

Schlußbericht

Ein „geschlossenes“ Wassersystem ohne Ableitung von Grauwasser über Drain Masts erfordert grundsätzlich ein größeres Abwassertankvolumen als ein „offenes“ System mit Grauwasser-ableitung.

Durch die Grauwasseraufbereitung kann jedoch ein Drittel der benötigten Frischwassertankkapazität eingespart werden.

In einem geschlossenen System mit Grauwasseraufbereitung für die Toilettenspülung ist daher das benötigte Gesamtvolumen von Trink- und Abwassertanks gleich groß wie in einem herkömmlichen offenem Wassersystem (Kapitel 2.1.1 Definition der Anforderungen Tankstruktur) und beträgt: 4396 Liter für das gesamte Flugzeug bzw. 2198 Liter pro Systemhälfte.

Je nach Systemspezifikation müssen pro Flugzeughälfte entweder:

- 2198 Liter Tankvolumen für ein offenes System ohne Grauwasseraufbereitung oder ein geschlossenes System mit Grauwasseraufbereitung
 - oder 2945 Liter Tankvolumen für ein geschlossenes System ohne Grauwasseraufbereitung
- untergebracht werden.

Von DA wurde der Heckbereich vor dem Druckspant als bevorzugter Einbauraum für die Tanks spezifiziert. Der Raum hat eine Länge von rund 4000 mm und eine maximale Höhe von 2115 mm, die zum Druckspant hin auf 1060 mm abnimmt. Dieser Raum wird durch Spante mit einer Höhe von 300 mm und einen Motageabstand für die Installation der Tanks von 200 mm reduziert. (Anhang 1 Tank-Einbauuntersuchung Abbildung 1 bis 3).

Wassertanks mit einer ähnlichen Geometrie wie der bestehende A340 Abwassertank haben folgende Vorteile:

- Das Verhältnis von Durchmesser und Höhe liegt mit 0,95 sehr nahe bei 1. Dadurch ist die Wandstärke eines CFK Trinkwassertanks mit 1,5 mm sowie die entsprechende spezifische Masse mit 0,016 kg/ Liter auf ein Minimum reduziert.
- Die Fertigungsvorrichtungen zur Herstellung der Tanks bestehen bereits und können genutzt werden. Dadurch können Entwicklungs- und Herstellungskosten erheblich gesenkt werden.

Aus diesen Gründen wurde die Abwassertank Geometrie für die Einbauuntersuchung als Ausgangsbasis zugrunde gelegt. In Abbildung 4 (Anlage 1) sind die Abmessungen des Abwassertanks angegeben.

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Schlußbericht

| Systemkonzept | Wasservolumen | Tank- innenvolumen | Tankinnenvolumen pro Systemhäfte |
|--|---------------|-----------------------|-------------------------------------|
| | Liter | Liter | Liter |
| mit Drain Masts ohne Grauwasseraubereitung | | | |
| ▪ Trinkwasser | 2000 | 2198 | 1099 |
| ▪ Abwasser | 2000 | 2198 | 1099 |
| Gesamt | 4000 | 4396 | 2198 |
| ohne Drain Masts ohne Grauwasseraubereitung | | | |
| ▪ Trinkwasser | 2000 | 2198 | 1099 |
| ▪ Abwasser | 3360 | 3692 | 1846 |
| Gesamt | 5360 | 5890 | 2945 |
| ohne Drain Masts mit Grauwasseraubereitung | | | |
| ▪ Trinkwasser | 1320 | 1450 | 725 |
| ▪ Abwasser | 2680 | 2945 | 1473 |
| Gesamt | 4000 | 4395 | 2198 |

Tabelle 1: Trinkwasser- und Abwasser- Tankvolumen in Abhängigkeit vom Wassersystem-Konzept

Schlußbericht

| Tankkonfiguration Konzept | Abbildung in Anlage 1 | Maximal integrierbares Tankvolumen pro Flugzeughälft e [Liter] | Bemerkung |
|--|--------------------------|--|---|
| Stehende Tanks Durchmesser: 830 mm Höhe: unterschiedlich | 5 und 6 | 1800 | Das integrierbare Tankvolumen ist für kein Wassersystemkonzept ausreichend. |
| Stehende Tanks Durchmesser: 950 mm Höhe: unterschiedlich | 7 und 8 | 2235 | <p>Das integrierbare Tankvolumen ist nur für ein Wassersystemkonzept mit Drain-Mast oder mit Grauwasseraufbereitung ausreichend</p> <p>Es wurde nur ein Tank mit Waste-Separator vorgesehen</p> <p>Der hintere Abwassertank und die zwei Trinkwassertanks sind für Wartungsarbeiten schlecht zugänglich</p> |
| Stehende Tanks Durchmesser: 830 mm und 1100 mm: Höhe: unterschiedlich | 9 und 10 | 2455 | <p>Das integrierbare Tankvolumen ist nur für ein Wassersystemkonzept mit Drain-Mast oder mit Grauwasseraufbereitung ausreichend</p> <p>Es wurde zwei Tanks mit Waste-Separator vorgesehen</p> <p>Die hinteren Abwassertanks sind für Wartungsarbeiten schlecht zugänglich</p> |

Schlußbericht

| Tankkonfiguration Konzept | Abbildung in Anlage 1 | Maximal integrierbares Tankvolumen pro Flugzeughält e [Liter] | Bemerkung |
|--|--------------------------|---|--|
| Ein stehender Abwassertank Ein liegender Abwassertank Ein liegender Trinkwassertank Durchmesser: 830 mm Länge Einbauraum: 3882 mm | 11 und 12 | 2970 | Das integrierbare Tankvolumen ist für jedes Wassersystemkonzept ausreichend Es wurde nur ein stehender Tank mit Waste-Separator vorgesehen Das Trinkwassertankvolumen ist überdimensioniert, das Luftpuffervolumen des Abwassertanks ist dagegen knapp dimensioniert |
| Ein stehender Abwassertank, ein liegender Abwassertank ein liegender Trinkwassertank Durchmesser: 830 mm Länge Einbauraum: 3492 mm | 13 und 14 | 2190 | Das integrierbare Tankvolumen ist nur für ein Wassersystemkonzept mit Drain-Mast oder mit Grauwasseraufbereitung ausreichend Es wurde nur ein stehender Tank mit Waste-Separator vorgesehen Das Luftpuffervolumen des Abwassertanks ist knapp dimensioniert |
| Ein stehender Abwassertank , ein kegelförmiger Abwassertank, ein liegender Trinkwassertank Länge Einbauraum: 3944 mm | 15 und 16 | 3180 | Das integrierbare Tankvolumen ist für jedes Wassersystemkonzept ausreichend Die Fertigungskosten für den kegelförmigen Abwassertank sind hoch |

Schlußbericht

| Tankkonfiguration Konzept | Abbildung in Anlage 1 | Maximal integrierbares Tankvolumen pro Flugzeughälfte [Liter] | Bemerkung |
|---|--------------------------|--|--|
| Ein stehender Abwassertank, ein konturnaher, druckloser Abwassertank ein liegender Trinkwassertank,; Länge Einbauraums: 3968 mm | 17 und 18 | 3390 | <p>Das integrierbare Tankvolumen ist für jedes Wassersystemkonzept ausreichend</p> <p>Die Fertigungskosten für den konturnahen Abwassertank sind hoch</p> <p>Der konturnahe Tank ist drucklos. Der passive Tank wird für beide Systemhälften genutzt.</p> <p>Es ist eine Abwasserpumpe vom kleinen zum großen Tank notwendig</p> |

Tabelle 2: Bewertung der untersuchten Tankkonzepte

Diskussion der Ergebnisse

- Der von DA spezifizierte Einbauraum ist für die Integration kosten- und gewichtsoptimierter Tanks mit A340 Abwassertank-Geometrie nicht ausreichend, unabhängig davon welches Wassersystemkonzept realisiert werden soll.
- Stehende Tanks mit einem größeren Durchmesser von 950 mm könnten in einem System mit Drain Masts oder mit Grauwasseraufbereitung eingesetzt werden. Nachteilig sind jedoch die große Anzahl der Tanks (5 pro Flugzeughälfte) und die schlechte Zugänglichkeit der hinteren Tanks.
- Die Konfiguration mit einem stehenden und einem liegenden Abwassertank sowie einem liegenden Trinkwassertank kann für jedes Wassersystemkonzept realisiert werden. Diese Konfiguration bietet folgende Vorteile:
 - es werden nur 3 Tanks pro Flugzeughälfte benötigt
 - die Tanks sind aus CFK im Wickelverfahren herstellbar

Schlußbericht

- die Tanks müssen druckstabil gebaut werden ohne schwer zu sein
- ein Teil der Fertigungsvorrichtungen ist bereits vorhanden

Der verfügbare Raum wird durch zylindrische Tanks nicht optimal ausgenutzt. Wenn das Auswahlkriterium Raumausnutzung sehr hohe Priorität hat, müssen Tankkonfigurationen mit einem kegelförmigen oder einem konturnahen Tank in Betracht gezogen werden.

2.2.3 Integrierter Vereisungsschutz

2.2.3.1 Heizung

Umsetzung der Anforderungen

Die Umsetzung der von DASA-Airbus gestellten Anforderungen in (Abschnitt 2.1.2) wird im Folgenden beschrieben.

Die Heizung wird im Wickelprozeß des Tanks zwischen den Längs- und Umfangslagen im zylindrischen Bereich integriert. Die Tankfügestelle erfordert eine zweiteilige Heizung.

Zur besseren Flexibilität wird eine Litze verwendet werden. Die Litze muß isoliert sein.

Die Anschlüsse werden etwa in der Tankmitte neben der Fügestelle aus dem Verbund herausgeführt und in einer Verteilerdose zusammengefaßt. Die kurzen Litzenenden benötigen Abweiskappen für die Faserablage..

Zur besseren Handhabung und Vermeidung von Schäden wird der Heizleiter auf einer dünnen Glasfasermatte konfektioniert. Der Heizleiter wird dehnungsverträglich in kurzen Windungen angeordnet. Die Matten müssen einen Sicherheitsabstand zur Tankschnittstelle besitzen. Das Positionieren der Matten orientiert sich an der unteren Mantellinie des Tanks und den festgelegten Axialabständen zu den Pol-Stirnflächen. Die Positionen der unteren Tanköffnungen sind bereits bei der Verlegung des Heizleiters auf der Matte berücksichtigt.

Die Matten werden wannenförmig über ca. 180° angeordnet. (Abbildung 12)

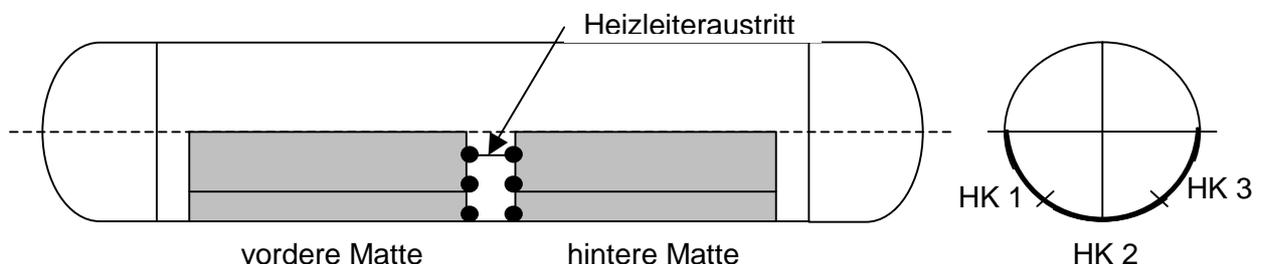


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Heizmatten und Heizkreise (HK 1, 2 und 3)

Schlußbericht

Die Heizung ist in Längsrichtung in drei parallele Stromkreise aufgeteilt. Der Heizleiter wird dehnungsverträglich in kurzen Windungen angeordnet. Die Positionen der unteren Tanköffnungen sind bereits bei der Verlegung des Heizleiters auf der Matte berücksichtigt.

Vor dem Überwickeln wird zur Fixierung der Matten die Wicklung mit einem Kevlarroving wendelförmig umschlungen.

Die Verschaltung der Heizlitzen erfolgt nach der Tankmontage.

Redundanz

Bei Ausfall eines der drei parallel geschalteten Kreise reicht die Energieeinbringung über die verbleibenden zwei Kreise, um die Wassertemperatur nicht unter +1°C absinken zu lassen. Die Begründung liegt in der Positionierung der Heizung in der unteren Tankschale direkt am Medium. Die Einschaltdauer der Heizung nimmt allerdings zu.

Aufgrund der Integration der Heizung sind die Wärmeverluste des Systems geringer. Unter Beibehaltung der Heizleistung kann der Ausfall eines Heizkreises in Kauf genommen werden.

Übertemperaturschalter

Es wird nur ein 65°-Wächter eingesetzt, wobei jederzeit auf das bisherige Konzept mit einem Temperaturbegrenzungsschalter pro Heizkreis erweitert werden kann. Die Schaltelemente werden auf der Trägermatte positioniert und mit eingewickelt.

Temperatursensor

Zur Steuerung der Heizung wird ein Temperatursensor außerhalb des Heizbereiches aber noch unter der Wicklung angeordnet. Bei Integration in die Tankwandung ist es sinnvoll, aus Redundanzgründen zwei Sensoren anzuordnen.

Maximal zulässige Temperatur

Die Tankstruktur kann Temperaturen bis 120°C widerstehen. Wegen Dichtungen und Adapterbauteilen wird jedoch die bisherige Begrenzung bei 70°C beibehalten.

Selbstüberwachungsfunktion mit Schutzschaltung

Es ist zu prüfen, ob das Temperaturwächter-Prinzip in bewährter Ausführung unverändert beibehalten, oder durch eine andere Absicherung ersetzt werden kann. Bei weiterführenden Untersuchungen wird die vorhandene Schutzschaltung genutzt.

Schlußbericht

Eisbildung

Die effektivere Anordnung der Heizung im unteren Tankbereich gewährleistet die Verfügbarkeit von Wasser. Voraussetzung ist die Ummantelung des Tanks mit der bestehenden oder einer gleichartigen Isolation.

Unter Beibehaltung der bestehenden flugzeugseitigen Energieversorgung sowie dem besseren Wärmeübergang durch Integration der Heizung in den Verbund soll bei gleicher Isolation ein größerer Schutz gegen Eisbildung erreicht werden.

Stromversorgung

Die flugzeugseitige Versorgung wird unverändert beibehalten: 115 VAC, 400 Hz einphasig.

Heizleistung

Der Widerstand der Heizung wird so ausgelegt, daß der maximale Strom den bisherigen Rahmen von ca. 1,15 Ampere nicht überschreitet. Die Heizleistung beträgt 380 VA.

Fire-Smoke-Toxicity

Der isolierte Heizleiter, die Trägermatte sowie die Sensoren, Schalter und Steckverbindungen müssen die Anforderungen der ABD 0007 erfüllen.

Regeleinheit

Die WIPCU wird unverändert beibehalten.

2.2.3.2 Tankisolation

Die Herstellungstechnik „Wickeln“ für Wassertanks erlaubt über das bisher genutzte Potential hinaus eine erweiterte Integration eines Heizsystems in die Tankwand. Die aufzuwendende Energie für den Schutz gegen Einfrieren kann durch die Nähe der Heizung zum Medium Wasser somit auf ein Minimum reduziert werden. Zusätzlich soll eine Modifikation der Isolation die Wirtschaftlichkeit von Wassersystemen erhöhen. Möglichkeiten hierzu sind im Folgenden beschrieben.

Schlußbericht

| Hersteller | Typ (Werkstoff) | Raum- gewicht [kg/m ³] | Wärme Leitzahl bei 15°C [W/mK] | Dicke für gleiche Isolation wie Re- ferenz [mm] | Masse für gleiche Isolation wie Re- ferenz [kg] | Brand- verhalten erfüllt Norm | Luft- fahrt- zulas- sung | Bemerkungen, Formbarkeit |
|-------------------------------------|---|--|---|---|--|--|-----------------------------------|--|
| MINERALFASER- WERKSTOFFE | | | | | | | | |
| Referenz (ESW) | DAN88B20 (GF-Wolle) DAN89B (PE- Gewebe) | 24,1 | 0,036 (MT- Messung) | 25,0 | 2,8 | FAR 25.853 ATS 1000.001 | ja | Serienmaterial weich, beliebig formbar beim Einbau von 40,3 auf 25mm verdichtet |
| Fiberfrax | Matte | 64 | 0,035 | 24,3 | 7,2 | | errei- chbar | Hitzeschutz- & Brandschutz-Material, gut formbar |
| Fiberfrax | Platte | 128 | 0,023 | 16,0 | 9,5 | | errei- chbar | Hitzeschutz- & Brandschutz-Material, bedingt formbar |
| Fiberfrax | sprayable | 120 | 0,035 | 24,3 | 13,6 | | errei- chbar | Hitzeschutz- & Brandschutz-Material, beliebig formbar |
| Minileit | | 150 | 0,022 | 15,3 | 10,7 | | errei- chbar | Hitzeschutz- & Brandschutz-Material, bedingt formbar |
| Vermicu- lite | Glimmer, expandiert | 70 | 0,051 | 35,4 | 11,5 | | errei- chbar | Hitzeschutz- & Brandschutz-Material, bedingt formbar |
| SCHAUMWERKSTOFFE | | | | | | | | |
| Illbruck | willmid (PI) | 7 | 0,041 | 28,5 | 0,9 | ATS 1000.001 | ja | Weichschaum, T _{max} ca. 260°C, gut formbar |
| Illbruck | willtec (PI) | 10 | 0,034 | 23,6 | 1,1 | ATS 1000.001 | ja | Weichschaum, T _{max} ca. 150°C, gut formbar |
| Jehier | 307R/71 (PI) | | 0,042 | | | | | KB 14 – Material |
| DIAB Divinycell | TP 50 (PES) | 50 | 0,060 | 41,7 | 9,7 | DIN 5510, FAR | errei- chbar | Platte, 3D-thermoform- bar (bei ca. 270°C) |

Schlußbericht

| Hersteller | Typ (Werkstoff) | Raum- gewicht | Wärme Leitzahl bei 15°C | Dicke für gleiche Isolation wie Re- ferenz | Masse für gleiche Isolation wie Referenz | Brand- verhalten erfüllt Norm | Luft- fahrt- zulas- sung | Bemerkungen, Formbarkeit |
|--------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|---|
| | | [kg/m ³] | [W/mK] | [mm] | [kg] | | | |
| DIAB Divinycell | H30 (PVC, vernetzt) | 36-41 | 0,023 | <16,0 | <3,0 | Selbstver- löschend | ja | Platte, T _{max} ca. 70°C, bedingt thermoformbar |
| DIAB Divinycell | H60 (PVC, vernetzt) | 60-69 | 0,027 | <18,8 | <6,0 | Selbstver- löschend | ja | Platte, T _{max} ca. 70°C, schlecht thermoformbar |
| Röhm | Rohacell 31A (PMI) | 32 | 0,030 | 20,8 | 3,1 | FAR 25.853 | ja | Platte, T _{max} ca. 180°C, gut thermoformbar |
| Röhm | Rohacell 51A (PMI) | 52 | 0,031 | 21,5 | 5,2 | FAR 25.853 | ja | Platte, T _{max} ca. 180°C, gut thermoformbar |
| Röhm | Rohacell 71A (PMI) | 75 | 0,032 | 22,2 | 7,7 | FAR 25.853 | ja | Platte, T _{max} ca. 180°C, gut thermoformbar |
| AIREX | C50.60 (PUR) | 60 | 0,036 | 25,0 | 7,0 | | | Platte, T _{max} ca. 140°C, gut thermoformbar |
| AIREX | R63.50 (PVC, lin.) | 60 | 0,034 | 23,6 | 6,6 | | | Platte, T _{max} ca. 55°C, gut thermoformbar, als Typ „contoured“ Radien mögl. |
| AIREX | C70.40 (PVC, vernetzt) | 40 | 0,031 | 21,5 | 4,0 | | | Platte, T _{max} ca. 65°C, bedingt thermoformbar, als Typ „scrim“ Radien legbar |
| AIREX | C70.75 (PVC, vernetzt) | 80 | 0,033 | 22,9 | 8,5 | Institut f. Schienen- fahrzeuge | | Platte, T _{max} ca. 75°C, schlecht thermoformbar, als Typ „scrim“ Radien legbar |
| AIREX | R82.60 (PEI) | 60 | 0,036 | 25,0 | 7,0 | Luftfahrt ATS 1000 Institut f. Schienen- fahrzeuge | ja | Platte, T _{max} ca. 190°C, gut thermoformbar |
| AIREX | R82.80 (PEI) | 80 | 0,037 | 25,7 | 9,6 | Luftfahrt ATS 1000 Institut f. Schienen- fahrzeuge | ja | Platte, T _{max} ca. 190°C, gut thermoformbar |

Schlußbericht

| Hersteller | Typ (Werkstoff) | Raum- gewicht | Wärme Leitzahl bei 15°C | Dicke für gleiche Isolation wie Re- ferenz | Masse für gleiche Isolation wie Referenz | Brand- verhalten erfüllt Norm | Luft- fahrt- zulas- sung | Bemerkungen, Formbarkeit |
|------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|---|
| | | [kg/m ³] | [W/mK] | [mm] | [kg] | | | |
| AIREX | RG 30 (PUR) | 30-33 | 0,021- 0,024 | <16,7 | <2,6 | | | Formschäumen denkbar |
| AIREX | S32.50/ S33.50 | 50 | 0,036 | 25 | 5,8 | Bekleid- ung | | Weichschaumstoff, gut formbar |
| AIREX | S40.70 | 70 | | | | Flugzeug- sitze | | halbhart, sehr gut thermoformbar (bei 95- 100°C) |
| AIREX | TROBLOC 20F10 (PE) | 16-24 | 0,038 | <26,4 | <2,9 | DIN 4102, Klasse B2 | | Weichschaumstoff, gut formbar |
| AIREX | TROBLOC 30N (PE) | 26-34 | 0,041 | <28,5 | <4,5 | DIN 4102, Klasse B2 | | Weichschaumstoff, gut formbar |
| WABENWERKSTOFFE | | | | | | | | |
| HEXCEL | 5052 (Alu) | 34 | 45,5 | | | | ja | Alu-Wabe (FlexCore, leichteste im Sortiment), ausreichend formbar im zyl. Bereich |
| HEXCEL | HRP (GF) | 40 | ca. 1 | | | | ja | GF-Wabe (FlexCore, leichteste im Sortiment), ausreichend formbar im zyl. Bereich |
| HEXCEL | HRH10 (Aramid) | 34 | ca. 1 | | | | ja | Aramid-Wabe (FlexCore, leichteste im Sortiment), ausreichend formbar im zyl. Bereich |
| Plascore | PC 1/4 (PC) | 48 | ca. 1 | | | | | PC-Wabe (leichteste im Sortiment), evtl. thermoformbar (oberhalb 100°C) |

Schlußbericht

| Hersteller | Typ (Werkstoff) | Raumgewicht [kg/m ³] | Wärmeleitzahl bei 15°C [W/mK] | Dicke für gleiche Isolation wie Referenz [mm] | Masse für gleiche Isolation wie Referenz [kg] | Brandverhalten erfüllt Norm | Luftfahrtzulassung | Bemerkungen, Formbarkeit |
|------------------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|--|-----------------------------|--------------------|---|
| SONSTIGE | | | | | | | | |
| Micro-Hohlglasten (bis 150µ) | Borsilikatglas | 75 | 0,0025 | 1,7 | 0,6 | | | Einbau mit Vakuummantel (10Pa) |
| Superisolation | Linde SI-4 | 75 | 0,0004 | 0,3 | 0,1 | | | Vakuum-Isolation (Glasfaserdämmstoff und Alufolien) |

Tabelle 3: Relevante Isolationswerkstoffe

Anmerkung 1: **Fett** = als geeignet angesehen

Anmerkung 2: Alle Schäume von AIREX, Röhm und Divinycell sind geschlossenzellig

Anmerkung 3: Die Oberfläche der untersuchten Tanks beträgt 4,62m²

2.2.3.3 Auswahl und Bewertung von Isolationswerkstoffen

Grundlage für die Bewertung und Auswahl eines Isolationswerkstoffes waren folgende Forderungen:

1. Keine Erhöhung der Masse ohne verbesserte Isolationswirkung
2. Keine wesentliche (>50%) Erhöhung der bisherigen Isolationsdicke von 25mm
3. Keine Erhöhung der (life-cycle-) Kosten (Herstellung, Betrieb und Entsorgung) ohne verbesserte Isolationswirkung
4. Luftfahrtzulassung erreichbar oder vorhanden (Kriterien vgl. FAR 25.853, ATS 1000.001, DIN 5510)
5. Gute Bearbeitbarkeit für:
 - Vorkonfektionierung (durch schneiden/stanzen/sägen)
 - Aufbringen auf den Tank
 - Befestigung am Tank
 - Reparatur
 - Auswechseln

Schlußbericht

6. Dauerhaltbarkeit:
 - Belastungen, Schwingungen im Betrieb
 - Temperaturschwankungen am Boden, in der Luft, und durch Heizzyklen
 - Umgebungsbedingungen (Feuchte, Chemikalien, elektrische Einflüsse)
7. Eignung Strukturfunktionen zu übernehmen

Bei der Auswahl von möglichen zur Serienanwendung alternativen Isolationswerkstoffen, wurden bewusst leichte Schaumwerkstoffe besonders beachtet, die bekannt gute Isolationseigenschaften haben, und im Leichtbau (i.e. Luft & Raumfahrt) gleichzeitig als Strukturkerne in Sandwichkonstruktionen erfolgreich eingesetzt werden. Damit besteht automatisch Betriebserfahrung in der Luft- und Raumfahrt, einem wichtigen Auswahlkriterium.

Einige dieser in Tabelle 3 angegebenen Schaumwerkstoffe sind jedoch hart und nur als Plattenware schäumbar (z.B. Röhm *Rohacell*, oder Divinycell *H60*, *H80* etc.), so dass eine bevorzugt anliegende Isolation nur schwierig auf die runde Tankform aufgebracht werden kann. Auch die Integration eines solchen Schaumwerkstoffes in die Struktur erscheint ungünstig. Klassische Bearbeitungsmöglichkeit ist mechanisches Abtragen (i.e. Fräsen, Schleifen etc.), das für die geplante Anwendung als zu teuer erachtet wird, weil zu viel Material zerspant werden muss. Möglichkeiten bestehen jedoch, Plattenschäume als geschlitzte Ware vorzukonfektionieren (z.B. sogenanntes „scrim“ oder „contoured“ Material /P1/), und/oder zusätzlich die nötige Kerndicke (und damit Isolationsdicke) aus mehreren dünnen, besser biegbaren Platten, aufzubauen. Versuche hierzu wurden nicht durchgeführt, jedoch gibt es Beispiele von gebogenen oder runden Sandwichstrukturen, die mit der beschriebenen Technologie realisiert wurden.

Aussichtsreicher erscheint die Möglichkeit, zunächst als Platten geschäumte Werkstoffe nachträglich thermozuformen, und so in die gewünschte Form zu bringen. Tabelle 3 enthält in der Spalte *Bemerkungen, Formbarkeit* Hinweise, welche Materialien hierfür geeignet sind. Beachtet werden muss allerdings, dass das Raumgewicht nach dem thermoformen meist nicht mehr homogen über der Plattenfläche und ggfs. zusätzlich erhöht ist, so dass die Gewichtssituation und Isolationseigenschaften im Einzelfall zu prüfen sind. Im Falle der gleichmässigen zylindrischen Oberfläche der betrachteten Tanks dürfte dieses Problem jedoch von untergeordneter Bedeutung sein. Die kugeligen Enden können evtl. mit konstruktiven Massnahmen ausreichend isoliert werden. Auch hierzu wurden keine Versuche gemacht, jedoch wird das thermoformen von strukturellen Schäumen immer bedeutender. Erfahrung mit Produkten besteht.

Aussichtsreiche Werkstoffe mit den diskutierten strukturellen Eigenschaften und Herstellmöglichkeiten sind die Produkte *Rohacell /P4/*, *R82 /P1/*, sowie das *Divinycell TP /P3/*.

Formschäumbare Materialien sind bekannt und verfügbar, und ebenfalls in Tabelle 3 enthalten. Diese sind auf Polyurethanbasis, einem Werkstoff mit guter Isolationseigenschaft, jedoch mit nicht voll befriedigenden Dauereigenschaften. Luftfahrtzulassung ist noch nicht gegeben. Deswegen wird der Einsatz im Tank noch als kritisch angesehen.

Schlußbericht

Die formgerechte Herstellung, oder evtl. das Umschäumen von Tanks ist jedoch sehr gut möglich, evtl. mit gleichzeitiger haftender Fixierung des Schaumes auf der Struktur. Zudem kann eine strukturelle Aufgabe als Sandwich-Kern übernommen werden.

Das mit Referenz bezeichnete Material zeichnet sich durch gute Isolationswirkung, vorhandene Luftfahrtzulassung und vorhandene positive Betriebserfahrung aus. Die Applikation ist einfach (Umhüllung der Tanks und Befestigung mit Klettbindern). Aussparungen für Tankanschlüsse müssen allerdings vorgesehen werden. Strukturelle Aufgaben können von der gegenwärtigen Isolierung nicht übernommen werden. Unterschiede bestehen im Preis und der Betriebserfahrung.

Die in Tabelle 3 aufgelisteten Werkstoffe ermöglichen eine ähnlich einfache Vorkonfektionierung und Befestigung, weil sie als weiche Materialien gute Formbarkeit aufweisen. Das Produkt „willmid“ des Herstellers *illbruck /P12/* fällt hier besonders auf, da Luftfahrtzulassung bereits gegeben ist, und ein markanter Gewichtsvorteil zu erwarten ist. Das Materialgewicht beträgt bei gleicher Isolationswirkung lediglich 32%.

Weichschaumstoff-Materialien, z.B. von *AIREX /1/* (S32, S33, TROBLOC), lassen ähnliche Eigenschaften erwarten, wie das Referenzmaterial, werden in der Bekleidungsindustrie verwendet und weisen deswegen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausreichende Brandeigenschaften bei sicher geringeren Kosten auf. Sie sind jedoch als nicht geeignet klassiert, da der Aufwand für die Luftfahrtzulassung nicht absehbar ist, und kein wirklicher Gewichtsvorteil erwartet werden kann. Zudem sind Strukturaufgaben schlecht denkbar.

Auf Grund des Einsatzes in Flugzeugsitzen wird der halbharte Schaumwerkstoff *S40.70 /P1/* als geeignet klassiert. Im Gegensatz zu den als „weich“ oder „Weichschaumstoff“ gekennzeichneten Werkstoffen ist der Einsatz als Kernwerkstoff in Sandwichstrukturen denkbar, bei gleichzeitig günstiger Formbarkeit (thermoformbar und in Grenzen flexibel). Zu prüfen ist die Anbindung an die verstärkenden Decklagen.

Einer grundsätzlich anderen Werkstoffklasse müssen die üblicherweise als Plattenware erhältlichen Schaumwerkstoffe zugeordnet werden. Zusammenfassend lässt sich jedoch schnell feststellen, dass ein Gewichtsvorteil nicht erwartet werden kann, wenn diese Materialien „lediglich“ als Isolation Verwendung finden. Weitere Verbesserungen auf Grund der Eigenschaften oder der Verarbeitung müssen hinzukommen.

Im Leichtbau ist die insbesondere für steifigkeitskritische Bauteile angewendete Sandwichbauweise bekannt, wobei die genannten Schaumwerkstoffe als leichtes Kernmaterial eingesetzt werden. Hier besteht Potential, Strukturfunktion und Isolationsfunktion zu kombinieren.

Es muss jedoch die generell schlechte Formbarkeit beachtet werden. Eine spanende Formgebung scheidet aus Kostengründen sicher aus, so dass nur thermoformbare oder formschäumbare Materialien in Betracht kommen.

Das Produkt „Divinycell TP 50“ des Herstellers *DIAB /3/*, welches auf Grund des verwendeten temperaturresistenten Thermoplasten PES als Basismaterial interessant scheint, weist eine recht hohe Formgebungstemperatur auf (270°C), so dass die Eignung fraglich ist (hoher Energieaufwand, kostspielige temperaturhaltbare Werkzeuge). Zudem ist das hohe Gewicht zu beachten.

Verbesserung versprechen hier die Produkte „R82“ von *AIREX /1/*, und insbesondere die PMI-Schäume „Rohacell“ von *Röhm /4/*. Die Thermoformbarkeit ist gerade in letzter Zeit deutlich

Schlußbericht

weiterentwickelt worden, und kann als eine mögliche Be- und Verarbeitungsmethode betrachtet werden. Insbesondere die leichten „Rohacell“-Typen erlauben mit Sicherheit einen Gewichtsvorteil, wenn sie zusätzlich zur guten Isolationseigenschaft Strukturfunktionen übernehmen. Die bei geringem Raumgewicht naturgemäß geringen Drucksteifigkeiten sollten kein Problem darstellen, da lokale Druckbelastungen von der Befüllung ausgeschlossen sind, und die Unterbringung im Flugzeugrumpf geschützt ist. Luftfahrtzulassung ist gegeben, und langjährige positive Betriebserfahrung in der Luft- & Raumfahrt vorhanden.

Klassische im Flugzeugbau mit FVK-Deckschichten oder Al-Deckschichten eingesetzte sehr leichte Waben als Kernmaterialien sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt (*HEXCEL /5/, Plascore /6/*). Allerdings scheiden sie auf Grund der um mindestens 1 Größenordnung schlechteren Isolationswirkung (im Falle der nichtmetallischen Waben), bzw. im Falle der weitverbreiteten Aluminiumwaben (mindestens 2 Größenordnungen schlechtere Isolationswirkung) völlig aus. Die Verarbeitbarkeit ist ebenfalls erschwert.

Unter Berücksichtigung der o.a. Überlegungen wurde entschieden, innerhalb dieser Forschungsarbeit mit dem Material „willmid“ des Schweizer Herstellers *illbruck /12/* eingehende Versuche zu machen. Gleichzeitig kann so das Risiko einer völlig neuen Tankbauweise reduziert werden und ein höherer Integrationsgrad im Tankdesign zunächst mit einer neuartigen Heizung erreicht werden.

Versuche und Ergebnisse sowie die bereits sehr weit vorangetriebenen Studien zur Herstellung und Qualifizierung des Materials zusammen mit dem Design sind im Abschnitt 2.4.2 und Anlage 2, 3 und 4 enthalten.

2.2.4 Füllstandsmessung

Für die Füllstandsmessungen in den Wasser- und Abwassertank eines Flugzeuges ist es sinnvoll das gleiche Meßprinzip oder besser noch den gleichen Sensor zu verwenden. Die Füllstandsmessung im Abwassertank stellt höhere Anforderungen an die Sensorik, so daß diese Anforderungen die Grundlage für die Sensorik darstellen sollten.

Übersicht über die verschiedenen Meßprinzipien:

Hydrostatisch

Die Massenbestimmung findet durch Differenzdruckmessung statt. Für Drucktanks muß eine Druckkompensation berücksichtigt werden.

Schwimmer

Das Auftriebsprinzip des Schwimmers wird benutzt um ein Potentiometer zu verstellen.

Kapazitiv

Das Medium im Tank wird als Dielektrikum verwendet, welches sich zwischen zwei Elektroden befindet.

Schlußbericht

Ultraschall Puls-Echo

Laufzeitbestimmung für die Grenzschicht oberhalb des Mediums/ durch das Medium hindurch

Mikrowellen

Es wird die Laufzeit bestimmt die sich zwischen dem Sensor und der Grenzschicht oberhalb des Mediums befindet.

Einperlmethode

Es wird der Druck gemessen, der benötigt wird um Gas in das Medium hinein zu drücken.

Gravimetrisch / Load Cells

Gewichtsmessung des Tanks an verschiedenen Aufnahmepunkten des Tanks (mindestens drei Aufnahmepunkte)

Tauchrohr

Es wird der Luftdruck gemessen, der oberhalb des Mediums in einem Tauchrohr vom Medium zusammengedrückt wird.

Magnetorestriktion

Das Auftriebsprinzip des Schwimmers wird benutzt um ein Magnetfeld zu verändern(induktive Ankopplung)

Admittanz

Es wird der Komplexer Leitwert, d.h. kapazitiver und ohmscher Anteil des Mediums gemessen, um kapazitive Verunreinigungen zu eliminieren.

Radar Puls

Laufzeitbestimmung für die Grenzschicht oberhalb des Mediums

IR-Laser

Es wird die Laufzeit bestimmt die sich zwischen dem Sensor und der Grenzschicht oberhalb des Mediums befindet.

Konduktiv

Es wird die Leitfähigkeit des Mediums gemessen.

Akustisch

Es wird der Tank mechanisch angeregt einen Ton abzugeben. Der angeregte Schall wird in seiner abgestrahlten Frequenz ausgewertet (volles / leeres Weinglas).

Schlußbericht

Tabelle 4 stellt eine zusammenfassende Bewertung der aufgelisteten Sensormeßprinzipien dar.

Die Füllstandsprinzipien wurden auf die Eignung unter folgenden Bedingungen hin untersucht:

1. Medium "Waste"
2. Weitere Inhaltsstoffe
3. Anstellwinkel
4. Temperatur
5. Beschleunigung
6. Druckverlauf
7. Keine einheitliche Dichte
8. Nebelbildung beim Spülvorgang
9. Filzbildung im Einströmbereich der Fäkalien nach längerer Betriebszeit
10. Lagerfähigkeit

Bewertungsskala

- | | |
|---|--|
| 1 | gut, kein Einfluß |
| 2 | minimal, muß nicht berücksichtigt werden |
| 3 | mittel, muß berücksichtigt werden |
| 4 | schlecht, starke Beeinträchtigung |

Schlußbericht

| Meßprinzipien | Bedingungen | | | | | | | | | | gesamt |
|------------------|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| hydrostatisch | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 4 | 23 |
| Schwimmer | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 25 |
| kapazitiv | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 4 | 21 |
| Ultraschall Puls | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 | 1 | 1 | 16 |
| Mikrowelle | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 25 |
| Einperlmethode | 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 4 | 26 |
| gravimetrisch | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 14 |
| Tauchrohr | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 27 |
| Magnetostriktion | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 25 |
| Admittanz | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 23 |
| Radar Puls | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 25 |
| IR-Laser | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 24 |
| konduktiv | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 26 |
| akustisch | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 21 |

Tabelle 4: Bewertung der Füllstands-Meßprinzipien

Die Meßprinzipien Gravitation und Ultraschall sind für die Füllstandsmessung im Flugzeug am besten geeignet. Beide Meßprinzipien wurden weiter verfolgt wobei der Schwerpunkt auf die Ultraschallmessung gelegt wurde.

Schlußbericht

2.3 Herstellung des Technologieträgers

2.3.1 Tankstruktur

Die Forderung nach baugleichen Rohtankstrukturen oder zumindest nach Strukturen mit gleichem Durchmesser der Frisch- und Abwassertanks hat zu Fertigungsuntersuchungen mit zylindrischen Tanks geführt.

- Neuer Wickeldorn: Vakuumstabilisierter Kern
 - Größere Polöffnungen
 - Reduzierung der Öffnungen im zylindrischen Bereich
- Betrachtungen der Folienbeschichtung
 - Trinkwassertaugliche Folien
 - Vergleich neuer Folien mit gegenwärtig eingesetzter Folie
- Nichtmetallischer Tankdeckel
 - Polbereich: erhöhter Aufwand beim Wickeln

Durch Verwendung vorhandener Vorrichtungen konnten die Kosten im Budgetrahmen gehalten werden.

Aus faserverstärkten, vor allem aber C-faserverstärkten Kunststoffen lassen sich sehr leichte Tanks herstellen. Dies geschieht bei rotationssymmetrischen Geometrien vorzugsweise im Faserwickelverfahren. Dabei werden auf einen sogenannten Wickeldorn die mit Matrix getränkten Rovings (Bündel von Fasern) gewickelt und anschließend gehärtet. Anschließend muß im Normalfall der Wickeldorn aus dem Tank entfernt werden. Bei zylindrischen Tanks mit Domen an den Enden und Polöffnungen, die einen kleineren Durchmesser haben, als der Innendurchmesser des zylindrischen Teils, sind hierfür folgende Verfahren bekannt:

1. Verlorene Kerne, die durch Zertrümmern, chemisches Zersetzen oder Herausschmelzen aus dem Tank entfernt werden können
2. Auftrennen der Tanks, wobei die Hälften nach dem Entfernen des Wickeldorns wieder gefügt werden müssen
3. Zerlegbare Kerne, die in Einzelteilen durch die Polöffnungen aus dem Tank entfernt werden können.

Verjüngt sich das zu fertigende Bauteile an den Enden sehr stark, ist es oft schwierig den Kern nach dem Aushärten ohne besonderen Aufwand herauszuholen.

Eine Lösung für ein derartiges Problem ist ein vakuumstabilisierter Kern, der sich zudem noch wiederverwenden läßt. Einen derartigen Kern haben DLR und MAN Technologie AG in der letzten Zeit entwickelt. Das Verfahren ist zum Patent angemeldet.

Schlußbericht

Die Idee der Vakuumstabilisierung stammt von der Kaffee-oder Erdnuß-Vakuumpackung. Daher wird die Technologie auch umgangssprachlich 'Peanuts-Technik' genannt.

Ein von einer Hülle (zum Beispiel einem dünnen Kunststoffschlauch) eingeschlossenes Granulat wird durch Absaugen der Luft innerhalb der Hülle zu einem steifen Körper. Läßt man die Luft wieder in die Hülle zum Granulat hinein, so verliert der Körper seine Steifigkeit wieder und kann ohne Kraftaufwand verformt oder das Granulat ausgeschüttet werden. Durch Ansaugen der Hülle in eine Negativform kann während des Füllvorganges die Kontur des durch Vakuum verfestigten Körpers vorherbestimmt werden. Es ist jedoch möglich, daß der Kern beim Evakuieren durch Zusammensacken des Füllgranulates schrumpft und die Außenkontur nicht mehr exakt der Ansaugform entspricht. Das kann durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden.

Mit diesem Verfahren wurden schon verschiedene Bauteile gefertigt. Zug-Druckstreben lassen sich damit zum Beispiel in einem Stück inklusive schlanker Kraffteinleitungsbereiche herstellen.

Vorteile des vakuumstabilisierten Kerns sind:

- Das aufwendige Trennen des Tanks zur Kernentnahme sowie das Bearbeiten und Fügen der Tankhälften entfällt;
- Die geplante integrierte Heizung wird mit einem Anschluß durchgehend verlegt;
- Bei gezielter Wahl der Folie kann diese im Tank verbleiben;
- Die Entwicklung dieser Entformtechnik kann auf den Waste Tank übertragen werden, so daß der Stahl-Liner durch einen leichten Kunststoff-Liner ersetzt werden kann.

Ziel der Fertigungsuntersuchungen war der Nachweis der Funktionalität eines vakuumstabilisierten Kerns für den Wickelprozeß von Trinkwassertanks.

Die Untersuchungen wurden an folgendem Fertigungsmodell durchgeführt:

- Innenvolumen: 5 Liter
- Prüfdruck 7,2/-0,7 bar
- Betriebsdruck: 2,3 bar
- maximales Verhältnis von Außendurchmesser zu Polöffnungsdurchmesser: 2/1

In Abbildung 13 ist ein Fertigungsmodell das mit dem neuen Verfahren hergestellt wurde dargestellt.

Schlußbericht

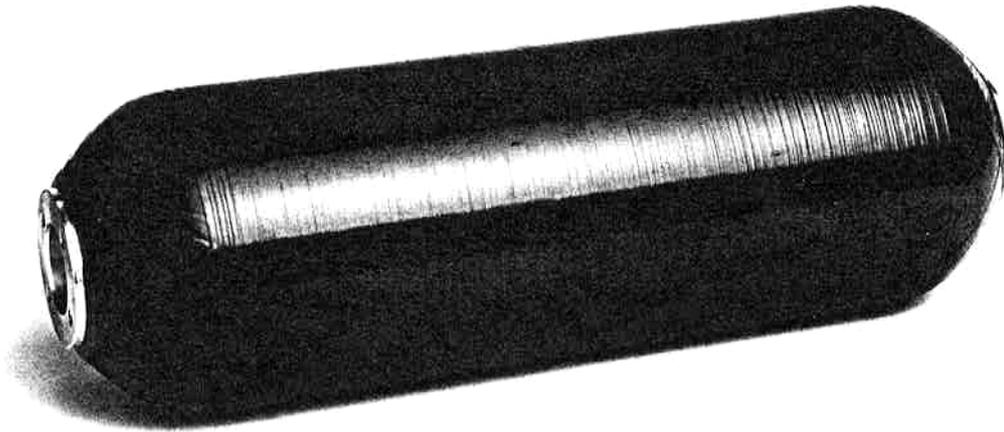


Abbildung 13: Fertigungsmodell des Faserverbundtanks

2.3.2 Integrierter Vereisungsschutz: Heizung

Heizmattenherstellung

Die Herstellung erfolgte auf einem Automaten, der die kontinuierlich durchlaufenden 100mm breiten Glasgittermatten mit der isolierten Heizlitze bestückte. Der Litzenabstand lag bei ca. 10mm. Das Trägermaterial wurde gemäß Mattenlänge getrennt und nach den Anforderungen der Verschaltung zur Heizmatte angeordnet. Die mechanische Verbindung der Streifen erfolgte mit einem Glasklebeband. Die Aussparungen für die Tankausläufe wurden mittels Automatenprogramm berücksichtigt.

Als Trägermaterial für den Heizleiter eignet sich besonders gut ein Glasgitter-Prepreg, welches in Matten hergestellt wird. Es besitzt eine gute Schubsteifigkeit zur Konfektionierung und Handhabung und verursacht mit seinem großen Gitter die geringste Verbundstörung. Die Glasgittermatte ist mit Acrylat getränkt.

Wegen der fertigungsbedingten Trennung des Tanks sind zwei Matten (Abbildung 12) erforderlich. Die Matten bedecken den unteren halben Tankumfang über die zylindrische Länge. In den Bereichen der Tankausläufe ist der Heizleiter ausgespart. Die Fixierung der Matten sollte durch wendelförmige Umschlingung mit einem Roving erfolgen.

Die Matten ließen sich beim Auflegen auf die Wicklung gut handhaben.

Der Randabstand der Matten muß etwa 100 mm bis zum Domansatz betragen, um das Verschieben beim Überwickeln zu vermeiden.

Schlußbericht

Beim Überwickeln zeigte sich, daß ein Herausführen der Heizleiterenden in der Tankmitte keine brauchbare Serienlösung darstellt. Die C-Faser mußte teilweise von Hand über die Abweishütchen geführt werden. Nach dem Härten der Wicklung stellten die abstehenden Heizleiterenden ein großes Beschädigungsrisiko dar.

Nach dem Entfernen der Hütchen wurden die Kabelenden abisoliert und der Widerstand jedes einzelnen Kreises geprüft. Es bestätigten sich die Auslegungswerte.

Die beiden Matten wurden dann so verschaltet, daß drei über die Tanklänge ausgerichtete Heizkreise entstanden. Dabei wurden auch die drei Temperaturwächter integriert.

Daraufhin wurde beschlossen, die Heizanschlüsse an den Tankenden unter der Umfangswicklung heraus zu führen.

Tankherstellung

Die Herstellung des Tanks SP 02/97 erfolgte nach Serienparametern, wobei zur Integration der Heizung der Wickelprozeß nach dem Wickeln der Längslagen unterbrochen wurde. Die Mantellinie der künftigen Auslauföffnungen wurde durch Drehen der Wicklung oben positioniert, so daß die beiden Heizmatten aufgelegt und axial ausgerichtet werden konnten. Die konischen Abweishütchen wurden auf die Heizleiterenden aufgesteckt und beide Matten mit einem Roving fixiert. Es folgte das serienmäßige Wickeln der Umfangslagen. Dabei ließ sich das Faserband nicht einwandfrei über die Hütchen ablegen. Weiterhin gab es ein leichtes Verschieben der Matten durch die Axialkraft des Faserbandes in den Umkehrpunkten der Wicklung an den Tankenden.

Der Tank wurde serienmäßig fertiggestellt.

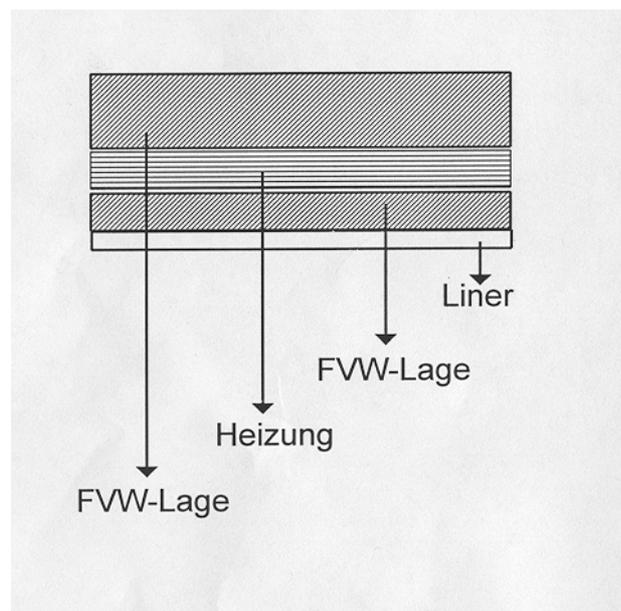


Abbildung 14: Herstellung des Tanks mit integrierter Heizung; Schematische Darstellung des Lageraufbaus

Schlußbericht

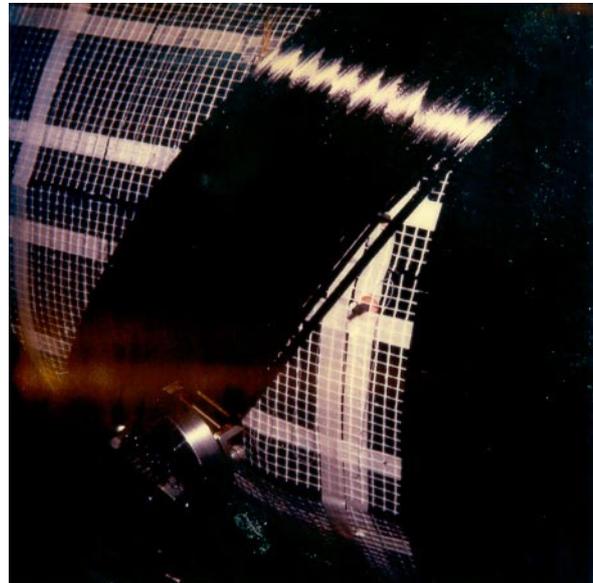


Abbildung 15: Auflegen und Überwickeln der vorkonfektionierten Heizmatte

Redundanz

Bei der ersten Heizungslegung wurde davon ausgegangen, daß der Verlust eines Heizkreises nicht zum Versagen des Systems führt.

Übertemperaturschalter

Für den ersten Technologieträger kam je Heizkreis eine 65°C-Absicherung zum Einsatz, die außen am Tank angeordnet war.

Fabrikat: UCHIYA UP 62.65.05.100.40.10

Temperatursensor

Der Temperatursensor wurde im unteren Dombereich außen an der Tankwand befestigt.

Fabrikat: Honeywell TDA 5A

Heizleistung

Zur Einbringung der benötigten Leistung wurde für die zu Verfügung stehende Fläche und einen Heizleiterabstand von ca. 10mm eine R-Litze mit 3,5Ω/m ausgewählt (Querschnitt 0,05mm²)

Schlußbericht

Regeleinheit

Für die Heizversuche stand eine Regeleinrichtung zur Verfügung, die bei Absinken der Temperatur unter 6°C die Heizung einschaltete und beim Erreichen einer Tanktemperatur von 10°C abschaltete.

2.3.3 Tankisolation

Die im Folgenden beschriebenen Versuche sind mit dem Werkstoff „willmid HT“ durchgeführt worden. Das Isolationsmaterial war 20mm dick und außen mit einer PVF-Folie (Aluminium bedampft und mit Fadengelege verstärkt) beschichtet

Schneide- und Konfektionierungsversuche

Die Applikation des Isolationsmaterials auf die Carbonfaser-Strukturoberfläche der Frischwassertanks erfolgt ähnlich der momentanen Serienanwendung: Die vorkonfektionierten Matten werden nach Zeichnung aufgelegt und mit Klettbändern aneinander fixiert. Im Unterschied zur Serienapplikation sind die Isolationsmatten nicht mit langen Klettbändern in Umfangsrichtung gehalten, sondern die Matten werden miteinander verbunden. Dazu sind Klettbänder direkt auf den Isolationsmatten angebracht. Die Matten liegen dadurch dichter und besser formschlüssig am Tank.

Abbildung 18 zeigt den Tank mit Isolationsmatten.

Die Isolation war vor der Applikation einbaufertig vorbereitet. Hierzu wurden im Vorfeld Schneide- und Konfektionierungsversuche durchgeführt:

Für die Tank-Hülle wurden verschiedene Matten mit folgenden Abmessungen benötigt:

- 2 Kappen: Zuschnitt \varnothing 600, mit 8 Schlitzten gemäß Schablone
- 3 Matten: Zuschnitt 1440 x 750, schneiden der Aussparungen
- 1 Matte: Zuschnitt 1440 x 460, schneiden der Aussparungen

Das Schneiden ist mit dem Messer möglich. Zusätzlich wurden mit einer Ultraschall-Schneidemaschine erfolgreich Versuche für eine automatisierte Bearbeitung gemacht. Die dritte Möglichkeit ist das Stanzen, die Standardmethode des Herstellers der Isolationsmatten. Dabei können Durchbrüche, die nicht immer gebraucht werden, lediglich vorgestanzt sein. Die Schnittkanten sind mit selbstklebendem Aluminium-Klebeband abgedeckt, was ausreichend ist und bewährten Schutz bietet.

Die Verbindung/Fixierung der einzelnen Matten aneinander wie in der derzeitigen Serienanwendung, ist mit Klettbändern vorgesehen. Die Klettbänder werden allerdings auf die fertig zugeschnittenen Isolationsmatten aufgeklebt, um die beschriebene verbesserte Befestigung zu erhalten. Die Auswahl des Klebers hierzu erfolgte nach einer kleinen Versuchsreihe, da die Anbindung an die PVF-Folie (reissfester Oberflächenschutz der Isolationsmatte) mit den Grenzflächen textilrauhes Klettband zu glatter PVF-Folie problematisch ist. Verschiedene klimatische Bedingungen wurden ebenfalls berücksichtigt und während der

Schlußbericht

Versuchsreihe simuliert: +85°C / -55°C / +70°C bei 95% Luftfeuchtigkeit. Als geeignet ausgewählt wurde der Kleber 37 der Fa. Binder (Basis: Kunstkautschuk).

2.3.4 Füllstandsmessung

Für die Füllstandsmessung werden Ultraschallsensoren mit einem nachgeschalteten Meßwertumformer verwendet, wobei Sensor und Meßwertumformer in einem Gehäuse angeordnet sind.

Für die Versuche wird zum einen ein Ultraschallsensor zur kontinuierlichen Füllstandsmessung und zum anderen ein Ultraschallsensor zur Grenzwerterkennung eingesetzt (Abbildung 16).

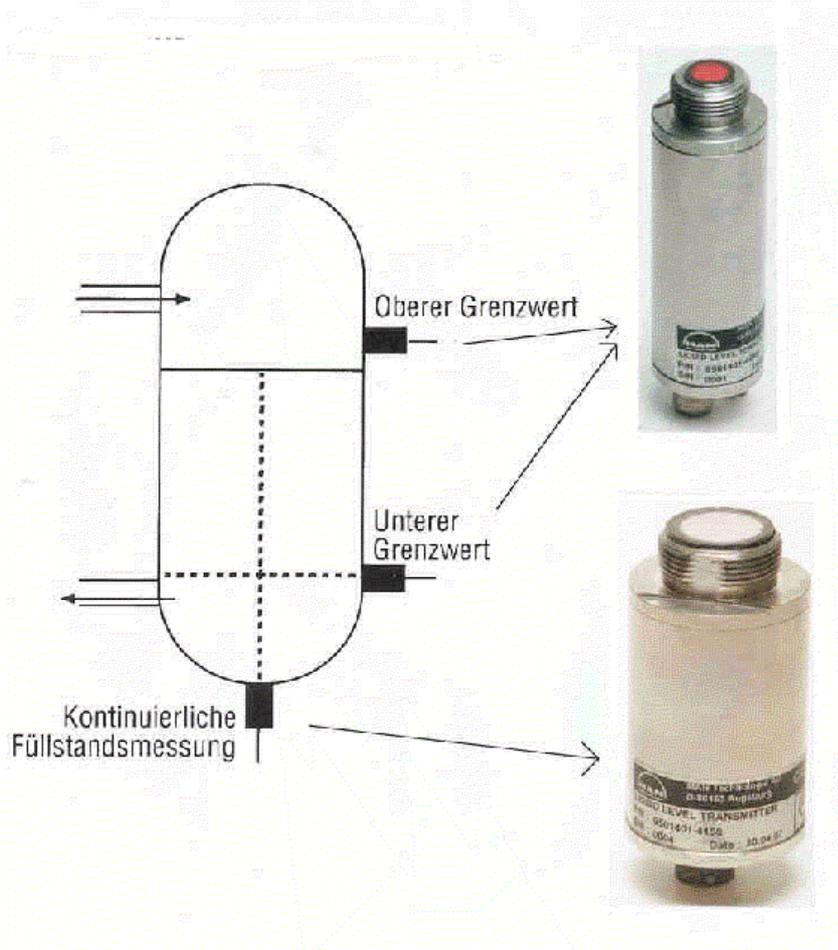


Abbildung 16: Ultraschallsensoren

Schlußbericht

Meßprinzip

Die Sensoren werden mit einem auf die Tankstruktur aufgeklebten Flansch montiert und befinden sich außerhalb des Mediums Wasser bzw. Fäkalien. Es werden kontinuierlich Ultraschallsignale abgestrahlt und empfangen. Die ankommenden Echostrukturen werden bewertet und in ein analoges Signal (4-20 mA) entsprechend der Füllhöhe umgewandelt.

Die hohen Ultraschallfrequenzen gestatten eine Genauigkeit der Messung von weniger als 1 mm. Durch eine an die Tankgeometrie angepaßte Schallkeule werden Störeffekte von den Tankwänden vermieden.

Herstellung des Technologieträgers

Für die Untersuchung der Füllstandsmessung wurde neben einem A340 Abwassertank vor allem ein A340 Frischwassertank verwendet. Dieser wurde derart gelagert, daß durch einen Rechner und elektrischen Stellantrieb verschiedene Fluglagen (Anstellwinkel -5° bis $+15^\circ$) simuliert werden konnten. Über den Rechner konnten Befüll- und Entnahmeprozesse von 0,2 bis 14 l / min. angewählt werden.

Über den Rechner wurden die Ausgangssignale der Füllstandssensoren im Zusammenhang mit dem Anstellwinkel und dem Volumenstrom des Befüll- bzw. Entnahmeprozesses für die anschließende Bewertung der Meßergebnisse aufgezeichnet.



Abbildung 17: Sensor-Teststand; Wassertank A330/340

Schlußbericht

2.4 Erprobung des Technologieträgers

2.4.1 Tankstruktur

Es wurde gemäß den Vorgaben eine Mechanik für pneumatisch gestützte Wickelkerne konstruiert und gebaut. Diese hat den Beweis erbracht, daß sie funktioniert.

Im Rahmen dieses Projektes wurden auch verschiedene Materialien auf ihre Einsatztauglichkeit in ihrem jeweiligen Bereich hin getestet, mit folgendem Erfolg:

- Es konnte ein Granulat gefunden werden, das die Anforderungen erfüllt.
- Es konnte ein Werkstoff für die Kernblase gefunden, der seine Funktion voll erfüllt.
- Es konnte das Verfahren in einer Weise erprobt werden, die die Schlußfolgerung zuläßt, daß das Verfahren für zylindrische Körper bereits voll funktioniert.
- Es konnte bislang kein Material und/oder Herstellungsverfahren gefunden werden, mit dessen Hilfe absolut konturierte Säcke für beliebige rotationssymmetrische Körper hergestellt werden können.
- Hat die Sackhaut nicht relativ genau die geforderte Körperkontur, so paßt sie sich trotz Absaug-Hilfsformen nicht exakt der Kontur an.
- Das Verfahren ist nur für Temperaturen bis 80°C anwendbar, da darüber sowohl das Latexmaterial als auch die Dichtungen in den Druckluftleitungen und -verschraubungen ihre Funktionsfähigkeit bzw. mechanischen Eigenschaften einbüßen.
- Der Wickelvorgang, der als solcher bereits als ausgereift gelten kann, war - wie eingangs erwähnt - nicht Gegenstand dieser Arbeit. Dennoch wird in Kürze ein pneumatisch erzeugter Wickelkern seine Anwendbarkeit im praktischen Wickelverfahren beweisen.

Im Rahmen dieses Projektes nicht getestet wurde die Praxistauglichkeit des Verfahrens in einer Serie mittlerer Stückzahlen (es sei aber in jedem Falle darauf hingewiesen, daß die erzielten Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die Körperkontur, aber auch die generelle Funktionstüchtigkeit der Mechanik auch nach Demontage und Wiedermontage, sich allesamt als mehrmals reproduzierbar erwiesen).

Mögliches Entwicklungspotential

- Es besteht die Möglichkeit, einen gegossenen Sack mit Hilfe eines Positivkernes (im Gegensatz zu Negativformen) zu erstellen. Dieser dann absolut formtreue Sack ermöglicht vielversprechende Versuche zur Herstellung konturtreuer Granulatpackungen.
- Glasgranulat bietet als feuchtigkeitsunempfindlicher Werkstoff eine weitere potentielle Materialalternative für den Füllstoff. Dessen Verwendungsfähigkeit müßte durch weitere Versuche bestätigt werden.

Zukünftige Versuche an anderen Geometrien und Bauteilen als dem beschriebenen Wassertank müssen zeigen, ob dieses Verfahrens tauglich ist für eine Breitenanwendung.

Schlußbericht

Faserverbundwerkstoffe und ihre hervorstechenden. mechanischen Eigenschaften bergen noch ein gehöriges Entwicklungspotential bezüglich ihrer Anwendungen. Eines der Haupthindernisse für eine noch breitere Anwendung (im Vergleich zu heute) ist immer noch die relativ aufwendige und damit teure Verarbeitung. Bei der Problemstellung des Roving-Wickelns über Wickelkerne bewirkte die vorliegende Arbeit einen Schritt in Richtung Fertigungsvereinfachung und somit zu größerer Wirtschaftlichkeit.

2.4.2 Integrierter Vereisungsschutz

Mit einem Heiztest sollten in einer verfügbaren Kältekammer bei -20°C erste Hinweise über Funktion und Verhalten der Heizung erzielt werden. Anschließend bot es sich an, den Test unter winterlichen Verhältnissen für drei Monate fortzusetzen.

Die Ergebnisse der Versuche in der Kältekammer und im Freiland sind in Anlage 2 zusammengefaßt.



Abbildung 18: Trinkwassertank A330/340 mit integrierter Heizung und neuer Isolation
Versuchsaufbau für Heiztest in der Klimakammer bei -20°C

Schlußbericht

Heiztest in der Kältekammer bei -20°C

Der Tank war mit einer Isolation ausgerüstet (Abbildung 18)

Die Schwankungen der Meßergebnisse beruhten auf der Nutzung einer Kühlkammer für Fertigungsprodukte, die gelegentlich geöffnet wurde.

Der Testzeitraum erstreckte sich vom 11.08.97 bis zum 20.08.97.

Meßtechnik: 7 Thermoelemente

Regelung: Temperatur- Regler für integrierte Heizung

Meßwerterfassung: Spectra MS

Testdurchführung: Die Klimakammer wurde während der Tests auf -20°C geregelt.

1. Test mit leerem Tank, waagrecht
2. Test mit 15 l Wasser, Tank 5° geneigt
3. Test mit 150 l Wasser, Tank waagrecht
4. Test mit 150 l Wasser, Tank waagrecht
5. Test wie 4, jedoch Heizung abgeschaltet

Bemerkung: Test 4 ist eine Wiederholung von Test 3, da sich bei Test 3 durch Öffnen der Klimakammer noch keine stabilen Verhältnisse ergeben haben.

Ergebnisse

Bei leerem Tank wurde im Heizvorgang eine max. Temperatur von 30°C ermittelt. Bei einer Taktfrequenz von 90 Minuten wurde 75 Minuten geheizt.

Bei 15 Litern Wasser und 5° sensorseitige Tankneigung ergab sich eine Taktfrequenz von 100 Minuten mit 65 Minuten Heizzeit.

Bei 150 Litern Wasser wurden Taktzeiten von 2-7 Stunden mit 50%igen Heizzeiten ermittelt.

Abbildung 19 zeigt beispielhaft die Aufzeichnung der Tanktemperaturen die mittels Thermoelementen im Tank und auf der Tankwand gemessen wurden sowie der Temperatur der Klimakammer während Test 4 mit 150 Liter Wasser und waagrechtem Tank. Die vollständigen Meßkurven die während der beschriebenen Tests aufgezeichnet wurden sind in Anlage 2 „Integrierte Heizung“ enthalten.

Heiztest im Freiland

Ziel des Tests war es zu prüfen, ob die eingebaute Heizung in der Lage ist, die Tanktemperatur bei Umgebungstemperaturen unter -20 °C auf +6 °C zu halten.

Der Tank wurde aus der Kältekammer in eine Holzkiste umgesetzt, die ihn vor direktem Wittereinfluß wie Schnee, Regen und Wind schützen sollte. Die Kiste wurde mit einer Plastikfolie abgedeckt.

Schlußbericht

Der Testzeitraum erstreckte sich vom 19.12.97 bis zum 31.03.98.

Die Holzkiste wurde während der gesamten Versuchszeit im Freigelände gelagert.

Der Versuch wurde mit 150 Liter Wasser durchgeführt.

In Perioden mit Außentemperaturen von -5°C wurde 25% Einschaltzeit zum Halten der geforderten Tanktemperatur von $+6^{\circ}\text{C}$ aufgezeichnet. Während der gesamten Versuchszeit wurden jedoch nur für wenige Tage Temperaturen in der Holzkiste unter -5°C gemessen. Das Taktverhältnis zwischen eingeschalteter und ausgeschalteter Heizung lag bei -5°C Außentemperatur bei 1:4, d. h. ca. 25 % der zur Verfügung stehenden Heizleistung wurden benötigt, um die Tanktemperatur auf die gewünschten $+6^{\circ}\text{C}$ zu halten.

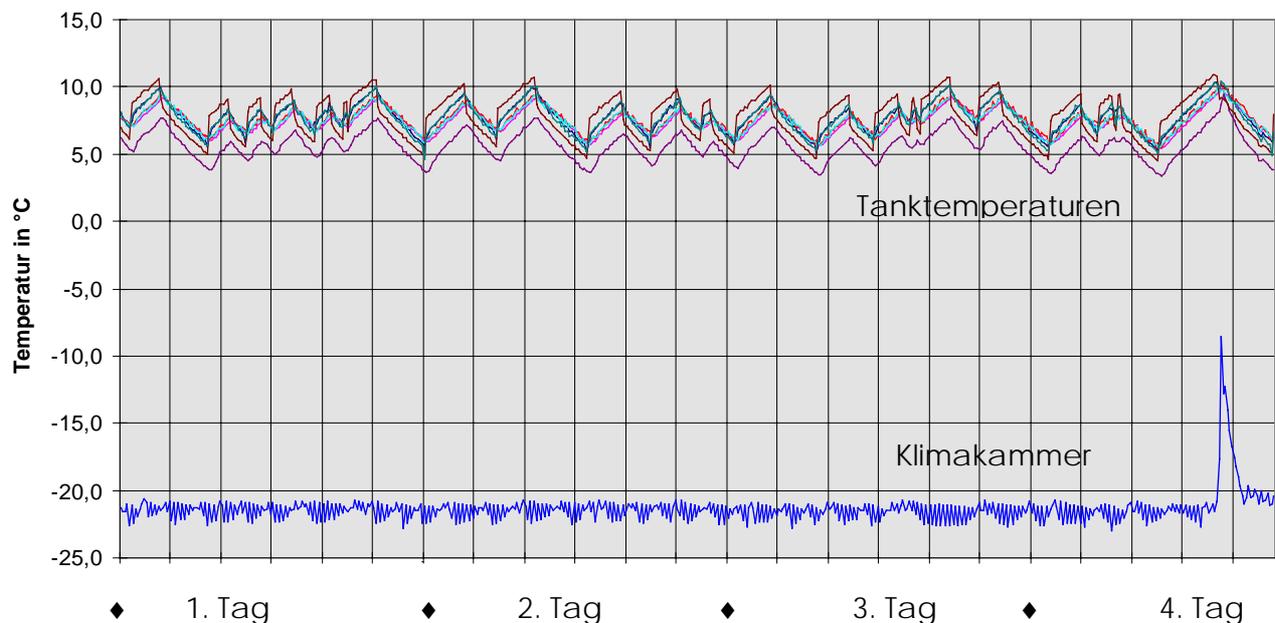


Abbildung 19: Test 4 Trinkwassertank mit 150 Liter Wasser; waagrecht

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Bei einer weiteren Bearbeitung, z.B. in einem Design Build Team mit Airbus, sind folgende Details und Einwände von DASA Airbus zu beachten:

- Airbus sieht zur Zeit nur dann einen Grund für die Umstellung des Heizsystems wenn damit eine wesentliche Kosten- oder Gewichtseinsparung verbunden ist.
- Die Sicherheit einer in den Verbund eingebetteten Heizung gegenüber dem herkömmlichen System welches den Austausch defekter Heizmatten beliebig oft zulässt, muß nachgewiesen sein.

Schlußbericht

- Es ist ein zweites Heizsystem vorzusehen, welches im Bedarfsfall mit gleicher Energieeinbringung genutzt werden kann. Bei wechselweiser Anordnung über den Umfang entsteht eine mehr oder weniger grobe Verteilung der Wärmeeinbringung in den Tank.
- Jedes der beiden unabhängigen Heizsysteme muß parallel geschaltete Heizkreise besitzen.
- Anzustreben ist eine größere Anzahl von Heizkreisen für eine feinere Energieverteilung

2.4.3 Füllstandsmessung

Mit der Erprobung sollte die sichere Funktion der Füllstandsmessung unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1.3 genannten Anforderungen bestätigt werden. Da die ersten Versuche zunächst Probleme bei großen Anstellwinkeln zeigten, wurden ein Großteil der Untersuchungen mit dem Medium Wasser durchgeführt. Über den Rechner des Technologieträgers wurde eine Vielzahl von Flügen mit unterschiedlichen Entnahmeverhalten der Passagiere simuliert und aufgezeichnet. Für die Bewertung der Ultraschall-Füllstandsmessung wurden die gewonnenen Meßergebnisse mit denen eines als Referenz eingebauten kapazitiven Stab-Sensors, wie er z.Zt. im Frischwasser ohne Probleme eingesetzt wird, verglichen. Der gegenwärtige kapazitive Stab-Sensor zeichnet sich jedoch durch ein hohes Gewicht aus und muß Kontakt zum Meßmedium haben.

Meßergebnis

Beim Befüllvorgang zeigten sich einwandfreie Meßergebnisse ab einer Füllhöhe von 3 cm. Bei Füllhöhen < 3 cm lief das 1 Echo in den Totzeitbereich mit dem Ergebnis, daß das 2 Echo gemessen wurde und so zu erhöhten Ausgabewerten führte. Durch Änderungen konnte dieses Fehlverhalten beseitigt werden.

Während des simulierten Flugbetriebes wurden bei Anstellwinkeln zwischen -5° und $+15^\circ$ sowie Wasserentnahmen von 0,2 – 14 l/min. nach Anpassung der Schallkeule und Schalleistung einwandfreie Meßergebnisse erreicht.

Erste Versuch mit Fäkalien haben ähnlich Ergebnisse gezeigt, wobei weiterführende Anpassungen aufgrund des Mediums und seiner in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Zusammensetzung erforderlich sind.

Zusätzlich zu den am Versuchsträger durchgeführten Versuchen befinden sich drei Ultraschallsensoren seit März 1997 in einem A340 VIP Flugzeug im Einsatz. Die Sensoren wurden zur Messung des Füllstandes in Frischwassertanks (hiefür wurde baugleiche Tanks wie der A340 Abwassertank verwendet) und in einem Grauwassertank zur Ermittlung der Füllhöhe sowie zur „Voll“-Erkennung eingesetzt. Bisher wurde uns vom Kunden eine einwandfreie Funktion der Sensoren bestätigt. Die normale Schaumbildung im Grauwassertank führt zu keiner Beeinflussung der Füllstandsmessung.

Schlußbericht

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die benötigte Frisch- und Abwassertankkapazität eines MEGALINERS beträgt zusammen bis zu 4396 Liter und erhöht sich in einem umweltfreundlichen Flugzeug ohne Grauwasserableitung über Drain Mast um weitere 1500 Liter. Würde man die gegenwärtig größten Frisch- und Abwassertanks des A340 mit 350 Liter Volumen in den MEGALINER einbauen, so müßten ca. 15 Wassertanks pro Flugzeug integriert werden. Vor diesem Hintergrund tritt die Bedeutung wirtschaftlicher Tankkonzepte deutlich hervor. Mit dem Ziel der Gewichts- und Kostenreduzierung wurden folgende Tankaspekte untersucht:

- Erstellung eines Rechenprogramms zur parametrischen Untersuchung der Wandstärke und Masse der Wassertanks in Abhängigkeit von der Tankgeometrie.
Mit Hilfe des Programms kann die Masse eines Tanks mit gegebenen Abmessungen schnell ermittelt werden bzw. die gewichtsoptimale Kontur eines Tanks mit vorgegebenem Volumen bestimmt werden.
- Weitestgehend baugleiche Frisch- und Abwassertanks um die Kosten für Fertigungsvorrichtungen zu minimieren.
Derzeit sind noch keine Innenbeschichtungen verfügbar, die für beide Anwendungen geeignet sind.
Der verfügbare Platz und die Notwendigkeit von Wasteseparatoren läßt voraussichtlich keine baugleichen Tanks zu.
- Neue Fertigungsverfahren.
Das Verfahren mit einem vakuumstabilisierten Kern bietet den Vorteil, daß der Tank zur Entfernung des Wickeldorns nicht getrennt und anschließend wieder gefügt werden muß.
- In die Tankstruktur integrierter Vereisungsschutz.
Ein Baumuster mit einer in die Tankwand aus Faserverbund integrierten Heizung wurden gefertigt und getestet, Einwände von DASA Airbus müssen durch praktischen Nachweis ausgeräumt werden.
- Neue Isolationskonzepte
Ein Baumuster mit einer neuen kostengünstigen Isolation wurde hergestellt und an einem Tank mit integrierter Heizung getestet.
- Neue Füllstandssensoren ohne Kontakt zum Medium und daher ohne die Notwendigkeit von Bohrungen im Tank.
Tanks mit Ultraschallfüllstandsmessung befinden sich z.Zt. in einem A340 erfolgreich im Flugversuch.

Die Integration von Bauteilen in den Tank reduziert die Kosten für die Anschaffung von Einzelteilen sowie für die Tankkomplettierung und den Einbau im Flugzeug.

Schlußbericht

4 Literaturverzeichnis

- Norm DAN88 (9/94)
- Norm DAN 89 (9/71)
- Airbus Industrie Dokument 3073 M1E 010501 (10/94)
- Airbus Industrie Specification 3073 M1E 020601 (Heater & Insulation)
- Einbauskizzen H. Raebel, MT-Prinzipskizze SK-A-0369-C (08.10.97)
- Arbeitsplan H. Raebel (14.01.97)
- Qualification Test Procedure (QTP) SS-130-XX-00-01, H. Raebel (15.10.97)

- Versuchsberichte:
 1. Testprogramm Heiztest, H. Raebel (17.07.97)
 2. Auswertung Temperaturtests (27.1.-2.2.98), H. Schwarz (8/98)
 3. Aktenvermerk 210897-WBM-Schw, „bisherige Tests“ (8/98), H. Schwarz
 4. Protokoll H. Raebel „Tests 11.8 – 20.8.97, 5 Heizversuche“ (10.09.97)

- Produktinformationen:
 1. AIREX Gaugler & Lutz (1/98)
 2. DIAB: Divinycell H (11/97)
 3. DIAB: Divinycell TP (10/98)
 4. Röhm: Rohacell A (1998)
 5. HEXCEL: TSB 120 (1987)
 6. Plascore: Plascore PC (4/89)
 7. ESW: Referenzmaterial nach DAN88B20 und DAN89B
 8. Component Maintenance Sheet (CMS) 272-40 7704 (10.05.95)
(Masse der Isolation)
 9. Airbus Industrie Dokument 3073 M1E 010501 (10/94)
(Dicke der Isolation, Lagenaufbau)
 10. SPEKON: Fax 03.02.99
 11. Jehier: Fax 09.02.98
 12. Illbruck: Faxe 28.04.97 & 25.09.97



ANLAGEN

1. Tankintegration; Abbildungen



ANLAGEN

2. Integrierte Heizung; Testergebnisse

Schlußbericht

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|------------------------------|---|
| Abbildung 1: | SK-A-0349-E Blatt 3 von 3 | Tankeinbauraum; Übersichtszeichnung |
| Abbildung 2: | SK-A-0349-E Blatt 1 von 3 | Spannhöhen |
| Abbildung 3: | SK-A-0349-E Blatt 2 von 3 | Sicherheitsabstände, Montageabstand |
| Abbildung 4: | SK-A-0320-E | A-340 Abwassertank: Abmessungen |
| Abbildung 5: | SK-A-0319-E Blatt 1 von 2 | „Stehende“ Tanks mit 830 mm Durchmesser und unterschiedlicher Höhe |
| Abbildung 6: | SK-A-0319-E Blatt 2 von 2 | „Stehende“ Tanks mit 830 mm Durchmesser und unterschiedlicher Höhe; Übersicht |
| Abbildung 7: | SK-A-0321-E Blatt 1 von 2 | „Stehende“ Tanks mit 950 mm Durchmesser und unterschiedlicher Höhe |
| Abbildung 8: | SK-A-0321-E Blatt 2 von 2 | „Stehende“ Tanks mit 950 mm Durchmesser und unterschiedlicher Höhe; Übersicht |
| Abbildung 9: | SK-A-0355-E Blatt 1 von 2 | „Stehende“ Tanks mit 830 mm und 1100 mm Durchmesser; Tankdimensionen |
| Abbildung: 10 | SK-A-0355-E Blatt 2 von 2 | „Stehende“ Tanks mit 830 mm und 1100 mm Durchmesser; Übersicht |
| Abbildung 11: | SK-A-0323-E Blatt 1 von 2 | Maximal integrierbares Tankvolumen mit zwei „liegende“ Tanks und einem „stehenden“ Abwassertank mit 830 mm Durchmesser und unterschiedlicher Höhe; Länge des Einbauraums: 3882 mm |
| Abbildung: 12 | SK-A-0323-E Blatt 2 von 2 | Zwei „liegende“ Tanks und ein „stehender“ Abwassertank mit 830 mm Durchmesser und unterschiedlicher Höhe; Übersicht |

Schlußbericht

| | | |
|---------------|------------------------------|--|
| Abbildung: 13 | SK-A-0324-E Blatt 1 von 2 | Maximal integrierbares Tankvolumen mit zwei „liegenden“ Tanks und einem „stehenden“ Abwassertank mit 830 mm Durchmesser und unterschiedlicher Höhe; Länge des Einbauraums: 3349 mm |
| Abbildung: 14 | SK-A-0324-E Blatt 2 von 2 | Zwei „liegende“ Tanks und ein „stehender“ Abwassertank mit 830 mm Durchmesser; Länge des Einbauraums: 3349 mm; Übersicht; |
| Abbildung: 15 | SK-A-0326-E Blatt 1 von 2 | Ein „liegender“ Trinkwassertank, ein kegelförmiger und ein „stehender“ Abwassertank; Länge des Einbauraums: 3944 mm; Tankdimensionen |
| Abbildung: 16 | SK-A-032-E Blatt 2 von 2 | Ein „liegender“ Trinkwassertank, ein kegelförmiger und ein „stehender“ Abwassertank; Länge des Einbauraums: 3944 mm; Übersicht |
| Abbildung: 17 | SK-A-0327-E Blatt 1 von 2 | Ein „liegender“ Trinkwassertank, ein konturnaher, druckloser und ein „stehender“ Abwassertank; Länge des Einbauraums: 3944 mm; Übersicht; Der konturnahe Abwassertank gehört zu beiden Systemhälften; Tankdimensionen |
| Abbildung: 18 | SK-A-0327-E Blatt 2 von 2 | Ein „liegender“ Trinkwassertank, ein konturnaher, druckloser und ein „stehender“ Abwassertank; Länge des Einbauraums: 3944 mm; Übersicht; Der konturnahe Abwassertank gehört zu beiden Systemhälften; |

Schlußbericht

LUFTFAHRTFORSCHUNGSPROGRAMM 1

**FORTSCHRITTLICHES
WASSERSYSTEM**

Arbeitspaket 6.2

Frischwassersystem für Mehrdeckflugzeuge

| | |
|--------------------|---------------------------|
| Laufzeit: | Juli 1995 - Dezember 1998 |
| Förderkennzeichen: | WIF 9503 J |
| Verfasser: | Andreas Engelmann |

MAN Technologie AG
Liebigstraße 5a
85757 Karlsfeld

Telefon: (08131) 89-1803
Telefax: (08131) 89-1914

Schlußbericht

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | BESCHREIBUNG DES VORHABENS..... | 2 |
| 1.1 | Gesamtziel des Vorhabens..... | 2 |
| 1.2 | Planung und Ablauf der Arbeiten..... | 3 |
| 2 | ERGEBNISSE DES VORHABENS..... | 5 |
| 2.1 | Definition der Anforderungen..... | 5 |
| 2.2 | Technologieübersicht..... | 7 |
| 2.3 | Konzepterstellung und Konzeptbewertung..... | 16 |
| 2.4 | Systemdefinition..... | 42 |
| 2.5 | Herstellung des Technologieträgers..... | 43 |
| 2.6 | Erprobung des Technologieträgers..... | 46 |
| 2.7 | Versuchsauswertung..... | 61 |
| 2.8 | Engineering Mock-up Rumpfsektion..... | 63 |
| 3 | ZUSAMMENFASSUNG..... | 67 |

Schlußbericht

1 BESCHREIBUNG DES VORHABENS

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Der ständig steigende Lufttransportbedarf führt zur Entwicklung von Flugzeugen mit größerer Transportkapazität. Dies bedingt die Entwicklung völlig neuer Mehrdeckflugzeuge mit steigendem Frischwasserbedarf, womit neue und kritische Problemstellungen im Bereich der Frischwasserversorgung der Passagiere verbunden sind.

Das Ziel des Vorhabens war es, gemeinsam mit dem Flugzeughersteller DaimlerChrysler Aerospace Airbus GmbH und Partnern aus Forschung (TU Berlin und TU Hamburg-Harburg) und Industrie (AOA Gauting) ein Frischwassersystem neuer Technologie zu entwickeln, das dem Bedarf eines Großflugzeuges der Zukunft (Megaliner 2010) bestmöglich gerecht wird.

Das Frischwassersystem umfaßt dabei die Frischwasserspeicherung (vollintegrierte Tanks) und die Frischwasserversorgung über mehrere Kabinendecks bis zu den Endverbrauchern mit allen zugehörigen Einzelkomponenten.

Ziel war eine Systemauslegung, die die Anforderungen einer flexiblen Kabinengestaltung, einer energie-, handlings- und montageeffizienten Eisfreihaltung vereint. Möglichkeiten einer Desinfektion und Wasserentkalkung im Frischwassersystem sollten angedacht werden.

Neben der Auslegung des neuen Frischwassersystems und der Simulation, die in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin durchgeführt wurde, erfolgte der Aufbau und die Erprobung von Subsystem-Testeinrichtungen. Ergebnisse der an der TU Hamburg-Harburg im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen zum Rohrleitungsaufbau wurden dabei integriert.

Zum Abschluß des Vorhabens wurde der Technologie-Demonstrator in Form eines Frachtcontainers einem gemeinsamen Engineering Mock-up "Rumpfsektion" der DaimlerChrysler Aerospace Airbus GmbH zugeführt.

Schlußbericht

1.2 Planung und Ablauf der Arbeiten

MAN Technologie beteiligte sich an dem vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben „Fortschrittliches Wassersystem“ mit den Teilaufgaben „Vollintegrierte Tanks“ und „Frischwassersystem für Mehrdeckflugzeuge“. Eine dritte Teilaufgabe „Grauwasseraufbereitung“ wurde zu einem späteren Zeitpunkt beantragt und im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bearbeitet. Das Forschungsvorhaben erstreckte sich über den Zeitraum vom 01. Juli 1995 bis 31. Dezember 1998.

Zielsetzung des Projektes war es in Zusammenarbeit mit der DaimlerChrysler Aerospace Airbus GmbH (Projektleitung) und weiteren Partnern aus Industrie und Wissenschaft die technologischen Grundlagen der Gestaltung der Wasserver- und entsorgung eines zukünftigen Mehrdeckflugzeuges zu erarbeiten.

Der Arbeitspunkt 6.2 „Wassersystem für Mehrdeckflugzeuge“ gliederte sich dabei in folgende Schritte:

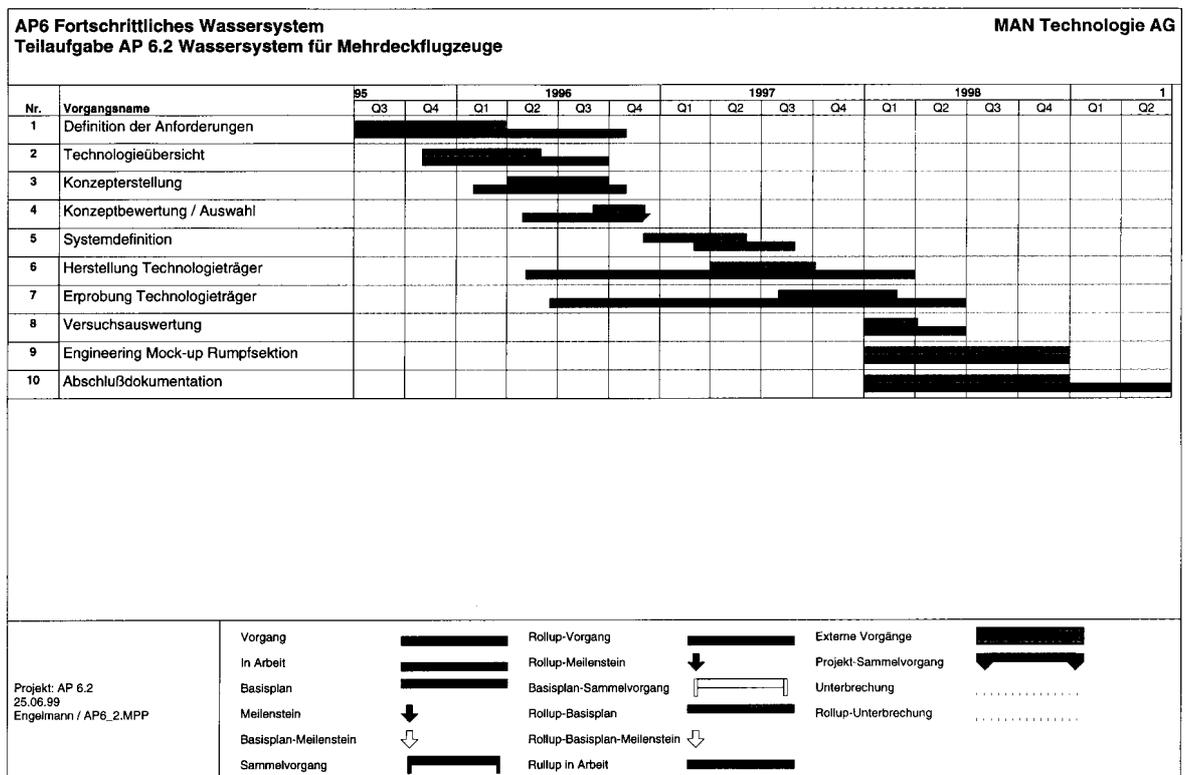


Abbildung 1: Projektterminplan

Schlußbericht

Die Definition der Anforderungen hat sich bis ins 4. Quartal 1996 verzögert, wegen des großen Einflusses der Flugzeuggesamtauslegung auf die Anforderungen für das Frischwassersystem.

Die Erstellung der Technologieübersicht hat sich wegen der Erlangung von Erkenntnissen über geeignete Desinfektions- und Entkalkungsverfahren bis Ende 3. Quartal 1996 verzögert.

Das führte zu einer geringfügigen Verzögerung der Konzepterstellung. Aufgrund der vorzeitig begonnenen Konzeptbewertung konnte der Meilenstein Konzeptauswahl eingehalten werden.

Der Beginn der Systemdefinition hat sich aufgrund der Verzögerungen bei der Systemsimulation an der TU Berlin um 3 Monate verschoben und dadurch bedingt auch der Abschluß dieses Punktes.

Mit der Herstellung und Erprobung der Technologieträger wurde bereits während der Konzepterstellung begonnen. Für die Fertigstellung der endgültigen Konfiguration des Technologieträgers mußte der Abschluß der Studie über Möglichkeiten der Desinfektion abgewartet werden. Dadurch verzögerte sich auch das Ende der Versuche und die Versuchsauswertung bis Ende des 2. Quartals 1998.

Die Erstellung des Engineering Mock-up Rumpfsktion erfolgte termingerecht.

Der Erstellung der Abschlußdokumentation erstreckte sich bis in das 2. Quartal 1999.

Der Kostenrahmen des Projektes wurde eingehalten.

Schlußbericht

2 ERGEBNISSE DES VORHABENS

2.1 Definition der Anforderungen

Leitungsverlegung

Die Rohrleitungen sind aufgrund der Platzverhältnisse horizontal im Kabinenboden zu verlegen.

Förderdruck

Der Förderdruck beträgt heute 1,72 bar oder 25 psi. Da der Megaliner aus zwei Decks besteht, ist zu prüfen, ob eine Druckerhöhung erforderlich ist. Wegen der großen Leitungslängen des Megaliners sind Druckverluste und erforderliche Leitungsquerschnitte zu ermitteln.

Fördermenge

In dem Megaliner sind bis zu 20 Galleys, 20 Toiletten und 20 Waschbecken installiert.

Je Gerät wird folgende maximale Durchflußmenge angesetzt:

| | | |
|--------------|---------------------|----------|
| Galley: | Kaffeemaschine | 4 l/min |
| Toilette: | Toilettenspülventil | 12 l/min |
| Waschbecken: | Wasserhahn | 2 l/min |

Im Flug hat der Rumpf des Megaliners einen Anstellwinkel von bis zu 3°, bei dem eine sichere Wasserversorgung aller Verbraucher gewährleistet sein muß.

Eisfreihaltung

Um Heizleistung und Isolationsaufwand zu minimieren, sollen die Frischwasserleitungen möglichst innerhalb der Kabine verlegt werden. Hierbei ist zu überlegen, ob diese Frischwasserleitungen in der Zwischendecke von Oberdeck und Hauptdeck liegen könnten.

Die Auslegung als Ringleitungssystem mit zentralem Heizer statt Beheizung der gesamten gefährdeten Leitungslänge ist zu prüfen.

Schlußbericht

Drainage

Die vollständige Drainage des Frischwassersystems am Boden ist zu realisieren. Der Neigungswinkel des Flugzeugrumpfes kann am Boden bis zu $\pm 2^\circ$ betragen.

Drainageverfahren mit Druckluft und mit Unterdruck sind zu prüfen.

Desinfektion / Verkalkung

Das Frischwassersystem muß vollständig desinfizierbar sein.

Installation von Desinfektions- und Entkalkungsgeräten im Frischwassersystem sollen untersucht werden.

Redundanz

Zwei Teilsysteme um bei Teilausfall des Frischwassersystems auf jedem Deck einen Teil der Galleys und Lavatories weiter mit Wasser zu versorgen.

Fehler innerhalb einer Galley oder eines Lavatory darf die Funktion des übrigen Systems nicht beeinträchtigen.

Schlußbericht

2.2 Technologieübersicht

2.2.1 Frischwassersystem

Die Auslegung des Frischwassersystems wird von den räumlichen Möglichkeiten wesentlich beeinflusst. Der verfügbare Bauraum beeinflusst vor allem die Leitungsverlegung, die Tankform und die Tankposition. Weiter gibt es zwei grundsätzliche Systemprinzipien - Stichleitungssystem und Ringleitungssystem. Die wesentlichen Systemparameter sind in den Tabellen 1 und 2 dargestellt. In Tabelle 1 sind die Parameter auf die Tankart bezogen, in Tabelle 2 auf das Systemprinzip.

Variationen

| | Förderung | Drainage | |
|---|--------------------------|--|---|
| | | Leitung | Tank |
| Drucktanks (rotations- symmetrisch) | Druckluft (Pumpe) | Druckluft (Pumpe) Unterdruck +Gerät | Druckluft (Pumpe) Schwerkraft |
| Drucklose Tanks (konturnah) | Pumpe | Pumpe Unterdruck + Zwischen- kammer Überdruck + Ventil + Gerät | Pumpe Schwerkraft |

Tabelle 1: Tankarten

Schlußbericht

| | Förderung | Leitungslänge (Platzbedarf, Kosten) | Redundanz / Leitungslänge | Möglichkeit der zentralen Heizung | Möglichkeit der laufenden Desinfektion u. Entkalkung |
|------------------------------------|---|---|------------------------------|---|---|
| Ringleitungen mit Umwälzpumpe | <input type="radio"/> Förder- pumpe <input type="radio"/> Druckluft | lang | gering | ja | ja |
| Stichleitungen (Druckleitungen) | <input type="radio"/> Förder- pumpe <input type="radio"/> Druckluft | kurz | hoch | nein | nein oder Bypassleitung zum Tank |

Tabelle 2: Leitungssystem

Bei heutigen Großraumflugzeugen werden die folgenden Systemdrücke und Rohrleitungsdurchmesser verwendet:

Druckbereich

Der maximale Fließdruck an den Verbrauchern ist bei heutigen Flugzeugen:

2,1 bar (Airbus Standard A330/340) und
 2,8 bar (Boeing Standard 747-400).

Der zugehörige Minimaldruck ist:

0,7 bar.

Rohrdurchmesser

Bei heutigen Flugzeugen beträgt der Rohrdurchmesser der Hauptleitungen meist $\frac{3}{4}$ Zoll, der Durchmesser der Stichleitungen zu den Verbrauchern $\frac{1}{2}$ Zoll.

Schlußbericht

2.2.2 Frischwasserdesinfektion

Nach deutschem Recht ist bei Frischwasserdesinfektionsverfahren zu unterscheiden, ob Trinkwasser direkt oder Anlagen zur Trinkwasserversorgung desinfiziert werden sollen. Im ersten Fall ist die Trinkwasserverordnung einzuhalten, die zur Desinfektion lediglich Chlorgas, Natrium-, Calcium- Magnesiumhypochlorit, Chlorkalk, Chlordioxid und Ozon erlaubt. Desweiteren dürfen Silber, Silberchlorid, Silbersulfat und Natriumsilberchloridkomplexe zum Zwecke der Konservierung in geringen Konzentrationen in Ausnahmefällen, nicht aber systematisch, zugegeben werden. Es sind die zulässigen Zugabekonzentrationen und die Grenzwerte nach Aufbereitung einzuhalten. Darüberhinaus ist nach deutschem Lebensmittelrecht die UV-Strahlung zur Desinfektion von Trinkwasser zugelassen.

Wichtig ist der Unterschied zwischen Desinfektion und Sterilisation.

Die Sterilisation ist die 100%-ige Abtötung aller Mikroorganismen inklusive der zugehörigen Ruhestadien (Sporen).

Der Begriff Desinfektion greift nicht so weit. Er steht für Maßnahmen, die durch die Abtötung, Reduzierung, Inaktivierung beziehungsweise die Entfernung von pathogenen Mikroorganismen (Bakterien, Viren, Pilze, Protozoen) ein Material oder einen Stoff in einen nichtinfektiösen Zustand versetzen. Dazu ist es erforderlich die normalerweise vorhandene Gesamtkeimzahl um mindestens den Faktor 10^4 zu reduzieren.

Schlußbericht

2.2.3 Frischwasserentkalkung

Derzeit fordern weder USPH noch FAA/JAA Vorschriften eine Entkalkungseinrichtung an Bord eines Flugzeuges. Zur Verbesserung der Performance des Flugzeuges könnten eine oder mehrere Entkalkungseinrichtungen in das Frischwassersystem integriert werden.

2.2.3.1 Wasserhärte / Kalksteinbildung

Mit Härte bezeichnet man die Summe der im Wasser gelösten Erdalkalien Calcium, Magnesium, Strontium und Barium. Für die Wasseraufbereitung haben praktisch nur Calcium und Magnesium Bedeutung.

Als Einheit der Härte wird in Deutschland der deutsche Härtegrad verwendet:

$$1^{\circ}\text{dH} = 10 \text{ mg CaO/l oder } 7,14 \text{ mg MgO/l}$$

$$(1 \text{ mval/l} = 28 \text{ mg CaO/l oder } 20 \text{ mg MgO/l} = 2,8^{\circ}\text{dH})$$

Kalkablagerungen oder Wasserstein bilden sich durch Abspaltung freier Kohlensäure aus Calciumhydrogencarbonat:



Mit steigender Temperatur nimmt die Steinbildung zu. Bei Anlagen die in Verbindung mit der Atmosphäre stehen, wird die Reaktion durch die Möglichkeit des Entweichens von Kohlenstoffdioxid begünstigt.

- Bei elektrisch beheizten Wassererwärmern kommt es mit zunehmender Steinbildung wegen der konstant bleibenden elektrischen Leistung zu erhöhten Temperaturen an den Heizelementen, was zum Defekt der Heizelemente führen kann.
- Bei Durchfluß-Wassererwärmern kann es als Folge der Steinbildung zu einer Verringerung des Strömungsquerschnitts und damit zur Durchflußreduzierung kommen.

Entscheidend für die Steinbildung ist nicht die Wassertemperatur im Inneren des Wassererwärmers, sondern die Wandtemperatur an der Wärmeübertragungsfläche.

Schlußbericht

2.2.3.2 Schutzmaßnahmen

Konstruktionstechnische Maßnahmen

- Um eine möglichst niedrige Wandtemperatur zu erreichen, sollte die Heizleistung - wenn möglich - gleichmäßig auf großen Flächen verteilt werden.

Weitere Maßnahmen sind:

- Gutes Anströmen der Heizflächen
- Geringe Rauigkeit der Heizflächen
- Schnelle Regelbarkeit

Häufig lagert sich die gesamte Kalkmenge nur auf verhältnismäßig kleinen Flächen ab. Dies hängt damit zusammen, daß die Kalkabscheidung auf einer belagfreien, glatten Fläche sehr stark gehemmt ist und sehr viel leichter auf einer Fläche erfolgt, auf der bereits Kalk abgeschieden worden ist.

Wasserseitige Schutzmaßnahmen

Wasserseitige Maßnahmen zur Vermeidung von Kalkschäden sind u.a. Härtestabilisierung und Enthärtung. Andere Verfahren wie z.B. Umkehrosmose scheiden aus Gewichts- und Platzgründen für die Anwendung im Flugzeug von vornherein aus. Die Wirksamkeit physikalischer Wasserbehandlungsverfahren ist dagegen umstritten.

Enthärtung und Entsalzung

Die sichersten Verfahren zur Vermeidung von Steinbildung sind die Enthärtung und die Entsalzung. Bei der Enthärtung werden die im Wasser enthaltenen Calcium- und Magnesiumionen durch Natriumionen ersetzt (Ionenaustausch) (Abbildung 2). Bei der Entsalzung werden dagegen alle ionogenen Stoffe durch Ionenaustausch und Umkehrosmose entfernt.

Ein im Ionenaustauschverfahren enthärtetes Wasser enthält nur noch sehr geringe Anteile an Calcium- und Magnesiumionen. Kalkhaltiges Wasser durchfließt das Austauschmaterial (Kunstharzkügelchen mit einem Durchmesser von etwa 1 mm) das mit Natriumionen angereichert ist. Dabei werden die Calcium- und Magnesiumionen durch Natriumionen ersetzt. Das aufbereitete Wasser enthält keine Wasserhärte mehr, ist aber natriumreicher.

Schlußbericht

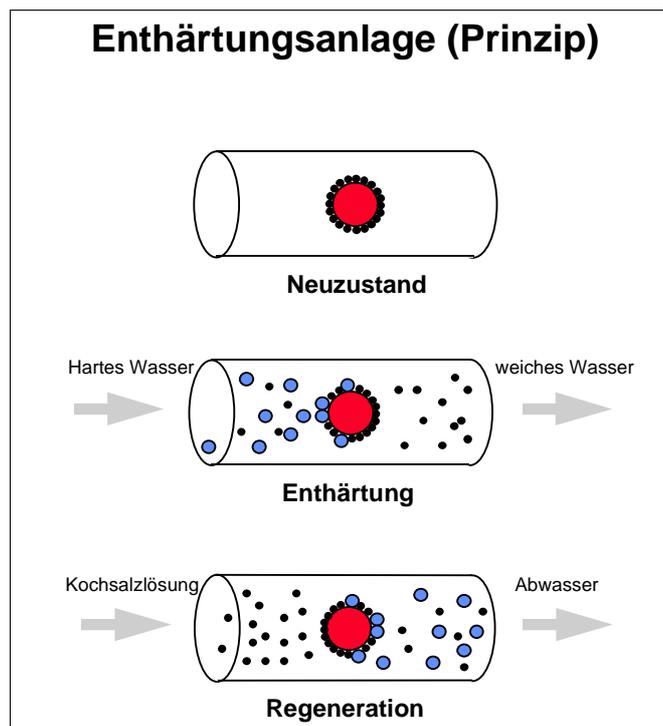


Abbildung 2: Wasseraufbereitung

Laut Trinkwasserverordnung darf ein Natriumgrenzwert von 150 mg pro Liter im Trinkwasser nicht überschritten werden und eine Mindesthärte von 8,4°dH und damit ein Mindestgehalt an Calcium und Magnesium nicht unterschritten werden (Tabelle 3), da Trinkwasser eine wichtige Quelle für Calcium und Magnesium in der menschlichen Ernährung ist.

Da Ionenaustauscher das Wasser jedoch fast vollständig enthärten und dabei pro Härtegrad 8,2 mg/l Natrium ins Wasser abgegeben werden, darf nur ein Teilstrom des Wassers durch den Ionenaustauscher fließen. Das enthärtete Wasser wird in der Verschnideeinrichtung noch in der Wasserenthärtungsanlage mit unbehandeltem Wasser auf mindestens 8,4°dH verschnitten.

Nachdem eine gewisse Wassermenge enthärtet worden ist, ist das Austauschmaterial mit Calcium- und Magnesiumionen belegt und verliert seine Wirkung. Der Ionenaustauscher muß daher von Zeit zur Zeit mit Kochsalzlösung regeneriert werden.

Schlußbericht

Dabei werden die Calcium- und Magnesiumionen durch die viel konzentrierteren Natriumionen ersetzt. Die Salzreste fließen ins Abwasser.

Ionenaustauscheranlagen neigen insbesondere bei diskontinuierlichem Betrieb zur Verkeimung. Um die Trinkwasservorschriften in mikrobiologischer Hinsicht zu erfüllen (Prüfnorm DIN 19636) sind geeignete konstruktive oder chemisch-physikalische Maßnahmen zu treffen. Die Verkeimungsgefahr hängt vor allem von der Wasserzusammensetzung (Gehalt an Huminstoffen, Mineralstoffen usw.) ab. Das Austauschmaterial muß spätestens alle 4 Tage desinfiziert werden. Desinfektion und Regeneration werden sinnvollerweise gekoppelt. Zum einen wirkt die Salzlösung keimtötend, zum anderen wird dabei Chlorgas zur Desinfektion elektrolytisch erzeugt.

Wird wenig Wasser verbraucht, so kommt es trotzdem spätestens alle 4 Tage zu einer "Zwangsregeneration", d.h. der Austauscher wird mit Kochsalzlösung gespült, obwohl er noch nicht "erschöpft" ist.

| | |
|---|----------------|
| Trinkwassermindesthärte | 8,4°dH |
| Natriumgrenzwert | 150 mg/l |
| Pro °dH werden pro l ins Rohwasser abgegeben | 8,2 mg Natrium |
| Maximales Desinfektionsintervall (Prüfnorm DIN 19636) | 4 Tage |

Tabelle 3: Trinkwasserverordnung, Prüfrahmen

Härtestabilisierung

Bei der Härtestabilisierung wird dem Wasser mit Hilfe eines Dosiergerätes ein Wirkstoff zugegeben, der den Kalk entweder in Lösung hält oder in Schlammform ausfallen läßt, so daß eine Kalkablagerung verhindert wird (Abbildung 3).

Für die Härtestabilisierung von Trinkwasser ist laut Trinkwasserverordnung ausschließlich Polyphosphat zugelassen. Polyphosphate behindern das Aufwachsen von Kalkbelägen, indem sie Kristallkeime am Wachsen hindern.

Schlußbericht

- Zum harten Wasser wird mit einem Dosiergerät Polyphosphat (max. 5 mg/l P_2O_5 bzw. 6,4 mg/l PO_4^{3-}) zugeben, das den Kalk in Lösung hält.
- Ein Teil des Mineralstoffes wird zur Bildung einer Schutzschicht innerhalb verzinkter Rohrleitungen verbraucht.

Prinzip

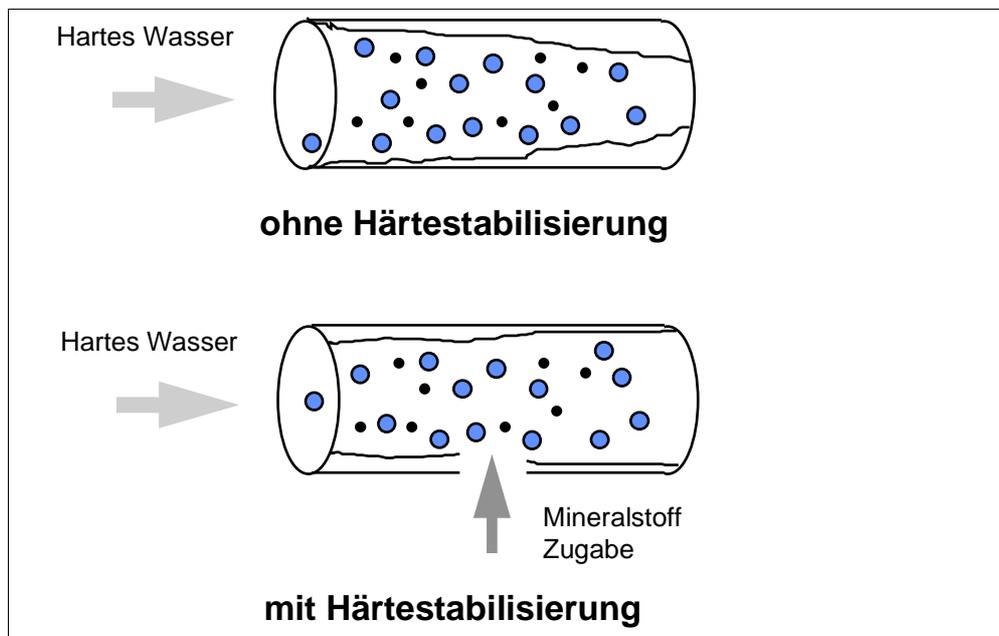


Abbildung 3: Wasseraufbereitung

Eine Dosieranlage zur Wasserhärtestabilisierung besteht aus einer Dosierpumpe, welche dem Wasser durchflußgesteuert eine Mineralstofflösung zudosiert. Die Mineralstofflösung kann als fertige Lösung in einem "Liefergebilde" beim Dosieranlagenhersteller bezogen werden, oder in einem "Dosierbehälter" mit Rührgerät aus einem Pulver und Wasser nach Bedarf hergestellt werden.

Pro Kubikmeter Wasser werden 75 - 100 ml Lösung zudosiert, so daß die Phosphatkonzentration im Trinkwasser maximal 5 mg/l P_2O_5 (entsprechend 6,4 mg/l PO_4^{3-}) beträgt.

Schlußbericht

Physikalische Wasserbehandlung

Physikalische Wasserbehandlungsanlagen sollen eine Kalkablagerung "ohne Einsatz von Chemie" verhindern. Sie funktionieren auf der Basis von:

- permanentmagnetischen Feldern
- elektromagnetischen Feldern
- elektrostatischen Feldern
- elektrodynamischen Feldern
- Wechselstromfeldern
- Ionenaktivierung u.a.

Anerkannte Erklärungen der Wirkungsweise und stichhaltige Nachweise der Wirksamkeit der Verfahren liegen zur Zeit nicht vor.

Die Europäische Vereinigung für Wasseraufbereitung "Aqua Europa" stellt fest: "Über physikalische Wasserbehandlungsgeräte gibt es weder eine wissenschaftlich akzeptierte Theorie, noch eine statistisch gesicherte, empirisch ermittelte Abhängigkeit zwischen Voraussetzung und Wirkung".

2.2.4 Systemsteuerung

Die heutige Stand der Steuerung des Frischwassersystems beruht auf Relais-Technik. Das Frischwassersystem ist im Gegensatz zum Toilettensystem nicht in das existierende "System Monitoring und Maintenance" Konzept integriert.

Ein rechnergestütztes Überwachungs- und Steuerungssystem kann nicht nur wie das heutige System die Wasserfüllstände ermitteln, sondern auch Fehlfunktionen der Geräte aufzeichnen und melden.

Dadurch läßt sich erprobtermaßen die Fehlersuche vereinfachen und der Austausch defekter Geräte während der Bodenzeit des Flugzeuges zeitsparend vornehmen.

Schlußbericht

2.3 Konzepterstellung und Konzeptbewertung

2.3.1 Systemkonfigurationen Frischwassersystem

Konzeptbeschreibung

Um genauere Untersuchungen des geplanten Frischwassersystems durchzuführen, wurden fünf verschiedene Systemkonzepte analysiert und bewertet. Alle fünf Frischwassersysteme sind in zwei unabhängige Teilsysteme unterteilt – ein linkes und ein rechtes Teilsystem. Die Abbildungen 4 bis 8 zeigen jeweils die rechten Teilsysteme.

Allen Konzepten gemeinsam ist die horizontale Leitungsverlegung und die dadurch erforderliche Systemdrainage mittels Druckluft oder Unterdruck.

1 Konzepte mit druckbeaufschlagten Tanks

1.1 Konzept mit vier Hauptstichleitungen zur Versorgung der linken und rechten Systemseite auf Ober- und Hauptdeck (Abbildung 4).

1.2 Konzept mit geschlossenem Ringleitungssystem, in dem das Wasser zirkuliert. Je ein linker und rechter vertikaler Kreislauf verbindet Ober- und Hauptdeck (Abbildung 5).

2 Konzepte mit Pumpen für den Wassertransport

2.1 Konzept mit vier Hauptstichleitungen entsprechend Konzept 1.1, aber mit angepaßtem Tank (Abbildung 6).

2.2 Konzept mit geschlossenem Ringleitungssystem, in dem das Wasser zirkuliert und den Tank durchströmt. Je ein linker und rechter vertikaler Kreislauf verbindet Ober- und Hauptdeck (Abbildung 7).

2.3 Konzept mit geschlossenem Ringleitungssystem, in dem das Wasser zirkuliert. Je ein linker und rechter vertikaler Kreislauf verbindet Ober- und Hauptdeck (Abbildung 8).

Schlußbericht

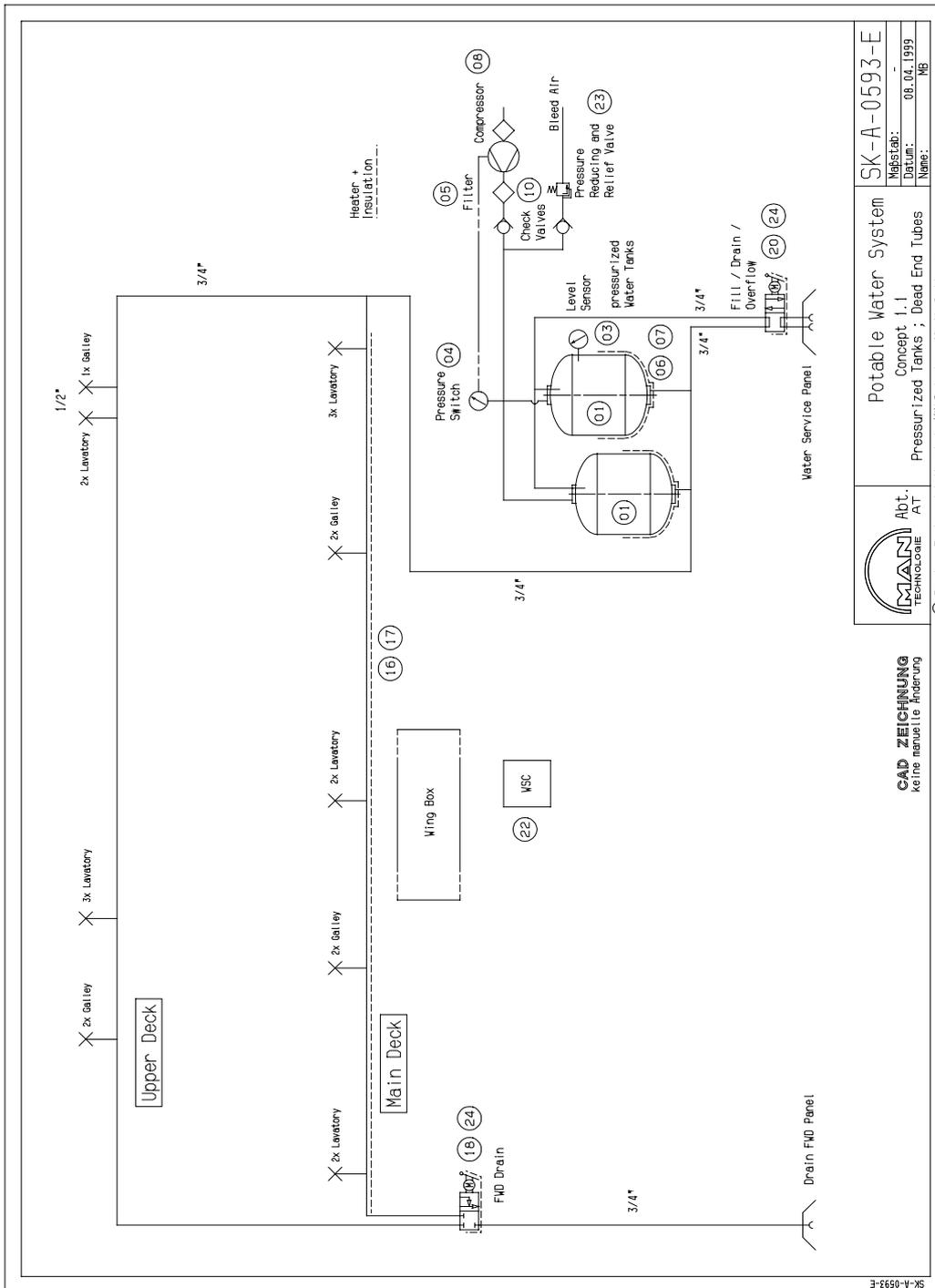


Abbildung 4: Konzept 1.1

| | | |
|--|---|---|
| | Potable Water System Concept 1.1 Pressurized Tanks ; Dead End Tubes | SK-A-0593-E No: 04.1999 Datum: 09.04.1999 Name: MB |
| | CAD-ZEICHNUNG keine manuelle Änderung | © Für diese Zeichnung behält sich die MAN Technologie AG alle Rechte vor. |

AP 6 Fortschrittliches Wassersystem
 AP 6.2 Frischwassersystem für Mehrdeckflugzeuge



Schlußbericht

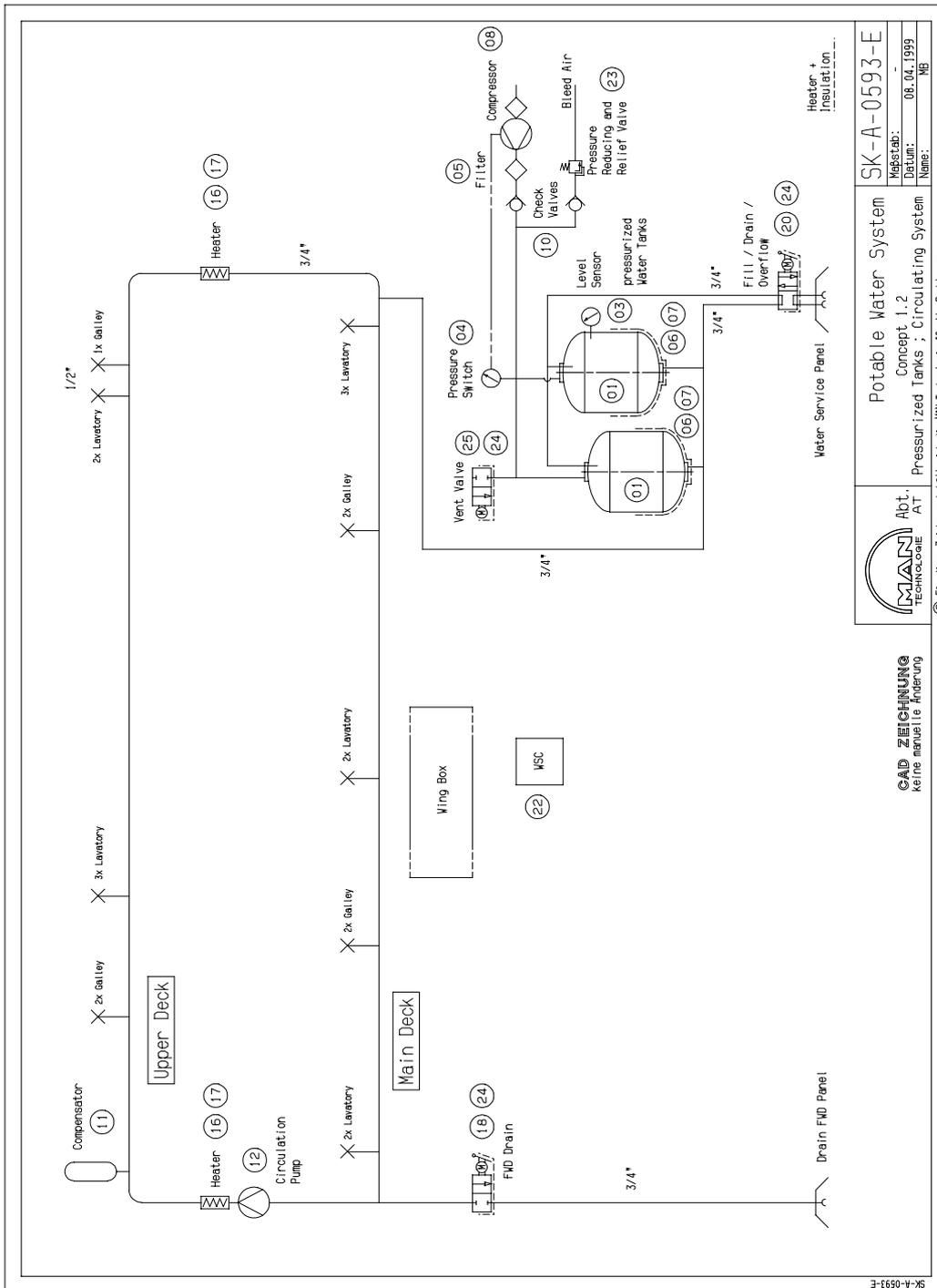


Abbildung 5: Konzept 1.2

| | | |
|--|---|---|
| | Potable Water System | SK-A-0593-E |
| | Concept 1.2 Pressurized Tanks ; Circulating System | Maßstab: - Datum: 06.04.1999 Name: MB |
| CAD ZEICHNUNG keine manuelle Änderung | | |
| © Für diese Zeichnung behält sich die MANI Technologie AG alle Rechte vor. | | |

AP 6 Fortschrittliches Wassersystem
 AP 6.2 Frischwassersystem für Mehrdeckflugzeuge



Schlußbericht

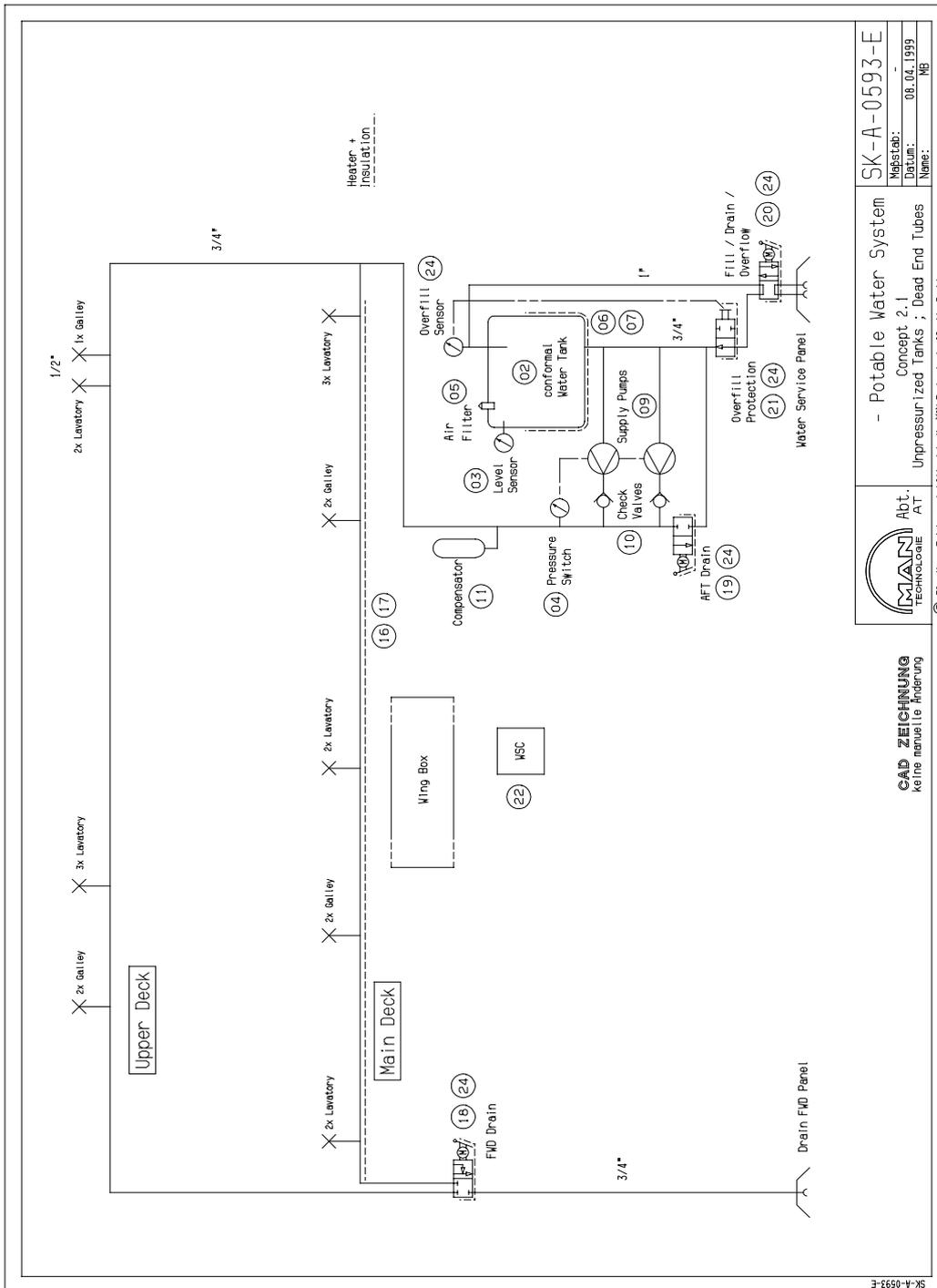


Abbildung 6: Konzept 2.1

| | | |
|---|---------------------------------------|--|
| | - Potable Water System Concept 2.1 | SK-A-0593-E |
| | Unpressurized Tanks ; Dead End Tubes | Registrat.: Datum: 08.04.1999 Name: MB |
| CAD ZEICHNUNG keine manuelle Änderung | | |
| © Für diese Zeichnung behält sich die MAN Technologie AG alle Rechte vor. | | |

Schlussbericht

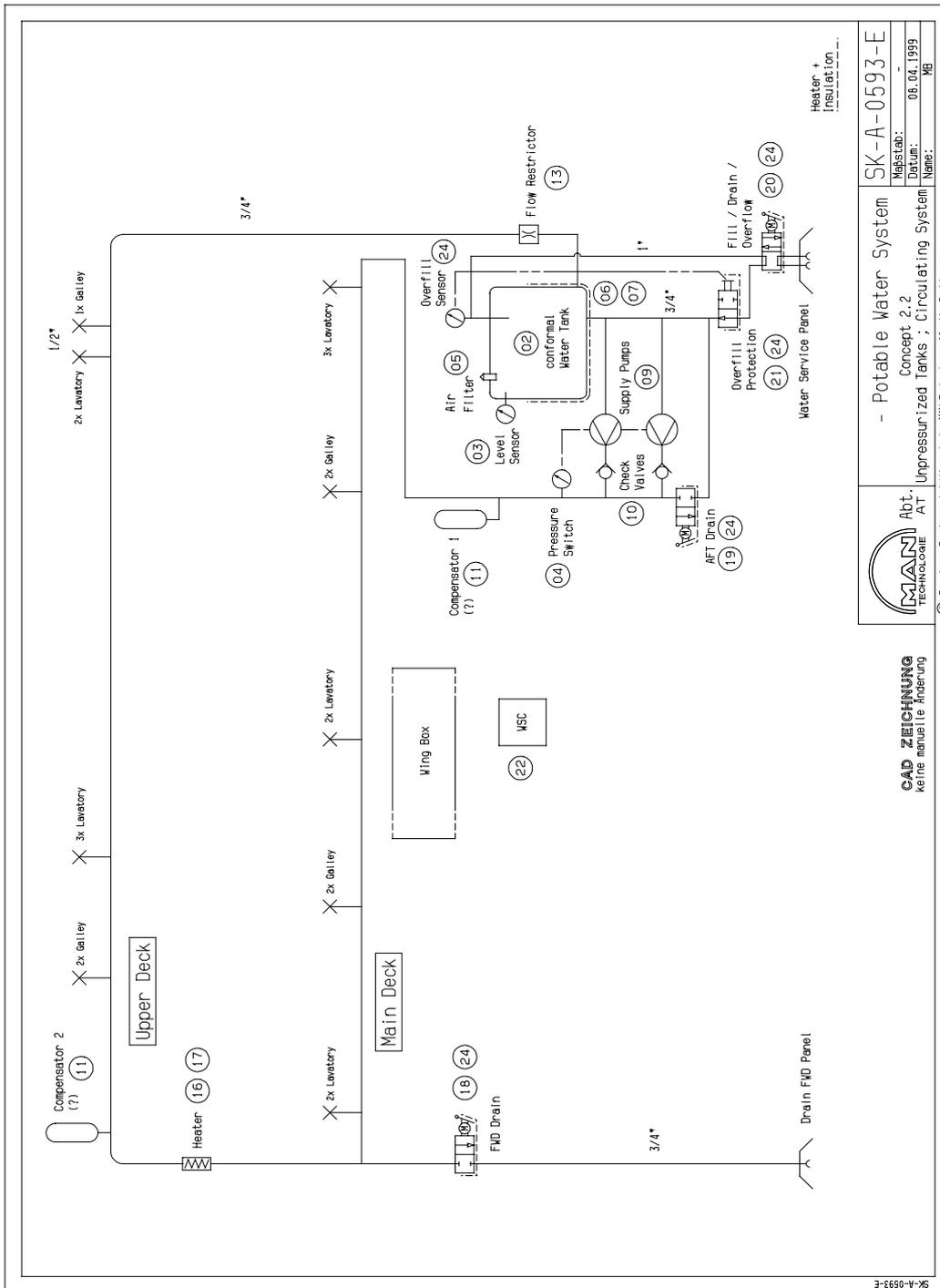


Abbildung 7: Konzept 2.2

| | | |
|--|--|---------------------------------|
| CAD ZEICHNUNG Keine manuelle Änderung | - Potable Water System Concept 2.2 | SK-A-0593-E |
| | Unpressurized Tanks ; Circulating System | Meßstab: - Datum: 06.04.1999 |
| | © Für diese Zeichnung behält sich die MANI Technologie AG alle Rechte vor. | Name: MB |

SK-A-0593-E

Schlussbericht

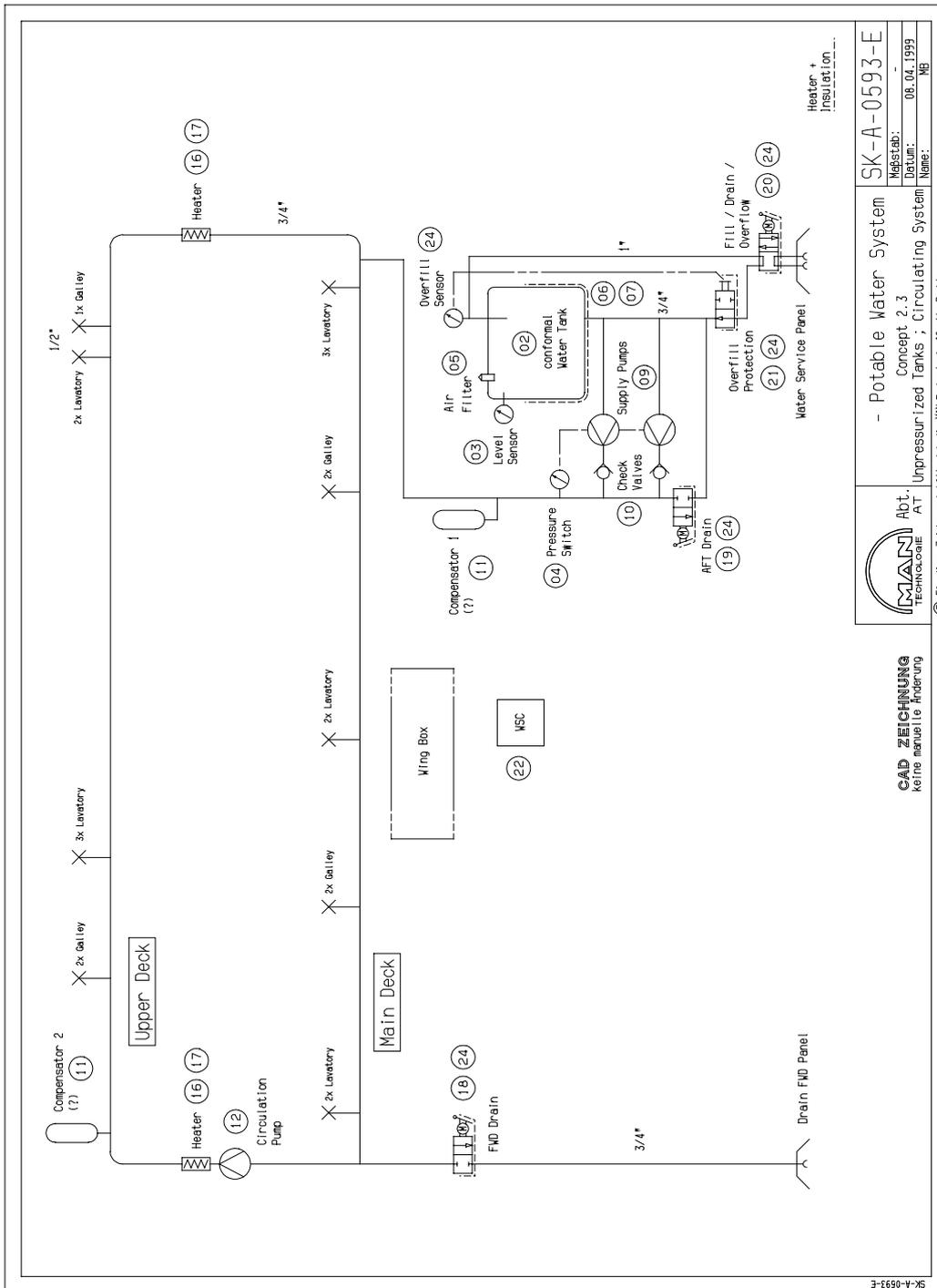


Abbildung 8: Konzept 2.3

| | | |
|--|--|--|
| CAD ZEICHNUNG keine manuelle Änderung | - Potable Water System Concept 2.3 | SK-A-0593-E |
| | APT. Technicoole AT Unpressurized Tanks ; Circulating System | Register: Datum: 06.04.1999 Name: MB |

© Für diese Zeichnung behält sich die MANI Technologie AG alle Rechte vor.

Schlußbericht

Zur Bewertung der Konzepte wurden angewandt:

- Simulationen am MAN-Teststand (Messungen von Fließcharakteristik und Druckverteilung)
- Analytische Fluß- und Systemauslegung mit Hilfe des computergestützten Simulationsprogrammes FLOWMASTER® an der TU Berlin.
- Lebensdaueranalyse gestützt auf den MTBF-Wert der Systemkomponenten und ihrer gegenseitigen Abhängigkeit. Die Berechnungen wurden mit dem Softwaretool „SyReAn“ (System Reliability Analysis) durchgeführt, das von der TU Hamburg-Harburg entwickelt wurde.

Konzept 1.1: Druckbeaufschlagte Tanks und Stichleitungen

Das Konzept 1.1 repräsentiert ein traditionelles Frischwassersystem ähnlich dem A340-System. Es stellt das Vergleichssystem zur Bewertung der anderen Konzepte dar.

Zwei zylindrische Frischwassertanks werden mit Druck vom Bleed Air System oder von einem Kompressor beaufschlagt. Ein Tank ist mit einem Drucksensor ausgerüstet, der die Funktion des Kompressors steuert.

Zwei Luftfilter sind zur Luftreinigung vor und hinter dem Kompressor installiert.

Eine gemeinsame Versorgungsleitung teilt sich in zwei Leitungen: eine zur Versorgung des Oberdecks und eine für das Hauptdeck.

Die Tanks und die Hauptdeckleitungen werden durch Isolierung und Beheizung eisfrei gehalten.

Das System wird je Flugzeug über ein gemeinsames Fill/Drain/Overflow Ventil befüllt, drainiert und gegen Überfüllung geschützt.

Je Flugzeug sind zur Drainage zwei zusätzliche Ventile erforderlich, ein vorderes und ein hinteres. Diese Ventile ermöglichen die Drainage der Leitungen in Ober- und Hauptdeck im „druckentlasteten“ Zustand während des Parkens.

Alle drei Ventile sind durch Isolierung und Beheizung gegen Einfrieren geschützt.

Schlußbericht

Konzept 1.2: Druckbeaufschlagte Tanks und Ringsystem

Konzept 1.2 weist im Unterschied zu Konzept 1.1 ein Ringleitungssystem auf. Die Wasserzirkulation wird durch eine Zirkulationspumpe erzeugt, die in der vorderen vertikalen Verbindungsleitung zwischen Haupt- und Oberdeck eingebaut ist.

Zur Reduzierung von Druckspitzen und Druckabfall – verursacht durch das Öffnen von Wasserverbrauchern – wird ein Kompensator in der Hauptleitung nach Pumpe und Heizer installiert.

Die Tanks werden durch Isolierung und Beheizung eisfrei gehalten.

Ein zentraler Heizer schützt das Ringleitungssystem gegen Einfrieren.

Die Tanks sind mit Entlüftungsventilen versehen, die am Boden eine Drainage der Leitungen in die Tanks ermöglichen.

Konzept 2.1: Pumpen für den Wassertransport und Stichleitungen

Im Unterschied zu den Konzepten 1.1 und 1.2 erfolgt die Wasserverteilung durch Pumpen. Angepaßte Tanks können jeden zur Verfügung stehenden Raum im Flugzeug ausnutzen, wodurch zusätzlicher Platz für Passagiere oder Fracht gewonnen wird. Die Tanks erfordern einen aufwendigeren Schutz gegen Überdrücke, speziell beim Füllen. Ein Entlüftungsventil, ein Überlaufsensor und ein größerer Querschnitt der Überlaufleitung schützen den Tank gegen Überdruck.

Aus Redundanzgründen sind zwei parallelgeschaltete Förderpumpen in der gemeinsamen Versorgungsleitung vom Tank zu den Leitungen in Haupt- und Oberdeck installiert. Ein Druckschalter steuert die Funktion der Pumpen. Nach jeder Pumpe ist ein Rückschlagventil installiert um den Rückfluß des Wassers in den Tank zu verhindern.

Die Pumpen können kontinuierlich oder diskontinuierlich betrieben werden. Kompensatoren in der gemeinsamen Wasserleitung wirken als Druckpuffer und reduzieren Druckspitzen im System.

Der Tank und die Leitungen im Hauptdeck werden durch Isolation und Beheizung gegen Einfrieren geschützt.

Schlußbericht

Konzept 2.2: Pumpen für den Wassertransport und Ringleitungssystem einschließlich Tank

Dieses Systemkonzept beinhaltet ein Ringleitungssystem statt Stichleitungen. Bei diesem Ansatz ist die erforderliche Heizleistung deutlich reduziert und eine kontinuierliche Frischwasserdesinfektion während des Fluges ist möglich.

Der Tank wird von der Ringleitung durchströmt.

Die Versorgungspumpen arbeiten kontinuierlich.

Ein in die Rücklaufleitung zu den Tanks integrierter Volumenstrombegrenzer stellt die Strömungsrichtung von den Pumpen zu den Verbrauchern und zu den Tanks sicher.

Konzept 2.3: Pumpen für den Wassertransport und Ringleitungssystem

Im Unterschied zu Konzept 2.2 ist in diesem Konzept kein Rückfluß vorgesehen von der Ringleitung zu den Tanks. Die Tanks sind also nicht Teil der Ringleitung. Eine Zirkulationspumpe, die im vorderen Teil der Ringleitung installiert ist, bewirkt eine kontinuierliche Frischwasserzirkulation vom Haupt- zum Oberdeck.

Wegen der höheren erforderlichen Heizleistung zur Eisfreihaltung der Leitungen ist der Energiebedarf etwas höher als bei Konzept 2.2. In jeder der beiden vertikalen Verbindungsleitungen zwischen Haupt- und Oberdeck ist ein Leitungsheizer installiert

Das System beinhaltet ebenfalls Kompensatoren. Die Position der Kompensatoren ist abhängig von der Systemauslegung zu bestimmen.

Schlußbericht

2.3.2 Frischwasserdesinfektion

Vorschriften

Derzeit fordern weder USPHS noch FAA/JAA Vorschriften eine Desinfektionseinrichtung an Bord eines Flugzeuges. Zur Verbesserung der Performance des Flugzeuges und der Gesundheit der Passagiere könnte eine Desinfektionsanlage in das Frischwassersystem integriert werden. Desinfektionssysteme für Flugzeuge sind noch nicht Stand der Technik und erfordern für eine Qualifikation noch Entwicklungsarbeit.

Notwendigkeit der Desinfektion

Krankheiten wie Cholera, Amoeben-Ruhr, Typhus und andere Darmkrankheiten werden in vielen Teilen der Welt über das Wasser übertragen. Zahlreiche Fluglinien operieren auch in Ländern, in denen diese Krankheiten vorkommen. Dabei ist gelegentlich das Tanken von Wasser unvermeidlich.

Der Anteil der Beanstandungen bei turnusmäßigen Wasseruntersuchungen in Flugzeugen ist mit 35-45% sehr hoch.

Keimquellen und Verkeimungsursachen

Über den Luftpfad:

- Druckluft vom Kompressor
- Belüftungsventile für die Drainage von Stichleitungen

Über das Wasser:

- Betankung
- Keine tägliche Drainage
- Keine regelmäßige Desinfektion

Gegenmaßnahmen

- Systemdesinfektion (turnusmäßig)
- Begleitdesinfektion (ständig)
- Allgemein verbindliches Regelwerk für Airlines
- Keimdichte Luftfilter hinter der Druckluftversorgung
- Keimdichte Filter zur Betankung
- Tägliche Drainage des Frischwassersystems

Schlußbericht

Verfahren

Systemdesinfektion

- Das heutige Standardverfahren der Desinfektion einer Flugzeug-Frischwasseranlage ist die turnusmäßige Desinfektion des Systems mit chlorhaltigen Lösungen oder mit einer H₂O₂-Lösung.

Begleitdesinfektion

- Chlorung des Wassers,
d.h. Zugabe von Chlor zum Wasser. Dieses Verfahren wird meist nur angewendet, wenn Wasser minderer Qualität getankt werden muß.
- Silberung,
Die Verwendung von Silberionen ist ein sehr altes Verfahren. Nachteilig ist die lange Einwirkungszeit und die Notwendigkeit einer ausreichenden Wasserströmung während der Desinfektion. Die Wirkung ist auch sehr von der Wasserqualität abhängig.
- UV-Desinfektion
Dieses Verfahren eignet sich sehr gut zur Desinfektion ohne Auswirkungen auf die Zusammensetzung und den Geschmack des Frischwassers. Wegen der fehlenden Depotwirkung sollte das Frischwasser mehrmals pro Tag desinfiziert werden. Dies läßt sich durch die Integration der UV-Anlage in ein Ringleitungssystem auf einfache Weise erreichen.
- Chlordioxidverfahren
Dieses Verfahren scheidet für den Flugbetrieb wegen der Verwendung von Chlorgas aus.
- Elektrochemische Verfahren
Bei diesen Verfahren ist mit starker Gasbildung zu rechnen, weshalb sie ebenfalls für den Flugbetrieb ungeeignet sind.-

Versuche

Die Desinfektion wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nur analytisch betrachtet. Kurz vor Abschluß stand eine UV-Desinfektionsanlage zur Verfügung, die in den Technologie-Demonstrator für das Engineering Mock-up integriert wurde.

Schlußbericht

Versuche mit der UV-Desinfektion wurden nicht mehr durchgeführt. Zur Bestimmung der Wirksamkeit und der günstigsten Position im Frischwassersystem ist die Durchführung geeigneter Versuche jedoch unbedingt erforderlich.

Bewertung verschiedener Konzepte

Eine Chemische Desinfektion mit Chlor oder Silber während des Flugbetriebes ist nur in Notfällen vertretbar (z.B. bei einem akuten Fall von Ruhr an Bord).

Eine kontinuierliche Desinfektion an Bord des Flugzeuges ist nur mit einer UV-Desinfektion zu erreichen. Nachteilig ist die fehlende Depotwirkung, weshalb die UV-Anlage in ein Ringleitungssystem integriert werden sollte.

Chemische und mechanische (Filterung) Verfahren erfordern einen zu hohen Aufwand an Sensorik und Logistik, um im Flugbetrieb zuverlässig eingesetzt werden zu können.

2.3.3 Frischwasserentkalkung

2.3.3.1 Enthärtungsanlagen für die Anwendung im Flugzeug

Enthärtungsanlagen auf der Basis von Ionenaustauschern wurden für stationäre Anwendungen in der Gebäudetechnik, in Schwimmbädern, der Kessel- und Speisewasseraufbereitung und für den industriellen Bedarf entwickelt. Neben den flugzeugspezifischen Gewichts- und Raumanforderungen sowie Sicherheits- und Wartungsanforderungen müssen diese Anlagen neue Anforderungen erfüllen, die in stationären Anlagen umgangen werden können.

Sensorik

In stationären Anlagen wird Trinkwasser mit annähernd gleichbleibender Zusammensetzung aufbereitet, d.h. die Anlage kann für eine bestimmte Wasserhärte ausgelegt und eingestellt werden. Das Verschneideverhältnis enthärtetes Wasser / unbehandeltes Wasser bleibt konstant mit dem Ziel, die laut Trinkwasserverordnung vorgeschriebene Mindesthärte von 8,4°dH zu erreichen.

Schlußbericht

Diese Forderung setzt im Flugzeug, das mit unterschiedlichem Wasser betankt wird, die Verfügbarkeit einer geeigneten Sensorik voraus, welche das Verschneideverhältnis automatisch steuert. Zur Zeit kann die Wasserhärte jedoch nur naßchemisch bestimmt werden. Zwar ist die Bestimmung sehr einfach und die Wasserhärte an einem bestimmten Flughafen ohnehin bekannt, das Verschneideverhältnis müßte jedoch an jedem Flughafen vor dem Betanken eines Flugzeugs ohne Wasserhärtesensor manuell neu eingestellt werden.

Die Wasserhärte an einigen repräsentativen Flughäfen in Deutschland ist in Tabelle 4 angegeben.

| Flughafen | Gesamtfluggast-Aufkommen in Mio. im Jahr 1995 | Härtebereich | Wasserhärte °dH |
|------------------|---|--------------|-----------------|
| Frankfurt/Main | 38,2 | 3 | 14,0 – 18,0 |
| Düsseldorf | 15,1 | 3 | 14,7 |
| München | 14,9 | 3 | 14 |
| Berlin Tegel | 11,0 | 3 | 15,3 - 17,0 |
| Berlin Tempelhof | 11,0 | 3 | 15,0 - 20,2 |
| Hamburg | 8,2 | 2 | 7,0 - 14,0 |
| Stuttgart | 5,2 | 2 | 8,9 |
| Köln/Bonn | 4,7 | 3 | 14,0 - 21,0 |
| Hannover | 4,3 | 3 | 14,0 - 16,0 |
| Nürnberg | 2,3 | 3 | 14,2 |
| Dresden | 1,7 | 2 | 7,0 - 12,0 |
| Bremen | 1,5 | 1 | bis 7 |
| Münster | 0,9 | 3 | 14,9 |

Tabelle 4: Wasserhärte an einigen deutschen Flughäfen

Schlußbericht

Regeneration / Desinfektion

Für die Regeneration einer relativ kleinen Haus-Enthärtungsanlage mit einer Kapazität von 200°dH x m³ (ausreichend für die Enthärtung von ca. 25 m³ Wasser mit 16,4°dH) und einen Nenndurchfluß von 2,5 m³/h werden ca. 14 kg Salz und 320 l Frischwasser verbraucht (Tabelle 5).

Ein Airbus A340 mit 1000 l Frischwassertankkapazität würde mit dieser Anlage eine Betankungszeit von 24 Minuten benötigen. Ein Megaliner mit einer Frischwassertankkapazität von 2000 l würde bei einer geforderten Betankungszeit von ca. 20 Minuten eine noch größere Anlage mit einem Nenndurchfluß von ca. 6 m³/h benötigen (Tabelle 5).

Eine Haus-Enthärtungsanlage mit einer Durchflußleistung von 6m³/h enthärtetes Wasser hat z.B. ein Betriebsgewicht von 587 kg und ist fast 2 m hoch. Sie hat einen Salzvorrat von 230 kg und verbraucht 30 kg Regeneriermittel und 817 l Wasser pro Regeneration (Tabelle 5). Das Harzvolumen der Enthärtungsanlage beträgt jedoch nur 125 l.

| | | Anlage 1 | Anlage 2 |
|-------------------|----------------------|----------|----------|
| Nenndurchfluß | m ³ /h | 2,5 | 6 |
| Kapazität | °dH x m ³ | 200 | 500 |
| Harzmenge | l | 50 | 125 |
| Salzvorrat | kg | 160 | 230 |
| Salzverbrauch | kg pro Regeneration | 14 | 30 |
| Abwassermenge | l pro Regeneration | 320 | 817 |
| Gesamthöhe | mm | 1595 | 1930 |
| Austauschbehälter | φ mm | 257 | 369 |
| Salzsolebehälter | φ mm | 639 | 780 |
| Betriebsgewicht | kg | 337 | 587 |

Tabelle 5: Enthärtungsanlagen stationär (am Beispiel eines Herstellers)

Schlußbericht

Gewichts- und Platzbedarf

Um Gewicht- und Platzbedarf einer Enthärtungsanlage im Flugzeug erheblich zu senken erscheint es sinnvoll die Enthärtungsanlage auf eine Ionenaustauscherpatrone und Verschneideeinrichtung zu reduzieren und die verbrauchten Ionenaustauscherpatronen zentral am Boden zu regenerieren und zu desinfizieren. Dies würde jedoch einen nicht unerheblichen Aufwand für den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur und Logistik am Boden erfordern.

Dimensionierend für die Austauscherpatrone (d.h. das Harzvolumen) ist zum einen die geforderte Durchflußleistung, die sich aus Frischwassertankvolumen pro max. zulässiger Betankungszeit ergibt, sowie die geforderte Austauscherkapazität in °dH x m³ Rohwasser (Abbildung 9 und Abbildung 10).

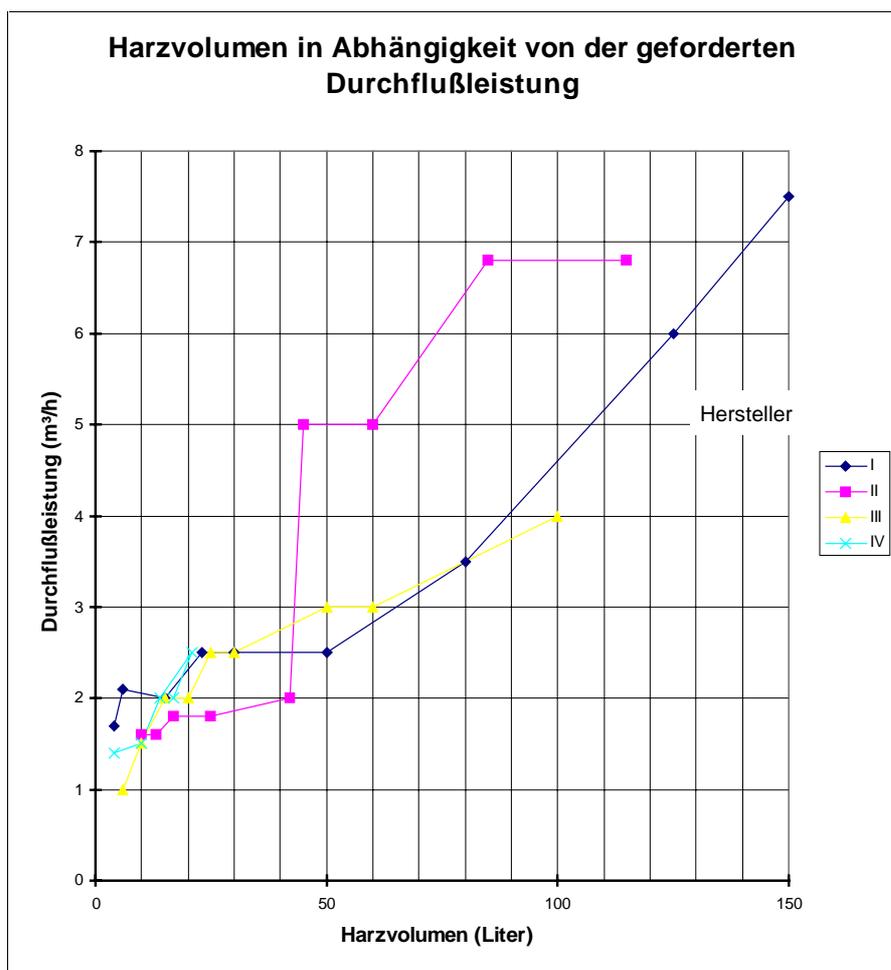


Abbildung 9: Harzvolumen / Durchflußleistung

Schlußbericht

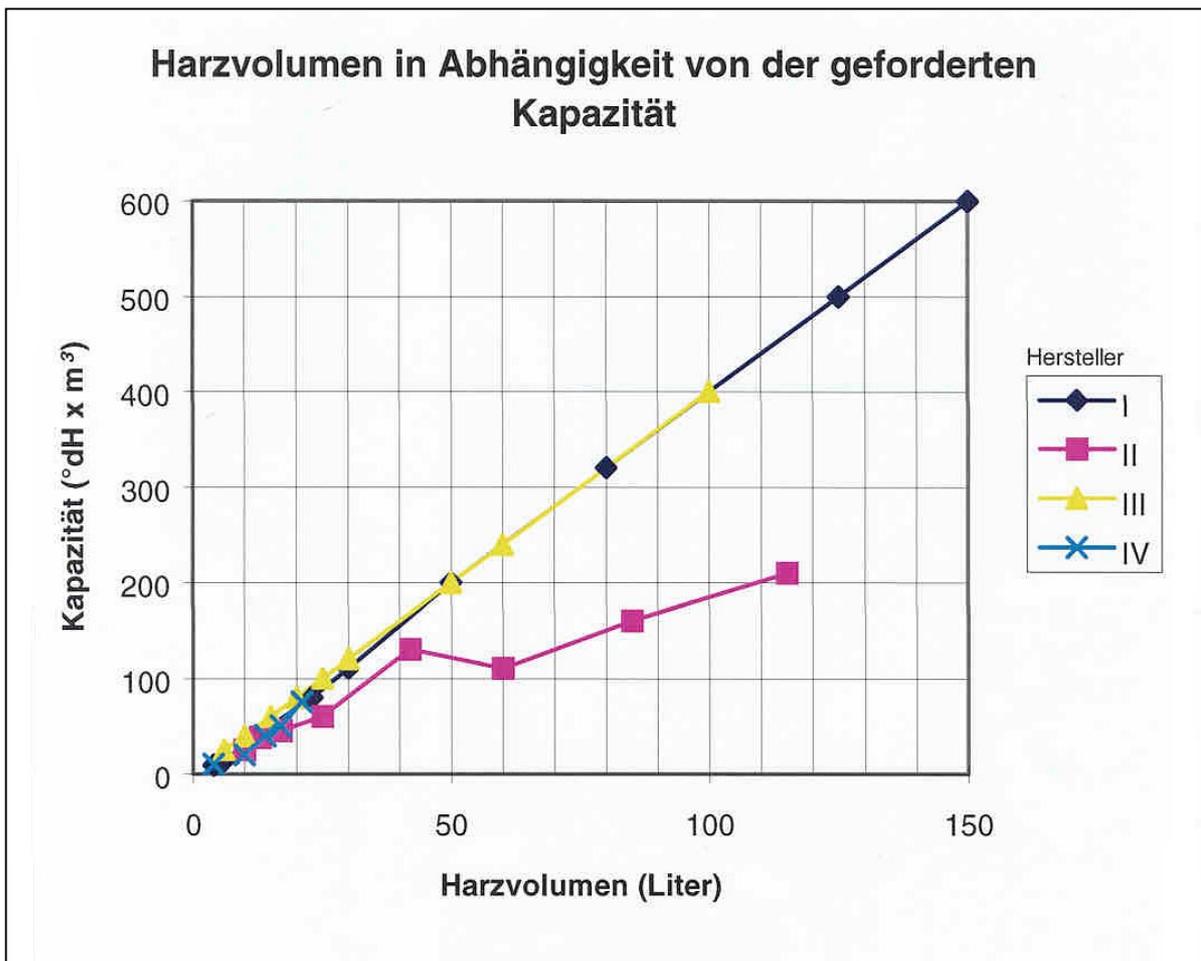


Abbildung 10: Harzvolumen / Kapazität

Die benötigte Kapazität hängt von dem Frischwasserverbrauch, der Rohwasserhärte sowie der angestrebten Härte des behandelten Trinkwassers (mind. 8,4°dH) ab.

Folgende Anforderungen bzw. Annahmen wurden zur Dimensionierung einer Enthärtungsanlage für den Megaliner getroffen:

- Frischwasserverbrauch / Tag: 2.000 l
- Rohwasserhärte: 20°dH
- Weichwasserhärte: 8,4°dH
- Regenerationsintervall: max. 4 Tage

Schlußbericht

Geforderte Kapazität ($\text{m}^3 \times \text{°dH}$)

$$2 \text{ m}^3 \times 4 \text{ Tage} \times (20\text{°dH} - 8,4\text{°dH}) = 105 \text{ m}^3 \times \text{°dH}$$

Geforderte Durchflußleistung (m^3/h)

- Betankungsdauer: max. 20 - 30 Minuten
- Frischwassertankkapazität: 2.000 l
- Durchflußleistung: 4 - 6 m^3/h

Stationäre Enthärtungsanlagen mit einer Durchflußleistung von 4 - 6 m^3/h haben ein Harzvolumen zwischen 75 und 125 l (Abbildung 9). Die Kapazität dieser Anlagen (Abbildung 10) übersteigt die geforderte Kapazität um das 3 bis 4-fache. Dies führt zu einem hohen Salz- und Wasserverbrauch.

Ziel der Auslegung einer Ionenaustauschpatrone für das Flugzeug ist daher eine hohe Durchflußleistung bei kleiner Kapazität und möglichst kleinem Volumen.

In Tabelle 6 sind die technischen Betriebsdaten einer Enthärtungsanlage für den Megaliner zusammengefaßt.

Schlußbericht

| | | |
|--|----------------------|--------|
| Durchflußmenge bei 80 m/h zulässige Geschwindigkeit hydraul. max. zulässige Durchflußmenge | m ³ /h | 5,65 |
| Durchflußmenge bei Belastung min. | m ³ /h | 0,35 |
| max. | m ³ /h | 8,80 |
| Druckverlust bei 5 m ³ /h | bar | 5,00 |
| Weichwassermenge zwischen zwei Re- generationen bei Härte 20 °dH | m ³ | 8,80 |
| Kapazität | °dH x m ³ | 170 |
| Harzvolumen | kg | 44 |
| Kiesvolumen | l | 6 |
| Kiesmasse | kg | 9 |
| Rohrleitungen | mm | 25 |
| Geschwindigkeit | m/s | 3,20 |
| Austauschbehältermaße Durchmesser innen: | mm | 300 |
| außen: | mm | 315 |
| Höhe (mit Fuß) | mm | 922 |
| Betriebsgewicht | kg | ca. 60 |

Tabelle 6: Enthärtungsanlage für einen Megaliner, Technische Betriebsdaten

Die Anlage hat einen Durchmesser von 315 mm, eine Höhe von 922 mm und ist ca. 60 kg schwer. Die Ionenaustauschpatrone muß spätestens alle 4 Tage durch eine am Boden regenerierte und desinfizierte Patrone ersetzt werden. Pro Regeneration werden ca. 7,5 kg Salz benötigt. Das Verschneideverhältnis enthärtetes / unbehandeltes Wasser muß vor jedem Betanken manuell neu eingestellt werden.

Schlußbericht

Fazit

Selbst wenn es gelingt Gewicht und Platzbedarf der Ionenaustauscherpatronen weiter zu reduzieren und eine Sensorik zu entwickeln welche eine Automatisierung des Betankungsvorganges erlaubt, besitzt dieses Wasserbehandlungsverfahren noch einen schwerwiegenden Nachteil und zwar die Notwendigkeit der Regeneration und Desinfektion am Boden.

2.3.3.2 Härtestabilisierungsanlage für die Anwendung im Flugzeug

Zusatzstoff - Zusammensetzung

Phosphate werden in der Wasseraufbereitungstechnik zur Korrosions- und Wassersteinverhütung eingesetzt. Bei der Korrosionsminderung spielen Orthophosphate eine besondere Rolle. Mineralstoffkombinationen aus Ortho- und Polyphosphat, die zum Korrosionsschutz eingesetzt werden, enthalten einen hohen Anteil an Orthophosphat. Dagegen ist Orthophosphat zur Hemmung der Steinbildung nicht geeignet.

Da Wasserleitungen im Flugzeug im Unterschied zu Hausleitungen nicht aus verzinktem Eisen, sondern aus Edelstahl bestehen, kommt es im Flugzeug normalerweise zu keinerlei Korrosionsproblemen. Eine Mineralstofflösung für den Einsatz im Flugzeug wird daher ausschließlich zur Hemmung der Steinbildung eingesetzt, und sollte nur hochkondensierte Polyphosphate enthalten.

Der Zusatz von Polyphosphaten zur Härtestabilisierung erfolgt nicht in stöchiometrischen Ausmaß. Um eine Wirkung zu erzielen sind nur Spuren von Zusätzen nötig. Man spricht deshalb bei diesem Verfahren auch von der Phosphatimpfung. Die benötigten Polyphosphatmengen liegen bei 2- 4 mg PO_4/l . Die Wirksamkeit dieser kleinen Mengen beruht auf der Absorption der Polyanionen an den Kristallkeimen des Calciumcarbonates. Dadurch wird das Wachstum der Keime zumindest verzögert.

Schlußbericht

Grenzen des Verfahrens

Die Grenzen des Verfahrens sind eine Karbonathärte von 20°dH und eine Temperatur von 80 °C. Eine weitere Begrenzung der Phosphatimpfung ist die fehlende Dauerwirkung. Nach einer Stehzeit von einigen Monaten wird der Effekt nahezu Null, was jedoch im Flugzeug praktisch nicht vorkommt. Oberhalb einem pH-Wert von 11 nimmt die Wirksamkeit ebenfalls stark ab. Dieser PH-Wert kommt im Trinkwasser jedoch nicht vor.

Gewicht und Platzbedarf

Eine Härtestabilisierungsanlage besteht aus einer Dosierpumpe und einem Lösungsbehälter. Abmessungen und Gewicht einer beispielhaften Anlage die im Flugzeug eingesetzt werden könnte, sind:

- Dosierpumpe
Kolbendosierpumpe von Synchronmotor angetrieben
Gewicht: 2 bis 3 kg
- Dosierbehälter: 3 l oder größer
- Abmessung: ϕ 145 mm
Höhe 182 mm

3 l Lösung reichen für ca. 40 m³ aus, d.h. ein Megaliner mit einer Frischwassertankkapazität von 2 m³ könnte 20 mal voll betankt werden, ehe der Lösungsvorratsbehälter neu aufgefüllt oder ersetzt werden muß. Die Lösung ist 2 Jahre haltbar.

Zur einfachen Herstellung der Lösung werden auch Mineralstofftablettenröhrchen angeboten, die sich in 3 l oder 6 l Wasser innerhalb von 4 - 5 Stunden selbständig auflösen. Ein Rührwerk ist somit nicht mehr erforderlich.

Sensorik

Die Zusammensetzung der Phosphatlösung hängt einerseits vom Anwendungszweck Korrosions- oder Steinbildungshemmung ab, andererseits wird sie auch auf die Wasserzusammensetzung abgestimmt. Dies ist jedoch im Flugzeug nur begrenzt möglich. Trotzdem ist ein Wasserhärtesensor zum Unterschied zu Enthärtungsanlagen nicht zwingend erforderlich, da das behandelte Wasser nicht mit

Schlußbericht

unbehandeltem Wasser verschnitten werden muß. Die Phosphatlösung wird durchflußgesteuert zudosiert. Der in der Trinkwasserverordnung vorgeschriebene Grenzwert von 6,4 mg/l PO_4^{3-} wird dabei unterschritten, da die benötigte Polyphosphatkonzentration zur Härtestabilisierung zwischen 2 - 4 mg PO_4^{3-} liegt.

Gesundheitliche Aspekte

Phosphor ist ein lebenswichtiger Stoff der in vielen Lebensmitteln vorkommt (Abbildung 11). Ein Erwachsener nimmt täglich ca. 6.000 mg Phosphat mit der Nahrung auf. Dagegen ist die Phosphataufnahme über behandeltes Trinkwasser sehr gering (max. 10 mg). Trotzdem ist die Zugabe einer chemischen Verbindung zum Trinkwasser ein erheblicher Nachteil eines Wasseraufbereitungsverfahrens. Dies wurde von den Anlagenherstellern erkannt, die von "Mineraldosierung" und "Mineralstoffkombinationen" sprechen. Diese Begriffe sind zum Unterschied zu "chemischen Zusätzen" im allgemeinen positiv besetzt.

Schlußbericht

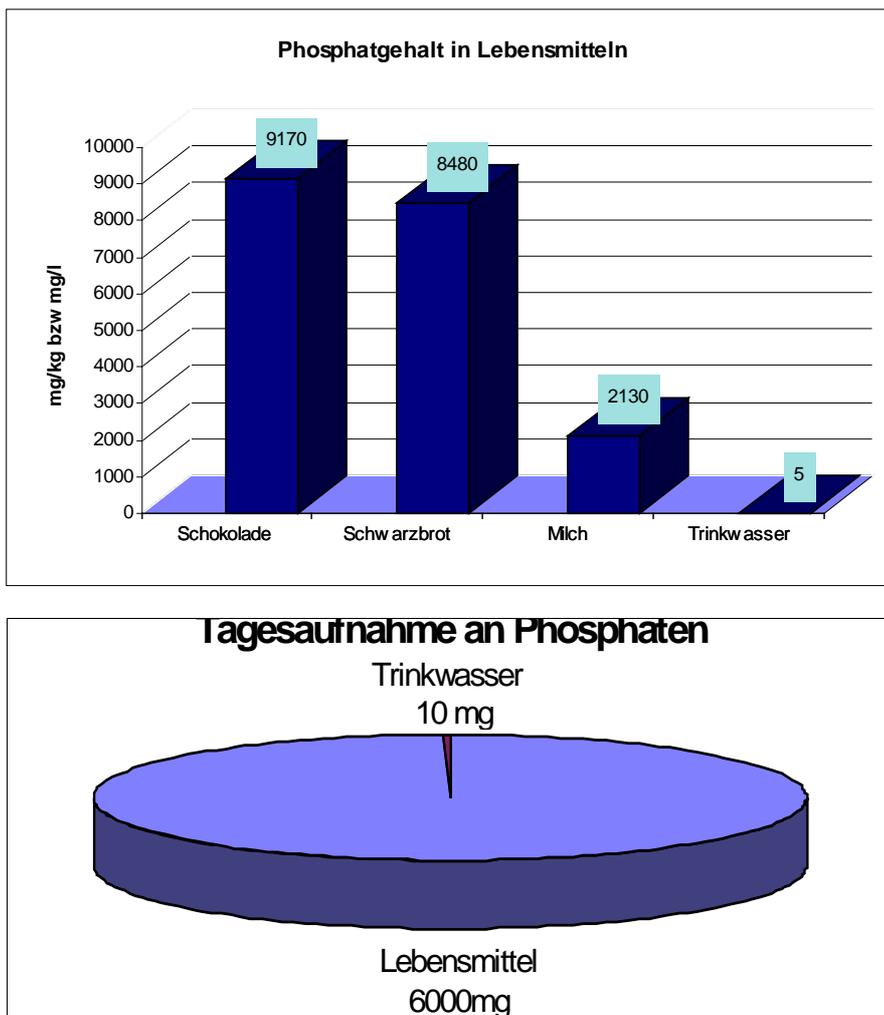


Abbildung 11: Phosphatgehalt in Lebensmitteln und Trinkwasser

Der Gesetzgeber schreibt daher in der Trinkwasserverordnung vor, daß der Betreiber einer Hausinstallation, der dem Trinkwasser Zusatzstoffe zusetzt, den Verbraucher deren Art und Menge unverzüglich durch Aushang oder sonstige schriftliche Mitteilung bekanntzugeben hat (§15 Abs. 6).

Noch konnten wir nicht klären ob diese Informationspflicht auch für den Betreiber eines Flugzeuges gilt.

Schlußbericht

Unabhängig davon ist jedoch sehr sorgfältig abzuwägen, ob die Vorteile einer Härtestabilisierung ausreichen, um einen Zusatzstoff im Trinkwasser gegenüber den Verbrauchern rechtfertigen zu können.

2.3.3.3 Physikalische Wasserbehandlung

Ionenaustauscher und Phosphatdosierung sind für den Einsatz in Flugzeugen wegen der starken Abhängigkeit von der Wasserqualität und des erforderlichen Wartungsaufwandes nicht geeignet.

Für den Einsatz in Flugzeugen erscheinen Entkalkungseinrichtungen auf Permanentmagnet-Basis wegen der einfachen Handhabung und Wartungsfreiheit besonders geeignet.

2.3.4 Systemsteuerung

Basierend auf der Kenntnis der unterschiedlichen Frischwasser-, Grauwasser- und Schwarzwassersysteme der Airbustypen A300 bis A340 wurde ein integriertes ATA 38 Steuerungskonzept entwickelt.

Das bereits existierende A340 – ATA 38 Maintenance Konzept soll auf den Frischwasser- und Grauwasserbereich ausgedehnt werden. Die Systemkomponenten werden über einen Datenbus angeschlossen, der die Flugzeugdaten (Flugphase, Wassermengenvorwahl, usw.) und die Systemdaten (Füllstände, Komponentenstatus, usw.) übermittelt (Abbildung 12).

Die lokalen und funktionsorientierten Komponenten sollen von einem Steuermodul gesteuert werden. Das bietet den Vorteil von:

- geringen Hardware Ausgaben durch Zusammenfassung von Funktionen
- keine Bus Aktivitäten bei lokalen Steuerungsaktionen.

Die gemeinsame Flugzeugschnittstelle erfüllt die Forderung nach strikter Trennung der Kommunikation innerhalb des Systems von der Kommunikation zwischen Flugzeug und System.

Das System Bus Protokoll soll die Anbindung aller Steuerungsmodule an einen Systembus gewährleisten.

Schlußbericht

2.3.4.1 Frischwassersystem

Nachfolgend ist die funktionale Steuerung einer Systemseite beschrieben.

Die Hauptsteuerungsfunktionen des Frischwassersystems sind:

- am Boden: Füllung / Drainage / Druckablaß
- im Flug: normale Nutzung, Ventile sind in ihrer Grundstellung, Systemdruck muß aufrechterhalten werden.

Wesentliche Systemsteuerungsaufgaben sind:

- Feststellung des Betriebszustandes (normale Nutzung, Füllung, Drainage, Druckablaß) und die entsprechende Ventilsteuerung
- Abschaltung von Kompressor und/oder Pumpe während des Füll- oder Drainagevorgangs
- Steuerung der Drainage

Weitere Systemsteuerungsaufgaben sind:

- Komponentenüberwachung und Fehlermeldung
- Funktionsüberwachung und Statusanzeige
- Maintenance Reports und Testfunktionen

Die Systemfunktionen können den Hauptsteuerungsmodulen wie folgt zugeordnet werden:

- Druckversorgungssteuerung
- Wassertanksteuerung
- Ventilsteuerung
- Gemeinsame Flugzeugschnittstelle

Die Flugzeugdaten werden über den Wasser System Bus übermittelt.

Druckversorgungssteuerung

Systemaufgaben sind:

- Druckregelung
- Abschaltung von Kompressor / Pumpe während Füllung und Drainage
- BIT Funktionen
- Statusmeldung

Schlußbericht

Wassertanksteuerung

Wassertanks sind mit Sensoren zur Ermittlung der Füllmenge ausgestattet.

Systemaufgaben sind:

- Füllstandsmeldung
- Temperaturregelung
- BIT Funktionen
- Statusmeldungen

Ventilsteuerung

Die Ventile des Frischwassersystems werden in die zu dem jeweiligen Betriebszustand gehörende Position bewegt. Die Zahl der Ventile und ihrer Funktionen ist abhängig von der mechanischen Systemauslegung. Generell ist mindestens ein Füll/Drainage Ventil erforderlich.

Systemaufgaben sind:

- Feststellung des Betriebszustandes
- Ventilsteuerung entsprechend dem Betriebszustand
- Aktivierung der Service Panel Anzeigen (Füllstand, Füllende, Tank voll, usw.)
- BIT Funktionen

Gemeinsame Flugzeugschnittstelle

Der für das Wassersystem reservierte Teil der gemeinsamen Flugzeugschnittstelle verbindet den Wasser System Bus mit dem Flugzeug.

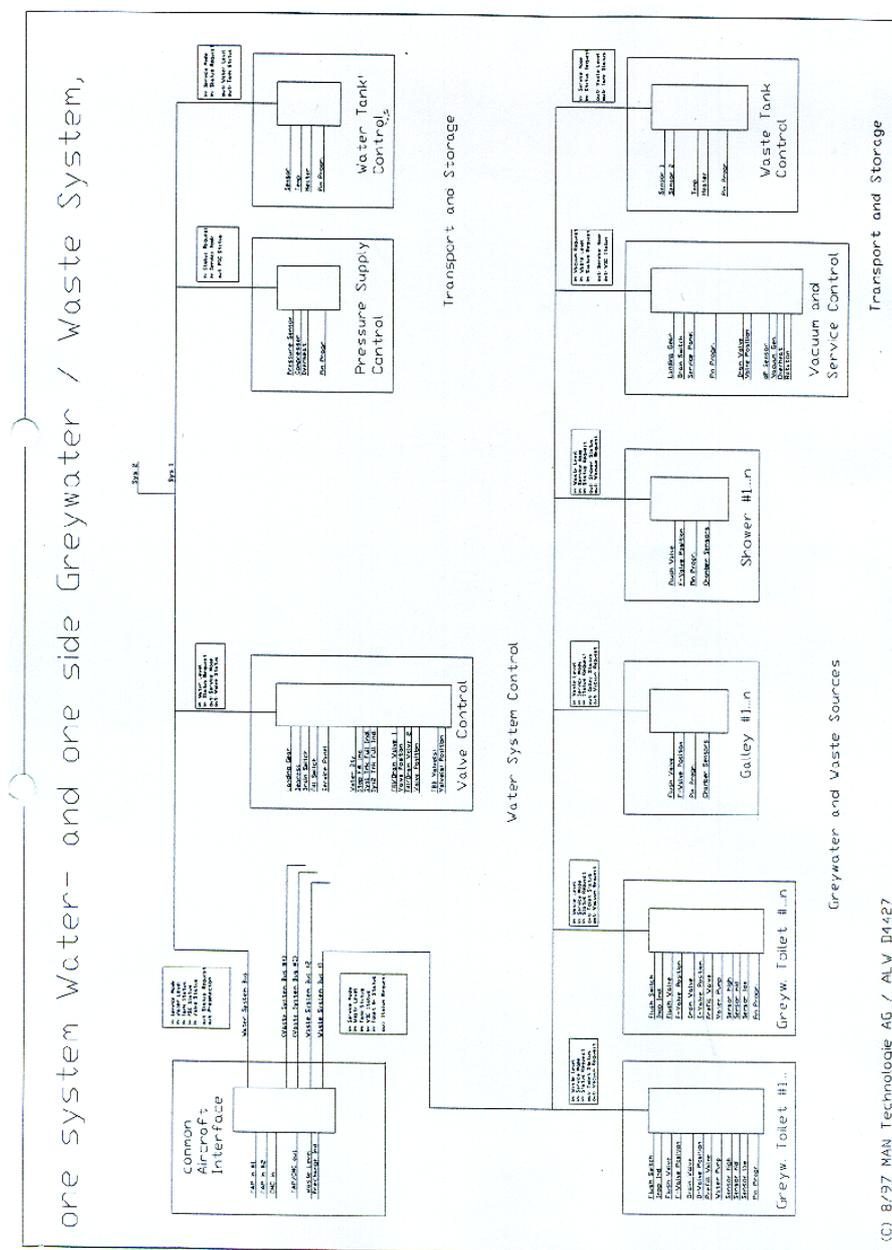
Systemaufgaben sind:

- Überwachung des Steuerungsmoduls
- Verarbeitung der Systeminformationen von/zu den flugzeugseitigen Anzeigesystemen FAP und CMC
- BIT Funktionen

Schlußbericht

2.3.4.2 Abwassersystem

Auf diesen Teil des Steuerungskonzeptes wird hier nicht eingegangen, da das Abwassersystem nicht Bestandteil dieses Arbeitspaketes ist.



(C) B/97 MAN Technologie AG / ALV D4427

Abbildung 12: Systemsteuerungskonzept

Schlußbericht

2.4 Systemdefinition

Das vorgeschlagene Frischwassersystem beinhaltet:

- ⇒ Ein Ringleitungssystem, geteilt in je ein redundantes linkes und rechtes Teilsystem
- ⇒ Grauwasseraufbereitung
- ⇒ Druckbeaufschlagte Frischwassertanks im Flugzeugheck, vor dem Druckschott
- ⇒ Wasserförderung durch Druckluft
- ⇒ Verlegung der Rohrleitungen in Haupt- und Unterdeckboden
- ⇒ Ein hinteres Service Panel und ein vorderes Drainagepanel
- ⇒ Tankvolumina, Pumpen und Ventile ausgelegt auf die maximal vorgesehene Passagierzahl
- ⇒ Anzahl und Position der Galleys und Lavatories abhängig vom Kabinenlayout.
- ⇒ UV-Desinfektionsanlage im Ringleitungssystem
- ⇒ Systemsteuerung über Datenbus und Integration in das Flugzeug Maintenance Konzept

Die weitere Definition des Frischwassersystems hängt sehr von der Gesamtauslegung des Flugzeuges ab und den sich daraus ergebenden Rahmenbedingungen. Deshalb können im derzeitigen Stadium noch keine weiteren Festlegungen getroffen werden.

Schlußbericht

2.5 Herstellung des Technologieträgers

Allgemein

Zur Untersuchung des Verhaltens des Frischwassersystems eines Mehrdeckflugzeuges wurde ein Teststand aufgebaut. Der Teststand wurde in Abstimmung mit den an der TU Berlin untersuchten Varianten des Megaliner-Frischwassersystems erstellt.

Der Testaufbau erfolgte als halbe Systemseite in modularer Form, um Anpassungen an verschiedene Systemkonzepte zu ermöglichen. Auf diese Weise lassen sich Kombinationen aus druckbeaufschlagten und drucklosen Tanks, sowie Stich- und Ringleitungssysteme untersuchen.

Leitungen

Der Teststand stellt in Sticleitungskonfiguration eine Leitungslänge von 60 m dar und in Ringleitungskonfiguration eine Leitungslänge von 130 m bei einem Neigungswinkel von 3°.

Als Rohrmaterial für den Teststand wurde entsprechend den Untersuchungen der TU Hamburg-Harburg im Rahmen dieses Forschungsvorhabens das leichte, flexibel montierbare und damit kostengünstige PA 11/12 gewählt. Für die Hauptleitungen wurden entsprechend heutigen Flugzeugen mit einem Durchmesser von $\frac{3}{4}$ Zoll ausgeführt, die Anschlußleitungen für Galleys und Lavatories mit einem Durchmesser von $\frac{1}{2}$ Zoll.

Für den Teststand war aufgrund der räumlichen Enge ein verkürzter Aufbau erforderlich. Dazu wurden die freien Rohrlängen auf Trommeln von 1 m Durchmesser gewickelt, so daß die Gesamtleitungslänge erhalten blieb.

Durch die Windung der Leitungen erhöht sich der Strömungswiderstand etwas gegenüber der geradlinigen Leitungsverlegung im Flugzeug.

Druckluftversorgung

Die Druckluftversorgung erfolgte für die Konfiguration mit druckbeaufschlagtem Tank durch einen Industriekompressor mit adaptiertem 800 l Akkumulatortank und einem einstellbaren Druckregler.

Schlußbericht

Tank

Als Frischwassertank diente ein Standard A340 Wassertank.

Pumpen

Als Wasserpumpe für die Konfiguration mit drucklosem Tank wurde eine 0,75 kW Industriekreiselpumpe eingesetzt, die einen maximalen Volumenstrom von 100 l/min bei 2,5 bar lieferte.

Als Zirkulationspumpe kam eine 35 W Industriepumpe mit integriertem Rückschlagventil zur Rückflußverhinderung zum Einsatz. Der Zirkulationsvolumenstrom betrug etwa 3 l/min.

Kompensatoren

Der für Tests mit diskontinuierlichem Pumpenbetrieb verwendete Hauptkompensator hatten ein Gesamtvolumen von 18 l. Der angeschlossene, einstellbare Druckschalter wurde zur Pumpensteuerung verwendet. Der Kompensator war direkt hinter der Pumpe eingebaut.

Für die Tests mit der Bezeichnung „mit Kompensator“ wurden drei Kompensatoren mit je 2 l Volumen eingesetzt. Sie wurden direkt an der Hauptversorgungsleitung an den Positionen der Lavatory Gruppen eingesetzt

Verbraucher

Die Wasserverbraucher wurden in 5 Gruppen zusammengefaßt in den Teststand integriert:

- Gruppe 1 Drei Lavatories mit je einem Wasserhahn und einem Toiletten-spülventil
- Gruppe 2 Zwei Galleys mit je einem Wasserhahn und einer Kaffeemaschine
- Gruppe 3 Zwei Lavatories mit je einem Wasserhahn und einem Toiletten-spülventil
- Gruppe 4 Zwei Galleys mit je einem Wasserhahn und einer Kaffeemaschine
- Gruppe 5 Zwei Lavatories mit je einem Wasserhahn und einem Toiletten-spülventil

Jede Gruppe war mit einem Drucksensor und einem Volumenstromsensor ausgestattet. Ein weiterer Drucksensor befand sich am Wassertank.

Schlußbericht

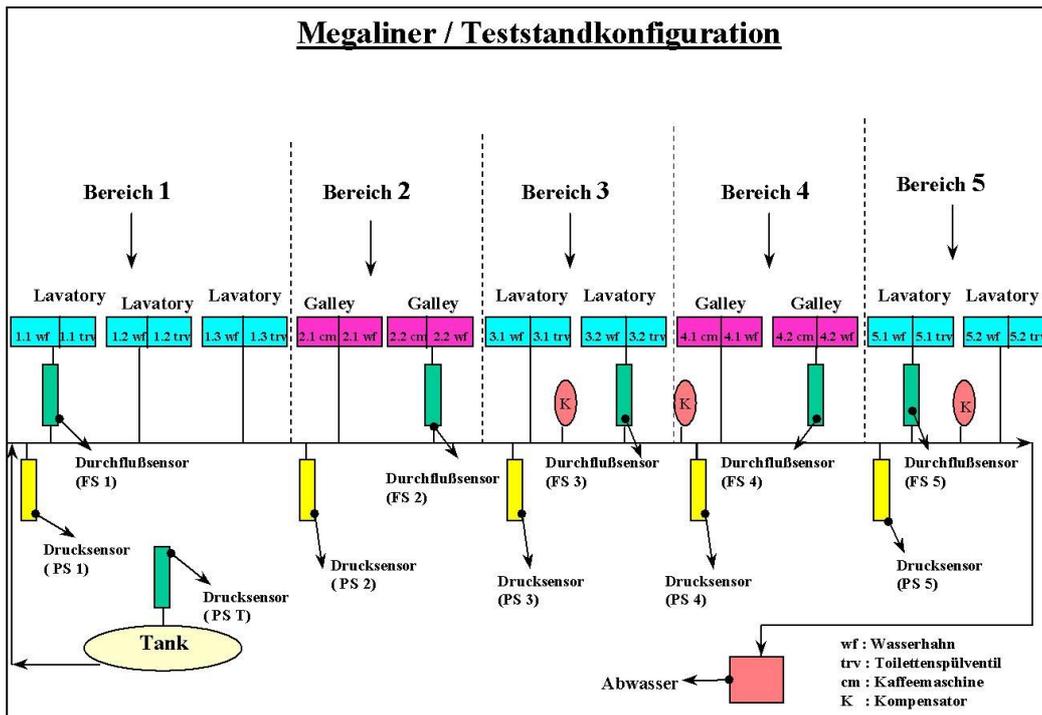


Abbildung 13: Teststandkonfiguration

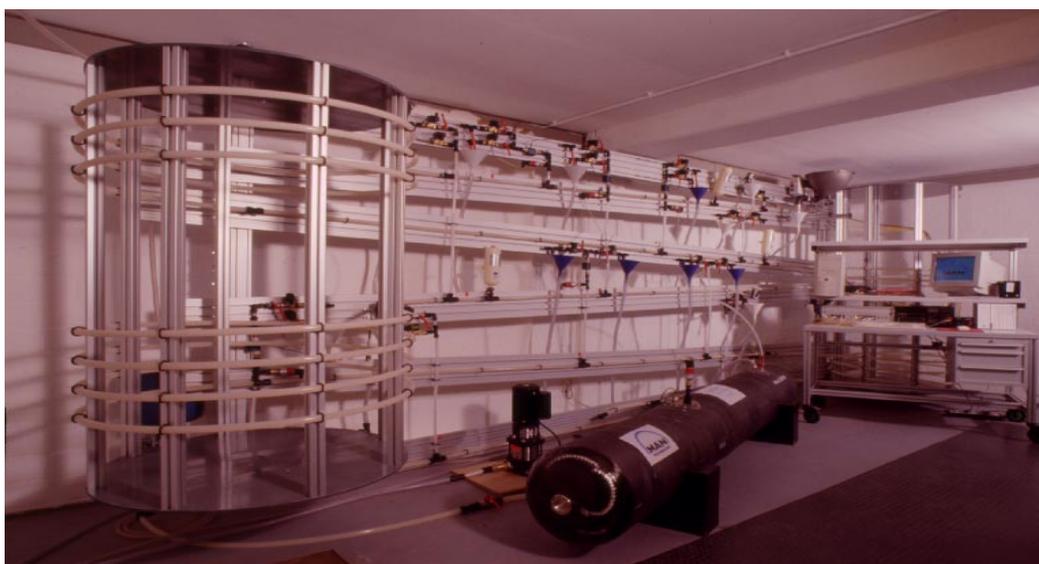


Abbildung 14: Technologieträger

Schlußbericht

2.6 Erprobung des Technologieträgers

2.6.1 Systemfunktion

2.6.1.1 Allgemeine Testbeschreibung

Vorversuche

In einem Vorversuch wurden die statischen Drücke an allen Sensoren bei Tanknenndruck und geschlossenen Verbrauchern gemessen. Die dabei festgestellten Druckdifferenzen resultierten aus den Instalationshöhen der Sensoren aufgrund der Simulation eines Anstellwinkels von 3°.

Vorversuche haben gezeigt, daß es in der Leitung zu heftigen Druckschlägen kommt, wenn Verbraucher aktiviert oder deaktiviert werden. Ursache ist der zyklische Wechsel der Wasserflußrichtung bei Öffnung mehrerer Verbraucher.

Auch durch Einbau eines großen Kompensators am Ende der Leitung kommt es aufgrund der Füllung des Kompensators durch die Pumpe und der Leerung des Kompensators durch die Verbraucher zu Druckschlägen.

Die Verwendung von kleineren Kompensatoren im Nähe der Lavatories führte zu einer Minderung der Druckschläge.

Testdurchführung

Die Tests wurden bei Nenndrücken von 1,72 bar (25 psi) und 2,41 bar (35 psi) durchgeführt. Jedes Systemkonzept wurde mit mehreren Kombinationen von geöffneten Wasserverbrauchern untersucht. Während eines Tests wurden alle ausgewählten Verbraucher gleichzeitig geöffnet. Jeder Verbraucher schloß nach seiner normalen Öffnungszeit (nach 1 sec für Toilettenspülventil, nach 20 sec für Wasserhahn und Kaffeemaschine). Die Meßwerte der Drucksensoren wurden bis zu 30 sec lang aufgezeichnet und dargestellt, beginnend mit der Aktivierung der Verbraucher. Die Aktivierung und Datenaufzeichnung wurde mit dem Softwaretool LABVIEW durchgeführt.

Schlußbericht

Begriffserklärung

Gleichzeitigkeit:

Volumenstrom der gewählten Verbraucher im Verhältnis zum Volumenstrom aller Verbraucher wird hier Gleichzeitigkeit S genannt:

S = 0 %

alle Verbraucher [Toilettenspülventil (TRV), Lavatorywasserhahn (LWF), Kaffeemaschine (GCM), Galleywasserhahn (GWF)] sind geschlossen.

S = 100 % ist definiert als:

7 TRV, 7 LWF, 4 GWF und 4 GCM sind gleichzeitig geöffnet.

System mit dezentralen Grauwasseraufbereitungsmodulen:

Durch die dezentralen Grauwasseraufbereitungsmodule entfallen die Toilettenspülventile (TRV) im Frischwassersystem, so daß 19 aktive Verbraucher verbleiben. Die Gleichzeitigkeit ist definiert als S* mit:

S* = 100 % ist definiert als:

7 LWF, 4 GWF und 4 GCM sind gleichzeitig geöffnet.

Aktivierungsdruck (-abfall):

Beim Öffnen der Verbraucher tritt aufgrund der Massenträgheit des in den Leitungen befindlichen Wassers ein merklicher Druckabfall auf. Die Tabellenwerte zeigen den minimal auftretenden Druck in der Leitung.

Deaktivierung Toilettenspülventil (Spitze):

Beim Schließen der Verbraucher tritt aufgrund der Massenträgheit des ausströmenden Wassers eine Druckspitze auf. Die Tabellenwerte zeigen die maximal auftretenden Druckspitzen in der Leitung. Das Toilettenspülventil wurde aufgrund seines hohen Volumenstroms gewählt.

Fließdruck:

Der gleichmäßige Fließdruck konnte nur für Wasserhähne und Kaffeemaschinen ermittelt werden, da der Durchfluß des Toilettenspülventils weitgehend vom Aktivierungsdruckabfall überlagert wird. Die Tabellenwerte zeigen den minimal auftretenden Druck in der Leitung.

Schlußbericht

2.6.1.2 Verifikation Konzept 1.1

25 psi Tests

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung Toilettenspülventil (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|------|--|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 7 | 1,1 | | | | | |
| 19,3 | 0,5 | 1,25 | 2,5 | 1,7 | 1,5 | 1,5 |
| 28,1 | 0,3 | 1,0 | 2,8 | 1,7 | 1,5 | 1,5 |
| 42,1 | -0,1 | | 2,8 | | 1,4 | |
| 66,0 | 0 | | 2,6 | | 1,4 | |

Tabelle 7: 25 psi, Konzept 1.1

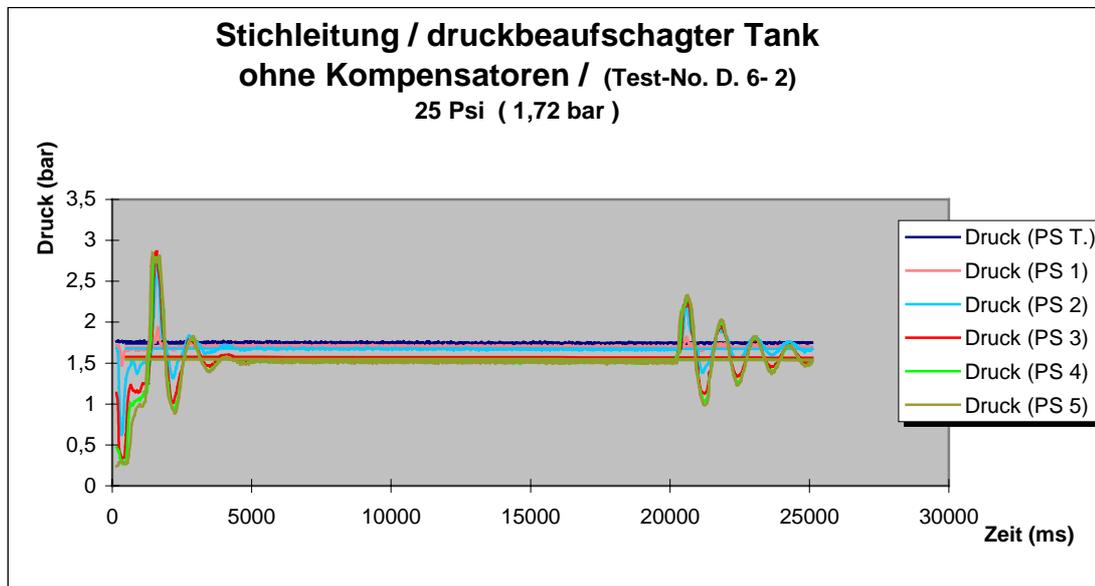


Abbildung 15: Beispiel eines Druckdiagramms bei einer Gleichzeitigkeit von 28,1%

Schlußbericht

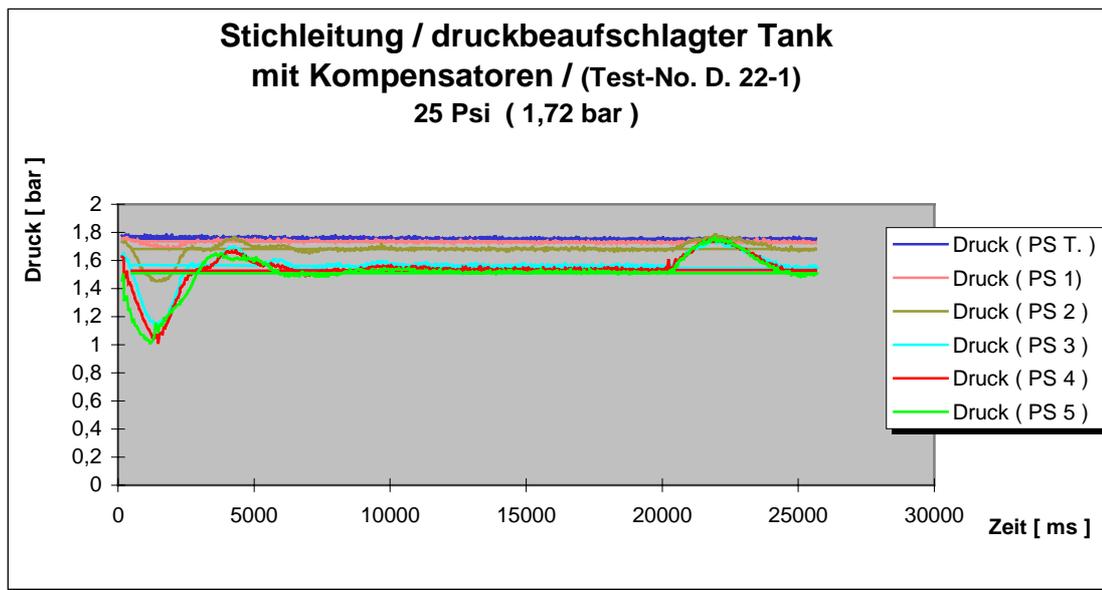


Abbildung 16: Beispiel eines Druckdiagramms bei einer Gleichzeitigkeit von 28,1%

35 psi Tests

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung Toilettenspülventil (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|--|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 7 | 1,6 | | 2,6 | | 2,2 | |
| 19,3 | 0,7 | 1,7 | 3,2 | 2,4 | 2,2 | 2,2 |
| 28,1 | 0,4 | 1,4 | 3,7 | 2,4 | 2,2 | 2,2 |
| 42,1 | 0 | | 3,8 | | 2,2 | |
| 66,0 | 0,1 | | 3,5 | | 2,1 | |

Tabelle 8: 35 psi, Konzept 1.1

Schlußbericht

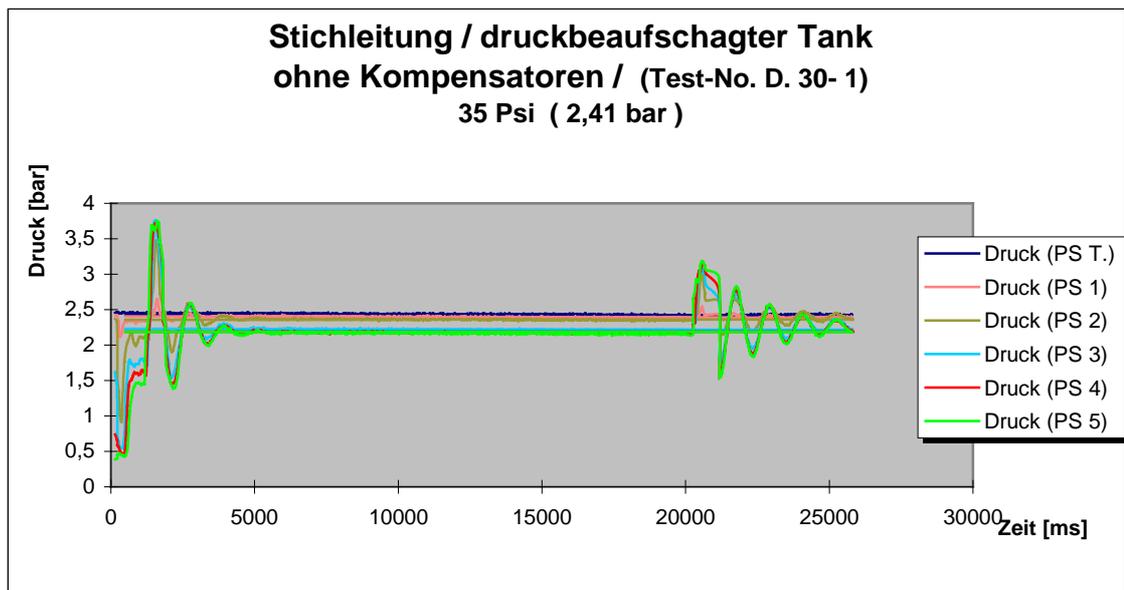


Abbildung 17: Beispiel eines Druckdiagramms bei einer Gleichzeitigkeit von 28,1%

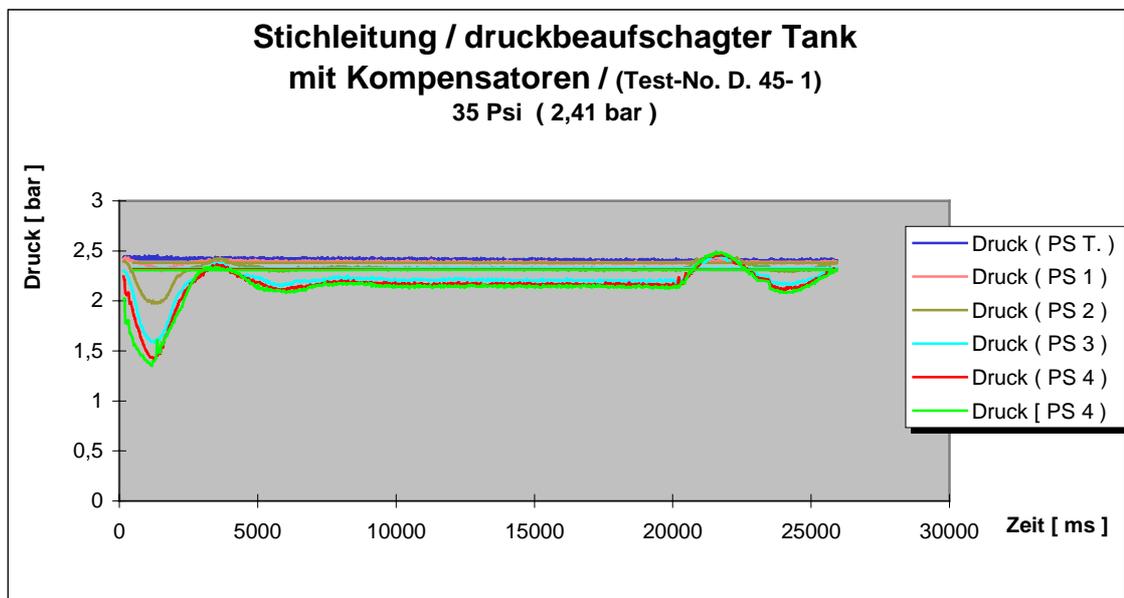


Abbildung 18: Beispiel eines Druckdiagramms bei einer Gleichzeitigkeit von 28,1%

Schlußbericht

Beurteilung Konzept 1.1

Dieses Konzept (ohne Kompensatoren) ist ähnlich dem A340-System.

1. Merklicher Druckabfall beim Öffnen der Verbraucher aufgrund der Massenträgheit des Wassers.
2. Der Druckabfall überlagert die Funktion des Toilettenspülventils derart, daß der Wasserdruck erst wieder akzeptable Werte erreicht, wenn das Ventil bereits wieder geschlossen ist.
3. Dieses Verhalten kann durch erhöhten Tankdruck nicht merklich verbessert werden.
4. Der Abfall des kontinuierlichen Fließdruckes während der Funktion von Wasserhahn oder Kaffeemaschine ist minimal.
5. Die Verwendung von Leitungskompensatoren begrenzt den Druckabfall auf akzeptable Werte.

2.6.1.3 Verifikation Konzept 1.2

25 psi Tests

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung Toilettenspülventil (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|--|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 13,1 | 0,6 | 1,0 | 2,2 | 2,2 | 1,5 | 1,5 |
| 31 | 0,3 | 0,9 | 2,2 | 2,1 | 1,5 | 1,5 |

Tabelle 9: 25 psi, Konzept 1.2

Schlußbericht

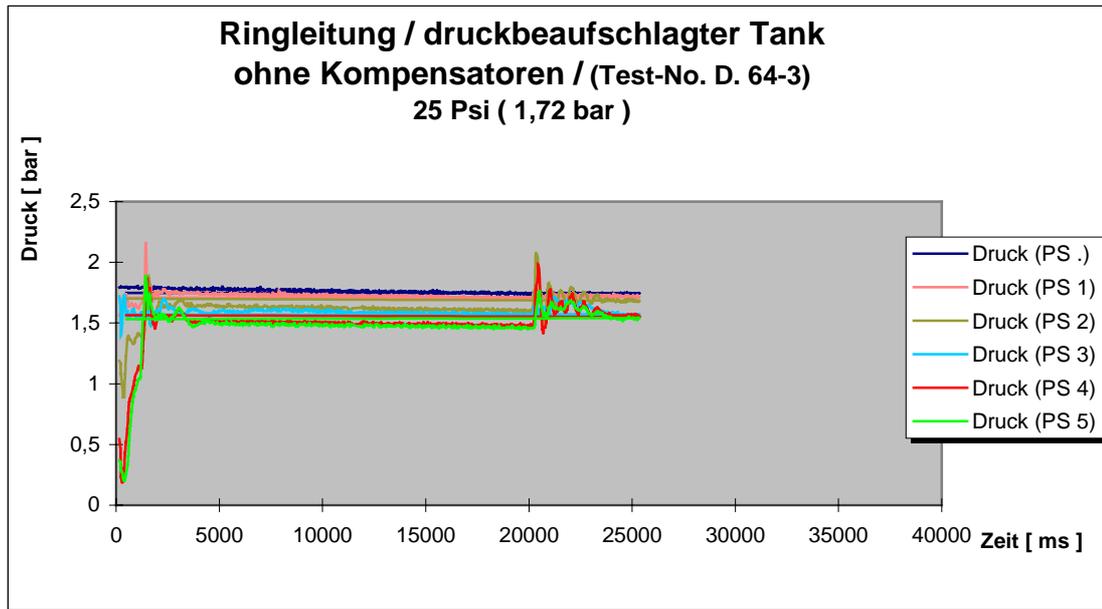


Abbildung 19: Beispiel eines Druckdiagramms bei einer Gleichzeitigkeit von 31%

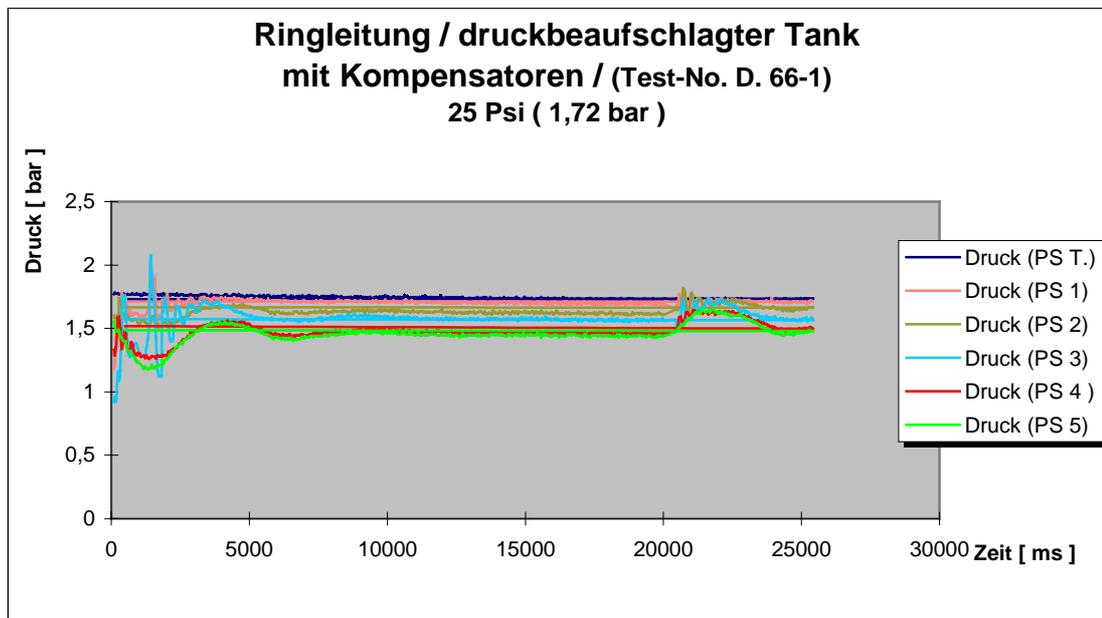


Abbildung 20: Beispiel eines Druckdiagramms bei einer Gleichzeitigkeit von 31%

Schlußbericht

35 psi Tests

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung Toilettenspülventil (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|--|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 13,1 | | 1,4 | | 2,7 | | 2,2 |
| 31 | | 1,5 | | 2,6 | | 2,2 |

Tabelle 10: 35 psi, Konzept 1.2

35 psi Tests ohne Toilettenspülventil (Grauwasseraufbereitung)

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 6 | | 2,2 | | 2,5 | | 2,3 |
| 9,5 | | 2,0 | | 2,5 | | 2,2 |

Tabelle 11: 35 psi, Konzept 1.2 mit Grauwasseraufbereitung

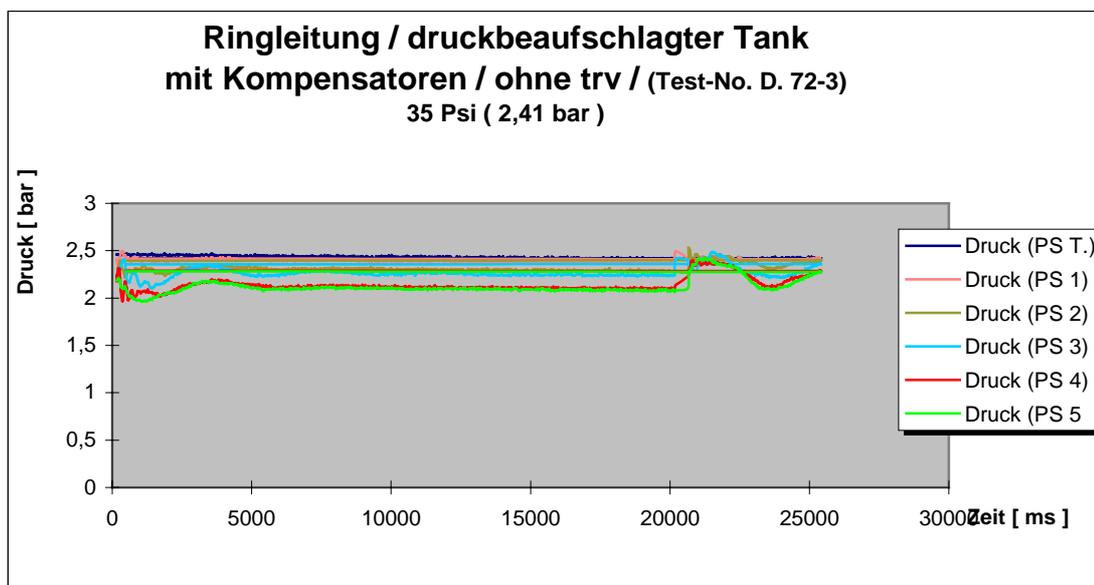


Abbildung 21: Beispiel eines Druckdiagramms bei gleichzeitiger Öffnung aller Verbraucher

Schlußbericht

Beurteilung Konzept 1.2

Dieses Konzept repräsentiert ein Ringleitungssystem mit Speicherung und Druckerzeugung ähnlich dem A340-System.

1. Merklicher Druckabfall beim Öffnen der Verbraucher aufgrund der Massenträgheit des Wassers.
2. Der Druckabfall ist vergleichbar mit den Werten des Konzeptes 1.1
3. Ein Einfluß der Zirkulationspumpe auf die Druckschwankungen kann im Vergleich mit Konzept 1.1 nicht festgestellt werden.
4. Der Abfall des kontinuierlichen Fließdruckes während der Benutzung von Wasserhahn oder Kaffeemaschine ist minimal.
5. Die Verwendung von Leitungskompensatoren begrenzt den Druckabfall auf akzeptable Werte.
6. Tests ohne Toilettenspülventile zeigen deren wesentlichen Einfluß auf den Aktivierungsdruckabfall. Die Gleichzeitigkeit läßt sich bei einem System ohne Toilettenspülventil deutlich steigern.

2.6.1.4 Verifikation Konzept 2.1

35 psi Tests

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung Toilettenspülventil (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|--|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 19,3 | 0,8 | 1,8 | 2,8 | 2,8 | 1,8 | 1,8 |
| 28,1 | 0,5 | 1,3 | 3,4 | 2,8 | 1,8 | 1,8 |

Tabelle 12: 35 psi, Konzept 2.1

Schlußbericht

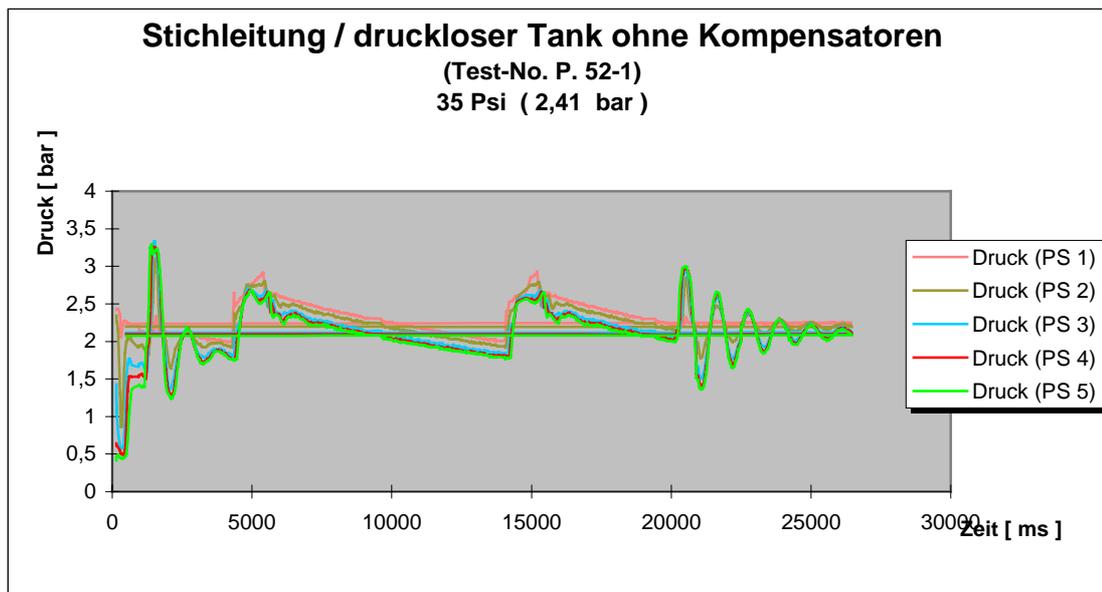


Abbildung 22: Beispiel eines Druckdiagramms bei einer Gleichzeitigkeit von 28,1%

Beurteilung Konzept 2.1

Dieses Konzept repräsentiert ein System mit Pumpen für den Wassertransport und Stichleitungen.

Ergebnis Simulation:

Es ermöglicht im Druckbereich von 0,7 bis 2,8 bar unter Verwendung von $\frac{3}{4}$ Zoll Rohrleitungen eine hohe Gleichzeitigkeit:

mit Grauwasseraufbereitung $S^* = 100\%$ und
ohne Grauwasseraufbereitung $S = 34\%$

Gleichzeitigkeit für $\frac{1}{2}$ Zoll Rohrleitungen:

mit Grauwasseraufbereitung $S^* = 37\%$ und
ohne Grauwasseraufbereitung $S = 10\%$

Schlußbericht

Ergebnis Versuch:

1. Merklicher Druckabfall beim Öffnen der Verbraucher aufgrund der Massenträgheit des Wassers.
2. Der Druckabfall ist vergleichbar mit den Werten des Konzeptes 1.1
3. Der Abfall des kontinuierlichen Fließdruckes während der Funktion von Wasserhahn oder Kaffeemaschine ist minimal.
4. Die Verwendung von Leitungskompensatoren begrenzt den Druckabfall auf akzeptable Werte.
5. Die Drücke überlagern sich mit der diskontinuierlichen Druckregelung der Pumpe. Der Druckschalter war auf 1,8 bar min. und 2,4 bar max. eingestellt. Die Pumpenlaufzeit bei einer Gleichzeitigkeit von 28,1% betrug 15%.

2.6.1.5 Verifikation Konzept 2.2

Beurteilung Konzept 2.2

Dieses Konzept realisiert die Wasserzirkulation allein mit der Hauptpumpe. Der Systemdruck wurde mit einem Volumenstrombegrenzer am Tankeingang der Rücklaufleitung eingestellt.

Ergebnis Simulation:

Das System ermöglicht im Druckbereich von 0,7 bis 2,8 bar unter Verwendung von $\frac{3}{4}$ Zoll Rohrleitungen eine hohe Gleichzeitigkeit von $S = 20 \%$. Für den Druckbereich von 0,7 bis 2,1 bar ist die Gleichzeitigkeit geringer mit $S = 10 \%$. Bei Verwendung von $\frac{1}{2}$ Zoll Rohrleitungen liegt die Gleichzeitigkeit nur bei 4% , selbst für den höheren Druckbereich.

Mit Grauwasseraufbereitung steigt unter Verwendung von $\frac{3}{4}$ Zoll Rohrleitungen die Gleichzeitigkeit im Druckbereich von 0,7 bis 2,1 bar auf $S^* = 47 \%$ und im Druckbereich von 0,7 bis 2,8 bar auf $S^* = 84 \%$. In einem System mit $\frac{1}{2}$ Zoll Rohrleitungen beträgt die Gleichzeitigkeit bar $S^* = 11 \%$ im Druckbereich von 0,7 bis 2,1 und bar $S^* = 21 \%$ im Druckbereich von 0,7 bis 2,8 bar.

Schlußbericht

Ergebnis Versuch:

1. Die Einstellung von Zirkulationsvolumenstrom und Druck war aufgrund der Systemanforderungen sehr schwierig. Hohe, von einer leistungsstarken Pumpe erzeugte Volumenströme verursachten einen Druckabfall über die Leitungslänge von 1,5 bar bei geschlossenen Verbrauchern.
2. Die Anpassung von Pumpe und Volumenstrombegrenzer für ein solches System erscheint sehr schwierig.
3. Ein Einfluß von Leitungskompensatoren konnte nicht festgestellt werden.

2.6.1.6 Verifikation Konzept 2.3

35 psi Tests

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung Toilettenspülventil (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|--|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 16,7 | | 1,5 | | 2,6 | | 1,8 |
| 25,0 | 1,2 | 1,4 | 2,6 | 2,7 | 1,8 | 1,8 |
| 31,0 | | 1,2 | | 2,6 | | 1,8 |
| 63,1 | | 1,4 | | 2,6 | | 1,8 |

Tabelle 13: 35 psi, Konzept 2.3

35 psi Tests ohne Toilettenspülventil (Grauwasseraufbereitung)

| Gleichzeitigkeit S [%] | Aktivierungsdruck (Abfall) [bar] | | Deaktivierung (Spitze) [bar] | | Fließdruck [bar] | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|---------------------|-----|
| | Kompensator | | Kompensator | | Kompensator | |
| | nein | ja | nein | ja | nein | ja |
| 6,0 | | 1,8 | | 2,6 | | 1,8 |
| 9,5 | | 2,0 | | 2,6 | | 1,8 |

Tabelle 14: 35 psi, Konzept 2.3 mit Grauwasseraufbereitung

Beurteilung Konzept 2.3

Dieses Konzept repräsentiert ein System mit Pumpen für den Wassertransport und Ringleitung.

Schlußbericht

Ergebnis Simulation:

Bezüglich der Gleichzeitigkeit weist dieses Konzept nur geringe Unterschiede zu Konzept 2.1 auf.

Ergebnis Versuch:

1. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit Konzept 2.1.
2. Ein Einfluß der Zirkulationspumpe im Vergleich mit Konzept 1.1 kann nicht festgestellt werden.
3. Der Abfall des kontinuierlichen Fließdruckes während der Funktion von Wasserhahn oder Kaffeemaschine ist minimal.
4. Die Verwendung von Leitungskompensatoren begrenzt den Druckabfall auf akzeptable Werte.
5. Tests ohne Toilettenspülventile zeigen deren wesentlichen Einfluß auf den Aktivierungsdruckabfall. Die Gleichzeitigkeit läßt sich bei einem System ohne Toilettenspülventil deutlich steigern.

2.6.2 Systemdrainage

Zum Schutz des Frischwassersystems vor Schäden durch Einfrieren muß das System am Boden drainiert werden können.

Da die Versorgungsrohrleitungen aus Platz- und Kabinenflexibilitätsgründen horizontal in den Decks liegen sollen, ist eine Druckluftdrainage des Systems im Versuch untersucht worden.

Ziel war die Bestimmung der im System verbleibenden Restwassermenge im Vergleich zur Schwerkraftdrainage.

Die Versuche wurden am MAN-Technologieträger durchgeführt. Die Bestimmung der im System verbliebenen Restwassermenge erfolgte durch Austreibung des Wassers mit einem Molch.

Ergebnis

Die Systemdrainage mit Druckluft ermöglicht im System verbleibende Restwassermengen von ca. 2%, die geringer sind als bei der Schwerkraftdrainage mit 3-5%. Ein weiterer Vorteil sind die gegenüber der Schwerkraftdrainage deutlich kürzeren Drainagezeiten.

Schlußbericht

2.6.3 Frischwasserentkalkung

Wirkungsweise der physikalischen Wasserentkalker

Durch magnetische Polarisierung natürlich in Wasser gelöster Salze soll die landläufig „Verkalkung“ genannte Wasser- oder Kalksteinbildung an Rohrwandungen und Behältern verhindert werden. Gelöste Salze sollen längere Zeit (ca. 30 Stunden) in der gelösten Phase verharren, so daß sie im Wasser mitgeschlämmt werden können, statt sich niederzuschlagen und zu verhärten. Entkalkung ist bei den physikalischen Verfahren ein nicht ganz zutreffender, aber im Sprachgebrauch allgemein üblicher Name, da der Kalk nicht aus dem Wasser entfernt wird, sondern nur seine Kristallisationsformen so geändert werden sollen, daß der Kalk leichter von der Rohrwandung wieder abgelöst werden kann.

Versuchsaubau

Der Versuchsaufbau zur Effektivitätsmessung der physikalischen Wasserentkalkung mit Permanentmagneten sieht wie folgt aus:

Um realistische Verhältnisse wie im Flugzeug nachzubilden, wurde der physikalische Wasserentkalker in die Fülleitung des Wassertanks eingebaut. Am Tankausgang wurde ein Waterheater mit einem Wasserhahn angeschlossen.

Es wurden drei , bis auf den Entkalker, gleiche Anlagen aufgebaut:

1. Anlage: Perma-Plus PP/M20 Entkalker
2. Anlage: Permasolvent PT/S25E Entkalker
3. Anlage: Referenzanlage ohne Entkalker

Versuchsablauf

Die Tanks wurden alle 24 Stunden bei einem Volumenstrom von 40 l/min mit 50 l Wasser befüllt.

Aus den Speichertanks wurde jeweils halbstündig je ca. 1 l Wasser in die Waterheater gefördert und dort auf normale Betriebstemperatur (ca. 65 °C) aufgeheizt.

Die an den Waterheatern angebrachten Wasserhähne wurden leicht geöffnet, so daß das Wasser langsam bei allen drei Anlagen gleichstark heraustropfte. Das Wasser wurde jeweils über eine Glasscheibe zum Abfluß geleitet. Durch Verdunstung des erwärmten Wassers konnten deutliche Spuren der mitgeschlämmt Salze auf den Glasscheiben festgestellt werden.

Insgesamt wurden je Waterheater 1013 Zyklen durchgeführt, was einem Wasservolumen von je ca. 1 m³ entspricht.

Schlußbericht

Ergebnisse

Eine optische Bewertung der Niederschläge auf den Glasscheiben zeigte stärkere Ablagerungen bei den Anlagen mit physikalischer Wasserbehandlung. Die stärkeren Ablagerungen bedeuten, daß mehr Salze vom Wasser mitgeschlämmt und aus dem System drainiert wurden. Im System verblieben also weniger Salze, was eine verringerte Kesselsteinbildung bewirkt. Makroskopisch war auch eine Veränderung der Kristallisationsform erkennbar. Die Kalkablagerungen der Anlagen 1 und 2 waren nicht so hart sondern eher pulverförmig und konnten daher leichter abgewischt oder entfernt werden. Mikroskopisch ließ sich diese Veränderung nicht nachweisen.

Beendigung der Untersuchungen

Nach diesen ersten positiven Ergebnissen übernahm die DaimlerChrysler Aerospace Airbus GmbH vorerst die weitere Behandlung dieses Themas.

Schlußbericht

2.7 Versuchsauswertung

2.7.1 Systemfunktion

1. Signifikante Unterschiede zwischen Systemen mit druckbeaufschlagtem und drucklosem (Pumpe) Tank bezüglich ihres Druckverhaltens konnten nicht festgestellt werden.
2. Die Integration einer Zirkulationspumpe führt nicht zu einer Verbesserung des Druckverhaltens.
3. Die Integration kleiner Leitungskompensatoren bewirkt eine merkliche Verbesserung des Druckabfallverhaltens der Systeme, speziell während der Funktion der Toilettenspülventile.
4. Die Einführung der Grauwasseraufbereitung, bei der Toilettenspülventile nicht Bestandteil des Frischwassersystems sind, führt zu einer Verbesserung des Druckabfallverhaltens. Das erlaubt eine hohe Gleichzeitigkeit bei der Nutzung der Wasserverbraucher.
5. Ein Systemlayout mit Grauwasseraufbereitung und Kompensatoren hat den Vorteil den Leitungsdurchmesser reduzieren zu können.

2.7.2 Frischwasserdesinfektion

Analytische Betrachtungen, sowie die Ergebnisse einer Studie des Lehrstuhl und Prüfamts für Wassergüte- und Abfallwirtschaft der TU München im Auftrag der MAN Technologie AG führen zu einer Reihe von Rahmenbedingungen, deren Beachtung bei der Systemauslegung die Gefahr der Vermehrung infektiöser Mikroorganismen in einem Flugzeug-Frischwassersystem deutlich reduziert.

- Ringleitungssystem ist besser als Stichleitungssystem
- Stichleitungen am Ringleitungssystem zu den Verbrauchern so kurz und mit so geringem Durchmesser, daß sie maximal das Volumen einer Wasserverbrauchsaktion enthalten, sonst nähert sich das Ringleitungssystem bezüglich Desinfektion dem Stichleitungssystem an.
- Wassertemperatur des Kaltwassers maximal 15 °C
- UV-Desinfektionsanlage im Ringleitungskreislauf

Schlußbericht

- Kein Wasserstillstand bei laufendem UV-Reaktor
- Systemdrainage über Druckbelüftung mit heißer Luft (> 80 °C)
- Einsatz ölfreier Druckluft
- Verwendung von feinmaschigen Luftfiltern in Druckluftleitungen
- Vermeidung von unreinen Luftansaugstellen für Systemdrainage, insbesondere in Küchen und Toiletten

2.7.2 Entkalkung

Die erzielten Versuchsergebnisse sind ein Hinweis auf die verkalkungsreduzierende Wirkung von Permanentmagneten, aber noch kein Beweis.

Zum besseren Verständnis der Wirkmechanismen und zur Entwicklung wirkungsvoller, einfacher und zuverlässiger Anlagen zur Reduzierung der Kalksteinbildung sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Schlußbericht

2.8 Engineering Mock-Up Rumpfsektion

Technologie-Demonstrator

Für das von der DaimlerChrysler Aerospace Airbus GmbH erstellte Engineering Mock-up Rumpfsektion wurde ein Technologie-Demonstrator des Frischwassersystems eines Mehrdeckflugzeuges in Form eines LD 6 – Containers aufgebaut und geliefert.

Der Container beinhaltet neben dem Vollintegrierten Tank alle erforderlichen Systemkomponenten wie Wasseranschluß zum Verteilungsleitungsnetz, Steuerung, Sensorik, Ventile, Druckerzeugung und Service Panel, sowie eine UV-Desinfektion.

Der Technologie-Demonstrator wird an das Engineering Mock-up angeschlossen und ermöglicht dann die Simulation des Wassersystems eines Megaliners.



Abbildung 23: Engineering Mock-up Rumpfsektion

Schlußbericht

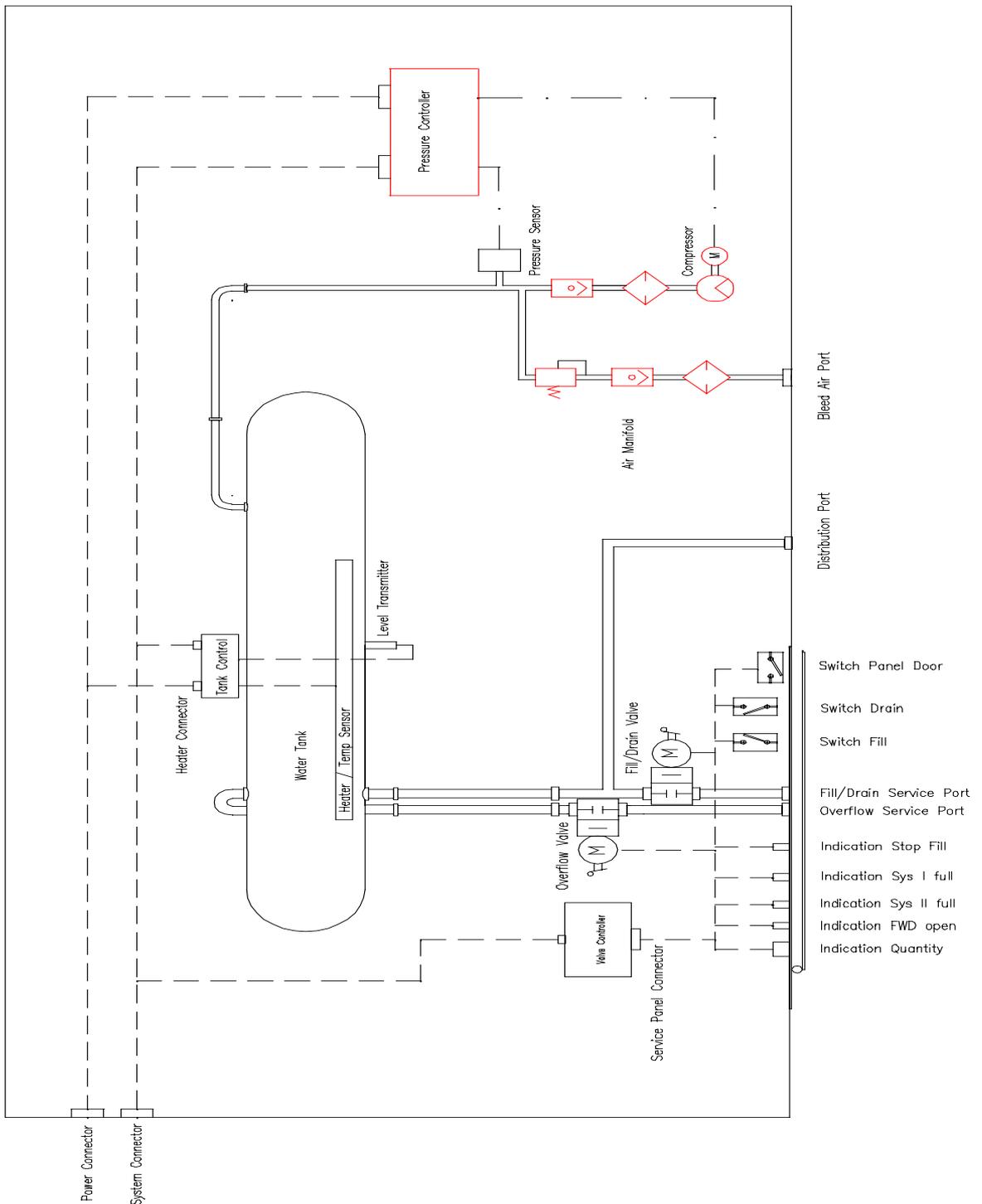


Abbildung 24: Aufbau Technologie-Demonstrator - Schematische Darstellung

Schlußbericht

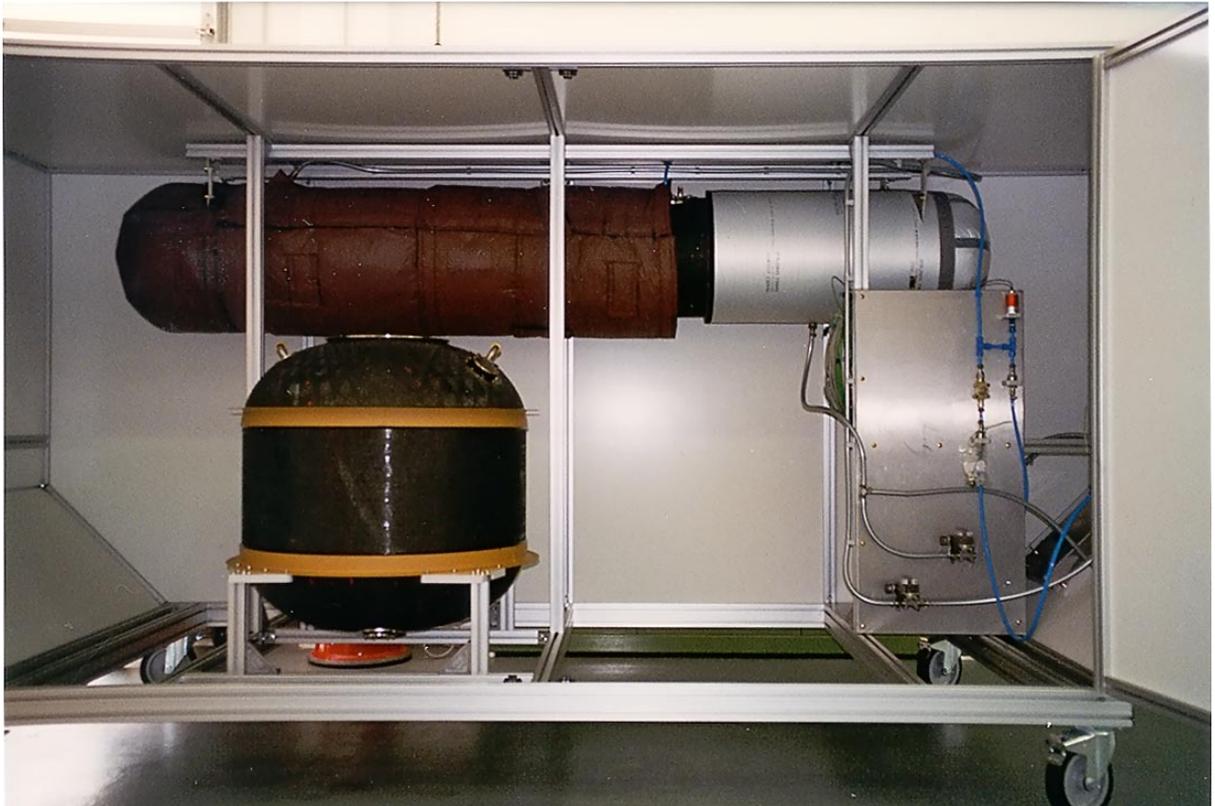


Abbildung 25: Aufbau Technologie-Demonstrator

Komponenten des Technologie-Demonstrators

Der Technologie-Demonstrator versorgt über den Wasseranschluß das gesamte im Engineering Mock-up Rumpfsktion installierte Wasserleitungsnetz mit druckbeaufschlagtem Wasser.

Das Wasser wird in einem integriert beheizten Tank gespeichert, der über einen Kompressor oder über das Bleed-Air System mit Druck beaufschlagt wird. Der Tank kann am Boden über das Service Panel gefüllt oder drainiert werden. Von der Kabine aus kann der Tank manuell druckentlastet werden.

Optional können Speicherkapazität, die Anzahl der Druckerzeuger und die Anzahl der Drainageventile erhöht werden.

Schlußbericht

Die Steuerung des Wassersystems erfolgt im Technologie-Demonstrator durch einen handelsüblichen Computer mit entsprechenden Interfaces und eine speziell angepaßte Steuersoftware. Im Flugzeug ist eine Steuerung durch drei separate Controller über einen RS485 Bus:

- Der Pressure Controller regelt den Systemdruck. Er besteht aus einem Power Relais zur Kompressorsteuerung.
- Der Tank Controller steuert Tankheizung und Füllstandsmessung und –bewertung. Der Füllstand wird an andere Controller weitergeleitet.
- Der Valve Controller steuert die Ventile abhängig von den manuellen Einstellungen am Service Panel oder in der Kabine. Er steuert auch die entsprechenden Anzeigen im Service Panel.

Schlußbericht

3. ZUSAMMENFASSUNG

Das Ergebnis dieses Forschungsvorhabens ist ein wichtiger Zwischenstand in einem weitergehenden technischen und kommerziellen Entwicklungsprozeß.

Am erfolgversprechendsten erscheint für ein sehr großes Langstreckenflugzeug in Doppeldeckkonfiguration ein Frischwassersystem, das aus zwei redundanten Ringleitungen besteht, je eine für die linke und rechte Flugzeugseite.

Die gemeinsame Wasserversorgung der Ringleitungen erfolgt aus druckbeaufschlagten Tanks im Heck des Flugzeuges. Die Wasserzirkulation im Ringleitungssystem wird durch eine Kreiselpumpe sichergestellt. Die Zirkulation ermöglicht eine energiesparende zentrale Heizung des Frischwassers zur Eisfreihaltung des Systems.

Eine horizontale Leitungsverlegung ermöglicht dabei ein hohes Maß an Flexibilität der Kabinengestaltung. Die Systemdrainage wird dabei durch Druckluft oder Unterdruck sichergestellt. Die Auswahl des Verfahrens ist abhängig von der Auslegung anderer Systeme.

Eine UV-Desinfektionsanlage zur Begleitdesinfektion ist auf einfache Weise in ein solches System zu integrieren. Erste, vielversprechende Hinweise auf eine kalksteinreduzierende Wirkung physikalischer Entkalkungsverfahren konnten erarbeitet werden.

Bei Änderung wesentlicher Parameter der Flugzeugkonfiguration kann eine andere Systemauslegung vorteilhafter sein, beispielsweise ein Stichleitungssystem bei Installation der Frischwassertanks in der Flugzeugmitte.

Schlußbericht

LUFTFAHRTFORSCHUNGSPROGRAMM 1

**FORTSCHRITTLICHES
WASSERSYSTEM**

Arbeitspaket 6.3

Grauwasseraufbereitung

| | |
|--------------------|---------------------------|
| Laufzeit: | Juli 1996 - Dezember 1998 |
| Förderkennzeichen: | WIF 9503 J |
| Verfasser: | Dr. Karin Thudt |

MAN Technologie AG
Liebigstraße 5a
85757 Karlsfeld

Telefon: (08131) 89-1803
Telefax: (08131) 89-1914

Schlußbericht

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | BESCHREIBUNG DES VORHABENS | 3 |
| 1.1 | Gesamtziel des Vorhabens..... | 3 |
| 1.2 | Planung und Ablauf der Arbeiten..... | 4 |
| 1.3 | Literaturrecherche | 5 |
| 2 | ERGEBNISSE DES VORHABENS | 9 |
| 2.1 | Definition der Anforderungen | 9 |
| 2.2 | Konzepterstellung und Konzeptbewertung | 15 |
| 2.2.1 | Zentrale und dezentralem Systeme | 15 |
| 2.2.2 | Aufbereitungsverfahren | 19 |
| 2.3 | Systemdefinition | 22 |
| 2.3.1 | Definition der Funktionen..... | 22 |
| 2.3.2 | Definition der Komponenten | 23 |
| 2.3.3 | Grauwasseraufbereitungs-Einheit (GWU) | 23 |
| 2.3.4 | Füllstandsensoren | 27 |
| 2.3.5 | Prefill Ventil | 28 |
| 2.3.6 | Drain Ventil..... | 30 |
| 2.3.7 | Wasser Pumpe..... | 30 |
| 2.3.8 | Kontrolleinheit (GWC) | 31 |
| 2.4 | Herstellung der Technologieträger | 33 |
| 2.4.1 | Herstellung von Grauwasser | 33 |
| 2.4.2 | Teststand zur Grauwasseraufbereitung..... | 34 |
| 2.5 | Erprobung der Technologieträger | 38 |
| 2.5.1 | Versuchsplanung..... | 38 |
| 2.5.2 | Flugzeugspezifische statistische Daten | 39 |
| 2.5.3 | Herstellung von Grauwasser im Teststand | 41 |
| 2.5.4 | Analyse des Grauwassers | 42 |

Schlußbericht

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.5 | Erstellen eines Simulations- und Steuerungsprogramms | 47 |
| 2.5.6 | Dimensionierung der Grauwassereinheit..... | 49 |
| 2.5.7 | Langzeitversuche mit verschiedenen Grauwassereinheiten und Filtern..... | 54 |
| 2.5.8 | Untersuchung der Aerosolbildung | 61 |
| 2.5.9 | Betriebskostenuntersuchung | 62 |
| 3 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK..... | 66 |
| 4 | LITERATUR / ERGÄNZENDE BERICHTE | 68 |

Schlußbericht

1 BESCHREIBUNG DES VORHABENS

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Die Möglichkeit der Grauwasseraufbereitung wurde am Beispiel des MEGALINER mit dem Ziel der Reduzierung des Wassersystemgewichts und damit auch des Energieverbrauchs untersucht.

Bei Großraumflugzeugen für Langstreckenflüge ist mit Wassermengen von mehreren Tonnen zu rechnen. Ihre Unterbringung hat erheblichen Einfluß auf die Flugzeugstruktur.

Außerdem führt die optimale Nutzung der großen Rumpfradien für die Unterbringung der Passagiere dazu, daß für Passagiersversorgungssysteme weniger Raum zur Verfügung steht.

Eine sinnvolle Art der Gewichtseinsparung und der Reduzierung des Raumbedarfs ist die Aufbereitung und Wiederverwendung des Grauwassers z.B. als Toilettenspülwasser.

Möglich sind hierbei verschiedene Verfahren zur Reinigung sowie Deodorieren. Die Hauptmenge des anfallenden Abwassers ist „Grauwasser“ (grey water) aus den Händewaschbecken der Toiletten (ca. 54% des Frischwasserverbrauchs) und aus den Küchen (12 % des Frischwasserverbrauchs). Dieses Wasser wird zur Zeit mittels eines Drain Masts über Bord verklappt. Bestehende Flugzeug-Wassersysteme sind daher „offene“ Systeme.

Aufgrund zahlreicher Beschwerden von Flughafenanwohnern mehren sich zur Zeit die Anzeichen, daß eine Verklappung über Bord durch gesetzliche Bestimmungen eingeschränkt oder verboten werden soll.

Um die ökologischen sowie andere Probleme zu vermeiden, die durch die Verwendung der Drain Masts entstehen, wie z.B. die Verschmutzung des Flugzeugs oder das Ansaugen der Flüssigkeit im Bereich der APU, wird die Realisierung eines „geschlossenen Wassersystems“ ohne Drain Mast-Entsorgung angestrebt. Dies führt jedoch zu erheblich größeren (etwa 66%) Abwassertanks und damit zu Mehrgewicht an Bord des Flugzeugs.

Die Aufbereitung des Grauwassers für eine Nutzung als Toilettenspülwasser ermöglicht eine Reduzierung des Frischwasserbedarfs um ca. 34 %. Dies entspricht bei einem Frischwasserbedarf von 1700–2200 l (für 900 Passagiere und eine Flugdauer von 15h) ca. 550–770 l Wassereinsparung.

Dementsprechend können Frischwassertanks und Abwassertanks kleiner dimensioniert oder ihre Anzahl reduziert werden.

Zudem kann der Wegfall des separaten Rohrleitungssystems zu den Drain Masts inklusive Beheizung zu einer Gewichtseinsparung von ca. 120 kg und zu Kosteneinsparungen führen.

Schlußbericht

1.2 Planung und Ablauf der Arbeiten

Am 9. Januar 1997 wurde von MAN Technologie im Rahmen des laufenden Vorhabens „Fortschrittliches Wassersystem“ ein Ergänzungsantrag zum Thema Grauwasseraufbereitung“ an das Bundesministerium für Wirtschaft gestellt. Der Antrag wurde am 13. Juni 1997 genehmigt. Das vorgesehene Ende der Laufzeit für diese Teilaufgabe war wie für die zwei anderen Teilaufgaben „Vollintegrierte Tanks“ und „Frischwassersystem für Mehrdeckflugzeuge“ der 31. Dezember 1998.

Am 13. August 1997 fand bei MAN Technologie in Karlsfeld eine Abstimmungsbesprechung mit Dasa-Airbus (DA) und AOA Apparatebau Gauting GmbH statt, in der Umfang und Schnittstellen der Arbeiten zum Vorhaben Grauwasseraufbereitung wie folgt festgelegt wurden:

- DA ist Systemführer. Die Partner arbeiten zu und liefern Komponenten für den Demonstrator. DA integriert die Komponenten zum Gesamtsystem in Zusammenarbeit mit den Partnern und steuert im Rahmen der Variantenbewertung den Ablauf. Es soll eine Systemsimulation mit Hardwaresteuerung auf einer Workstation erfolgen mit State Designer als Tool. Ziel ist der Funktionsnachweis eines Grauwassersystems. DA bearbeitet die übergeordneten Schnittstellen zum Flugzeug (z.B. Stromversorgung, Einbauposition, Baugröße, etc.)
- MAN Technologie ist verantwortlich für die Aufbereitungseinheit und die Schnittstellen zum Frischwassersystem, Frischwasserzulauf zur Aufbereitungseinheit mit Logik, Test mit Funktionsnachweis.
- AOA bearbeitet die Schnittstellen zwischen Grau- und Schwarzwassersystem, Drainage der Aufbereitungseinheit, Transport in die Toilette und Vakuumsystem inkl. Logik, Test mit Funktionsnachweis.

Schlußbericht

1.3 Literaturrecherche

Abwasser aus Badewannen, Duschen und Handwaschbecken, Waschmaschinen und Küchen wird als Grauwasser bezeichnet. Dieser Begriff, im Englischen Grey Water, gehört zum übergeordneten Thema des Abwasser-Recyclings und ist als Schlagwort in den Literaturdatenbanken eingeführt.

Abgefragt wurden von Juni bis August 1997 acht bibliographische Datenbanken, die über die Bibliothek der Technischen Universität München erreichbar sind. Diese Datenbanken enthalten Informationen über international erschienene Bücher, Zeitschriftenaufsätze, Konferenzberichte, Serien, Reports, Forschungsberichte, Dissertationen, Monographien und Graue Literatur.

| | Datenbank | Schwerpunkt | Suchsprache | Sammlung | Antworten |
|----|----------------|---------------------------|-------------|-----------|-----------|
| 1. | COMPENDEX | Ingenieurwissenschaft | deutsch | seit 1986 | 2 |
| 2. | DOMA | Maschinenbau | deutsch | seit 1989 | 5 |
| 3. | ICONDA | Bauingenieurwesen | englisch | seit 1976 | 104 |
| 4. | RSWB | Raumordnung, Städtebau | deutsch | seit 1978 | - 3. - |
| 5. | URBADISC | Kommunalpolitik | deutsch | - | 17 |
| 6. | BIOTECHNOLOGIE | | englisch | seit 1984 | 1 |
| 7. | UFORDAT | Umweltforschung | deutsch | seit 1980 | 4 |
| 8. | ULIDAT | Umweltliteratur | deutsch | seit 1980 | 54 |

Tabelle 1: Befragte Datenbanken

Eine umfangreiche Literaturdokumentation zum Abwasserrecycling erstellte das Informationszentrum für Raum und Bau - IRB - der Fraunhofergesellschaft in Stuttgart [1]. Die Grau- und Regenwässer sind die wesentlichen Quellen bei der Wiederverwendung von Abwasser.

Die hausinterne Aufbereitung von leicht verschmutztem Wasser wird in verschiedenen Ländern seit langem praktiziert. Inzwischen sind mehrere tausend Anlagen zur Grauwassernutzung in Betrieb. Führend auf diesem Sektor ist Asien, und hier sind es besonders die Japaner, die eine entsprechende Aufbereitungsanlage in den Hochhäusern teilweise sogar zur Auflage einer Baugenehmigung machen [2]. Durch die Aufbereitung von Grauwasser zu Betriebswasser können 50 - 60 Liter pro Tag und Person im Haushalt eingespart werden. Damit können etwa

Schlußbericht

40% der abgegebenen Trinkwassermengen ersetzt werden. Diese Einsparmöglichkeiten sind jedoch nur mit einer optimierten technischen Anlage erreichbar.

Grauwasseraufbereitung bietet sich für größere Neubauvorhaben an. Bei Planung, Bau und Betrieb muß auf jeden Fall die strikte Trennung von Brauch- und Trinkwassernetz gewährleistet sein.

Besonders interessant sind Grauwasser-Aufbereitungsanlagen für Hotels [3] und zwar unabhängig von der Bettenanzahl [4]. Auf drei Pkw-Stellplätzen kann die Grauwasseraufbereitung von 400 Betten Hotels untergebracht werden. Der Energiebedarf von der Sammlung des Grauwassers bis zur Verteilung des Betriebswassers, wird mit 1,0 bis 1,5 kWh pro m³ angegeben [3]. Zur Grauwasserbeständigkeit sind Untersuchungen mit neuen Kupferwerkstoffen durchgeführt worden [6].

Hygienische Bedenken wurden gegen die Brauchwassernutzung mehrfach ausgesprochen, konnten allerdings bisher nicht bestätigt werden [7]. Einigkeit besteht bereits seit Ende der achtziger Jahre darüber, daß für ein Wasser zur Toilettenspülung im häuslichen Betrieb beziehungsweise zur Nutzung als Betriebswasser sicherlich keine höheren Anforderungen als an Oberflächen- beziehungsweise Badegewässer zu stellen sind [8]. Allerdings erfüllt Grauwasser die Standards der Richtlinie 76/160/EWG [9] nur nach einer Aufbereitung zu Betriebswasser. Ohne Aufbereitung kann Grauwasser nur binnen weniger Stunden für die Toilettenspülung verwendet werden [10]. Dabei zeigt sich, daß das WC-Becken häufiger als sonst gereinigt werden muß [11].

Die Nutzung von Grauwasser wurde seit Mitte der achtziger Jahre als ökonomisch interessant eingestuft. Ab 1988 sind in Deutschland mehrere Forschungsvorhaben zu diesem Thema bearbeitet worden. Professor Dott vom Fachbereich Hygiene des Institutes für Technischen Umweltschutz der Technischen Universität Berlin nahm eine "Hygienisch, mikrobiologische und abwassertechnische Beurteilung verschiedener Aufbereitungsverfahren zur Grauwassernutzung" [12] vor. Professor Kayser erläuterte die "Probleme und Grenzen der Nutzung von Wasch- und Badeabwasser zur WC-Spülung" [13]. Bis 1993 beschäftigten sich weitere Vorhaben [14, 15] mit der Substitution von Trinkwasser durch die Nutzung von Betriebswasser im Haushalt.

Internationale Erfahrungen über die Grauwasserreinigung und Verwendung liegen in Österreich, Nord- und Südamerika, Japan und Australien vor [16].

Berichtet wird von verschiedenen biologischen Verfahren, insbesondere Biofilmreaktoren zur Grauwasseraufbereitung [17], sowie einer Grauwasserdesinfektion und Schaumverminderung mittels Ultraviolett-(UV)Strahlen [18]. Für weit abgelegene Stationen ermöglicht eine Grauwasserdestillation mittels Dampfverdichter geschlossene Wasseraufbereitungssysteme [19].

Bewertungsmaßstäbe beim Abwasserrecycling gibt es bisher nur aus Untersuchungen für die Regenwassernutzung [20]. Aus der Befürchtung, daß über eine erfolgte Toilettenspülung eine atmosphärische Kontamination der Umgebung der Toiletten möglich ist, werden hygienische Mindestanforderungen an die Qualität des Grauwassers formuliert [21]. Verschiedene städtebauliche und ökologische Modellvorhaben [22, 23] wurden in Berlin ausgewertet und

Schlußbericht

fürten 1995 zum Merkblatt "Betriebswassernutzung in Gebäuden" [24]. In diesem Merkblatt heißt es:

Der gesamte Toilettenspülwasserbedarf kann ohne den Zusatz von Chemikalien, ohne erhöhtes hygienisches Risiko sowie ohne Komfortverlust mit vergleichsweise geringen Betriebskosten durch Betriebswasser gedeckt werden.

- Zu den unabdingbaren Voraussetzungen einer risikolosen Betriebswasserversorgung gehört eine sorgfältige Planung, Dimensionierung und Bauausführung der Aufbereitungsanlage und natürlich auch ein verantwortungsbewußter Betreiber.
- Bei der Nutzung in Gebäuden sind ausreichend dimensionierte Aufbereitungsanlagen zur Grauwasserreinigung unverzichtbar. Verschmutzungen wie Haare, Fette und problematische Abwasserfraktionen sind in einer Vorstufe zurückzuhalten. Entnahmestellen, die mit Betriebswasser gespeist werden, müssen gekennzeichnet sein.
- Praktisch bewährt haben sich bisher mehrstufige, biologische Reinigungsanlagen mit Absetz- und Nachkläreinheit sowie einer UV-Desinfektion mit Intensitätsüberwachung.

Bisher gelten für die Nutzung von Betriebswasser in Gebäuden keine rechtlich formulierten Qualitätsanforderungen oder Anforderungen an die Überwachung. Es wird empfohlen, die in der Tabelle 2 aufgeführten Qualitätsziele einzuhalten.

| Qualitätsziele | Beurteilungskriterien / Begründung |
|--|--|
| hygienisch mikrobiologisch einwandfrei | Gesamtcoliforme Bakt.: 0/0,01 ml (<100/ml) Fäkalcoliforme Bakt.: 0/0,1 ml (< 10/ml) P. aeruginosa: 0/1,0 ml (< 1/ml) |
| niedriger BSB ₇ | BSB ₇ unter 5mg/l, um sicherzustellen, daß das Grauwasser weitgehend gereinigt ist. |
| farblos und klar | UV-Transmission _{254 nm in 1 cm Küvette} : mind. 60% |
| möglichst sauerstoffreich | > 50% Sättigung, damit das Betriebswasser lagerfähig ist. |
| nahezu schwebstofffrei, nahezu geruchslos, nicht fäulnisfähig in 5 Tagen | damit Armaturen einwandfrei funktionieren und kein Komfortverlust für den Nutzer eintritt. |

Tabelle 2: Empfohlene Qualitätsziele für die Nutzung von Betriebswasser

Schlußbericht

Diese Qualitätsziele ergeben sich aus der Anlehnung an die EG Richtlinie für Badegewässer und können durch herkömmliche biologische Behandlung erreicht werden. Für die vorgesehene Spülwasseraufbereitung im Flugzeug kommen diese Verfahren jedoch aus folgenden Gründen nicht in Betracht:

- Die gesundheitlichen Gefahren bei der Nutzung von Badegewässern sind weit höher als bei der Toilettenspülung
- Zum Unterschied zu Toiletten in Gebäuden werden im Flugzeug Vakuumtoiletten eingesetzt, die eine Aerosolbildung vermeiden
- Die Standzeit von Grauwasser in der Grauwassereinheit ist bedingt durch die Zwischenspeicherung von nur ca. 2 Liter im Vergleich zu Gebäuden sehr kurz, das Keimwachstum ist im seifenhaltigen Wasser stark gehemmt
- Aus Gewichts- und Platzgründen kann keine aufwendige Aufbereitungsanlage im Flugzeug installiert werden.

Schlußbericht

2 ERGEBNISSE DES VORHABENS

2.1 Definition der Anforderungen

Bereits im Vorfeld der Arbeiten zum Arbeitspaket 6.3 Grauwasseraufbereitung wurde von MAN Technologie eine Rahmenspezifikation auf Grundlage des Anforderungskataloges zum fortschrittlichen Wassersystem von DA Technical Note no. TK614-725/95 ausgearbeitet.

Auf Wunsch der MAN Technologie fand am 15.10.1996 eine Besprechung mit AOA zum Thema „Spezifikation Grauwassersystem“ statt. Die von MAN Technologie ausgearbeitete Spezifikation wurde vorgestellt und mit AOA besprochen. Eine vorläufige Rahmenspezifikation wurde als Ergebnis der Besprechung DA mit der Bitte um Prüfung und Ergänzung überreicht.

Diese Spezifikation war die Grundlage für die Entwicklung der Grauwasseraufbereitungs-Einheit (kurz Grauwassereinheit) bei MT.

Rahmenspezifikation

Das Grauwassersystem ist Teil des Frisch- und Abwassersystems (ATA 38) und muß zum einen die allgemeinen Anforderungen an das System sowie spezifische Anforderungen erfüllen.

Als Basis werden Vorgaben des heutigen Airbus A340 verwendet, falls Daten für den Megaliner noch nicht vorliegen.

1. Allgemeine Anforderungen

- hohe Zuverlässigkeit
- geringes Gewicht
- geringes Installationsvolumen
- geringer Energieverbrauch

Vorschriften:

- ABD 0007 bzw. ABD 0100
- FAR / JAR 25
- USPH [31]

Schlußbericht

2. Zugänglichkeit / Einbauart

Die Grauwassereinheit muß gut zugänglich sein. Sie soll in der Toilettenkabine zwischen dem Waschbecken und der Toilet Assy installiert werden.

Bevorzugter Montageaum besteht unter dem Waschbecken.

| | | |
|-------------------|--------|-----------|
| Verfügbarer Raum: | Höhe | T.B.D. mm |
| | Tiefe | T.B.D. mm |
| | Breite | T.B.D. mm |

3. Rohrleitungen

Die Rohrleitungen des Airbus A340 bestehen aus Stahl. Für den MEGALINER werden Leitungen aus Verbundwerkstoff untersucht. Alle Verbindungen sind mit Schnellverschlüssen auszuführen.

Verbindungselemente zum Frischwasserzulauf: flexibel/ 3/8"

Verbindungselemente zur Toilette: flexibel/ 3/8"

Verbindungselemente zum Vacuum Waste System: fest 1/2"

4. Druck im System

| | bar | psi |
|--|------|------|
| Betriebsdruck | 1,72 | 25 |
| Max. Druck | 2,62 | 38 |
| Minimal erforderlicher Druck an Wasserhähnen | 0,5 | 7,25 |

Tabelle 3: Zulauf vom Frischwasser

Schlußbericht

| | bar | psi |
|---|-------|-----|
| Betriebsdruck | 1,72 | 25 |
| Maximaler Druck | 2,62 | 38 |
| Minimaler Druck (mit ausreichender Reinigung) | 0,76 | 11 |
| Prüfdruck Rohrleitungen/Ventile | 17,24 | 250 |
| Berstdruck Rohrleitungen/Ventile | 25,86 | 375 |

Tabelle 4: Grauwasserzulauf zur Toilette

| | bar | psi |
|--|-------|------|
| Maximaler Druck Entleerungsleitung | -0,54 | -7,8 |
| Minimaler Druck Entleerungsleitung | -0,28 | -4,1 |
| Minimaler Druck Entleerungsleitung (Schwerkraft) | | |

Tabelle 5: Ablauf zum Vacuum Waste System

5. Temperaturen

| | °C | °F |
|------------------------------|---------|--------------|
| kalt | 0 - 20 | 32,0 - 68,0 |
| warm | 54 | 129,2 |
| Betriebstemperatur | 33 - 45 | 91,4 - 113,0 |
| im Fehlerfall | 82 | 179,6 |
| Maximale Drucklufttemperatur | 140 | 284,0 |

Tabelle 6: Zulauf vom Frischwassersystem zum Handwaschbecken

Schlußbericht

| | | °C | °F | bar | psi |
|---------|---------|-----|-------|-----|-----|
| Betrieb | normal | 70 | 158,0 | | |
| Betrieb | maximal | 140 | 284,0 | | |

Tabelle 7: Druckluft aus Bleed Air System

6. Wasserbedarf

| | | |
|---|-----------|------------------|
| Menge pro Toilettenspülung (max.) | 0,2 Liter | bei 25 psi Druck |
| Menge pro Toilettenspülung (max.) | 0,3 Liter | bei 38 psi Druck |
| Max. Anzahl von Spülungen (Kurzzeit) | 5 /min | |
| Max. Anzahl von Spülungen (Long Distance) | 16/h. | |
| Durchschnitt der Anzahl von Spülungen | 8/h | |
| Max. Spüldauer | 1,2 sec | |

Tabelle 8: Wasserbedarf der Verbraucher

7. Desinfizierbarkeit

Das Grauwassersystem muß gegenüber Desinfektionsmitteln resistent sein und es muß so ausgelegt sein, daß eine vollständige Desinfektion gewährleistet ist.

Eine Desinfektion wird ca. 1 mal pro Monat mit einer 50 ppm Desinfektionslösung bei einer Einwirkungsdauer von 4 Stunde oder mit einer 100 ppm Lösung und einer Einwirkungsdauer von 1 Stunde durchgeführt.

Desinfektionsmittel: Chorkalk-Lösung 50 oder 100ppm
 Calciumhypochlorid-Lösung 50 oder 100ppm
 Natriumhypochlorid-Lösung 50 oder 100ppm
 oder H₂O₂.100ppm

Häufigkeit: ca. 1 mal pro Monat

Anschließende Spülung mit Wasser: 1 bis 2 mal nach jeder Desinfektion

Schlußbericht

8. Wartungsintervalle

Der Austausch des Filterelements soll möglichst zeitgleich mit den üblichen Flugzeug-Wartungsintervalle vorgenommen werden.

Übliche Wartungsintervalle eines Flugzeuges:

- Trip Check vor jedem Flug
- Daily Check alle 24 Stunden
- Service Check alle 9 Tage
- A-Check alle 400 Flugstunden
- C-Check alle 15 Monate
- IL-Check alle 66 Monate
- D-Check alle 102 Monate

9. Stromversorgung

Die Systeme müssen für eine der folgenden Spannungen ausgelegt werden (ABD 0013):

- 115 VAC, 400Hz
- 28 VDC

10. Lebensdauer

Die Anforderungen zu „Mean Time Between Failure“ MTBF und „Mean Cycle Between Failure“ MCBF werden später definiert

MTBF = Anzahl der Flugstunden innerhalb eines Zeitraums/ Anzahl der aufgetretenen Fehler

MCBF = Anzahl der Flugzeugstarts innerhalb eines Zeitraums/
Anzahl der aufgetretenen Fehler im Flug und am Boden

Schlußbericht

11. Layout

Bei der Auslegung des Wassersystems ist von folgenden Rahmendaten bezüglich des Kabinenlayout auszugehen:

- bis zu 800 Passagiere auf zwei Decksebenen
- bis zu 20 Küchen auf zwei Decksebenen
- bis zu 20 Toiletten auf zwei Decksebenen

12. Feuerfestigkeit

Nichtmetallische Materialien müssen die Flamability Requirements der FAR 25.853 (b) und der ABD0031 erfüllen.

Schlußbericht

2.2 Konzepterstellung und Konzeptbewertung

2.2.1 Zentrale und dezentralem Systeme

Die Auswahl eines geeigneten Aufbereitungsverfahrens für Grauwasser sowie die Auslegung der Aufbereitungsanlage hängen wesentlich von der Frage einer „zentralen“ oder „dezentralen“ Aufbereitung ab.

Um eine Entscheidung treffen zu können, wurde zunächst ein zentrales und ein dezentrales System mit den wesentlichen Komponenten grob skizziert und gegenübergestellt.

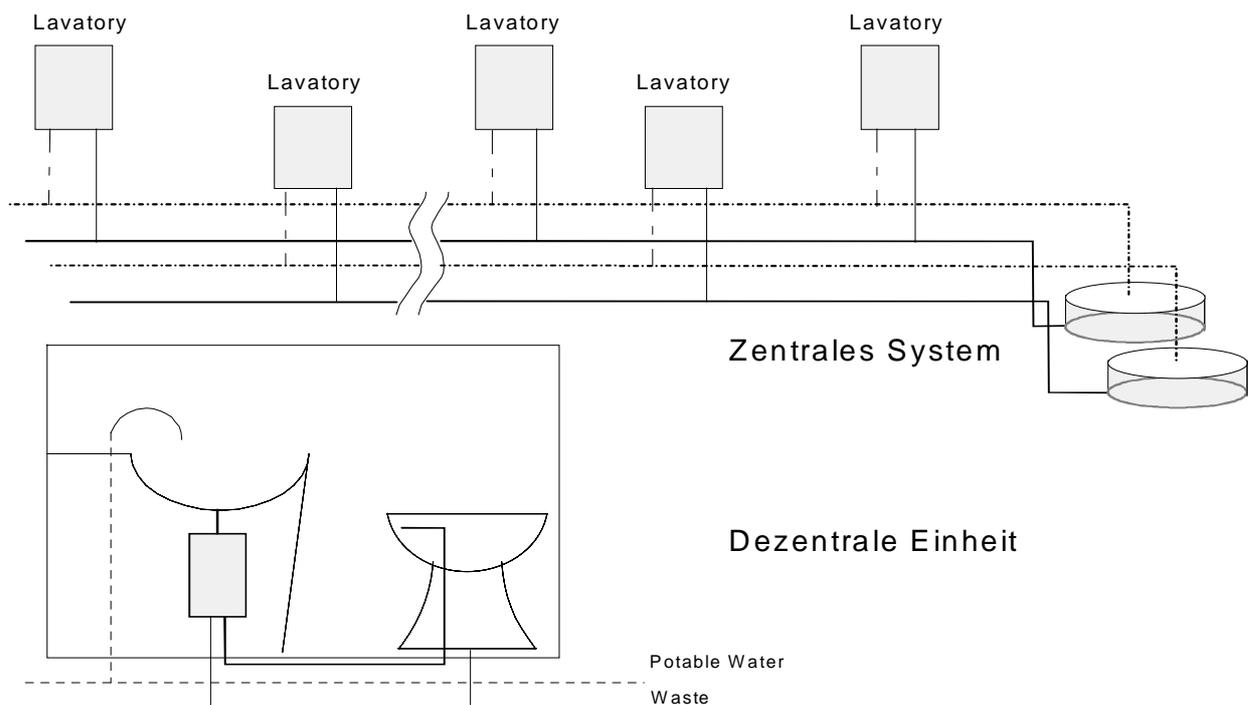


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer zentrale Grauwasseraufbereitung

Ein zentrales System benötigt im Unterschied zum dezentralen System je zwei Sammelleitungen und Versorgungsleitungen pro Deckenebene sowie Stichleitungen zu den Toiletten. Um die Gesamtmasse der Leitungen abschätzen zu können, mußten zunächst Annahmen über die Länge und Querschnitt der Leitungen getroffen werden.

Schlußbericht

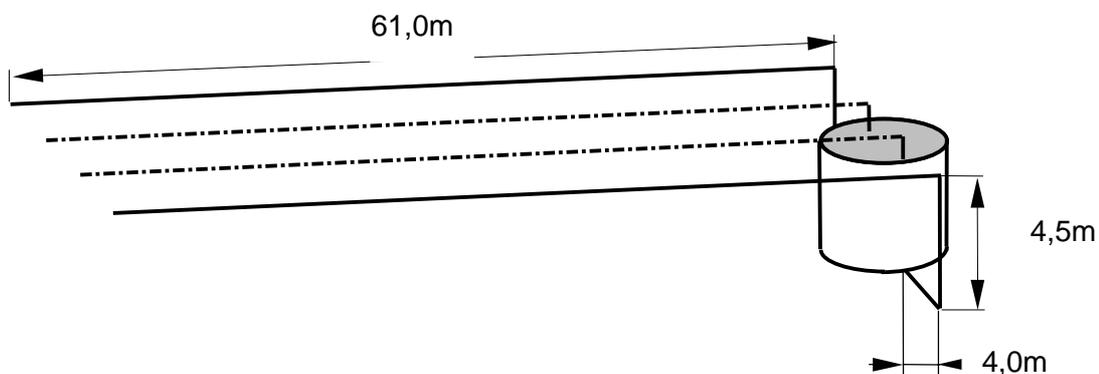


Abbildung 2: Länge der Grauwasserleitungen (Sammel- und Versorgungsleitungen) in einem zentralen System

| Rohrlängen in m | Anzahl der Leitungen | Gesamtlänge in m |
|-----------------|----------------------|------------------|
| 61 | 4 | 244 |
| 4,5 | 4 | 18 |
| 4 | 4 | 16 |
| | | 278 |

Tabelle 9: Versorgungs- und Sammelleitungen ¾"

| Rohrlängen in m | Anzahl der Leitungen | Gesamtlänge in m |
|-----------------|----------------------|------------------|
| 1 | 12 | 12 |
| 2,5 | 18 | 45 |
| | | 57 |

Oberdeck

Hauptdeck

Tabelle 10: Stichleitungen ½"

Schlußbericht

Die Frischwasserleitungen gegenwärtiger AIRBUS Flugzeuge bestehen aus Edelstahl und alternative Verbundwerkstoffe werden innerhalb des Luftfahrtforschungsprogramms mit dem Ziel der Gewichtsreduzierung untersucht. Dagegen werden die Abwasserleitungen aus leichteren aber teuren Titanrohren mit 2" Querschnitt hergestellt.

Grauwasserleitungen könnten in einem zentralen System entweder aus Edelstahl oder aus Titan hergestellt werden.

| | | |
|-----------|------|------------|
| Edelstahl | 3/4" | 0,746 kg/m |
| | 1/2" | 0,260 kg/m |

| | | |
|-------|------|------------|
| Titan | 3/4" | 0,189 kg/m |
| | 1/2" | 0,095 kg/m |

Tabelle 11: Spezifische Masse der Leitungen

| | Ø | Länge | Anzahl | Gesamt- länge | Masse | |
|--------------------|------|---------|--------|------------------|---------------|--------------|
| | | | | | Edelstahl | Titan |
| Leitung | 3/4" | 69,5m | 4 | 278m | 208 kg | 53 kg |
| | 1/2" | 1m/2,5m | 12/18 | 45m | 15 kg | 5 kg |
| Gesamtmasse | | | | | 223 kg | 58 kg |

Tabelle 12: Gesamtmasse der Leitungen ohne Kupplungen

In der folgenden Tabelle ist die geschätzte Masse der Komponenten eines zentralen und eines dezentralen Systems gegenübergestellt.

Schlußbericht

| System | zentral | | dezentral |
|--|---------------|---------------|---------------|
| | Edelstahl | Titan | |
| Masse der Leitungen | 220 kg | 57 kg | 18 × 0,260 kg |
| Zentrale Heizung und Isolation der Leitungen | 27 kg | 27 kg | – |
| Masse der Aufbereitungseinheit | 2 × 15 kg | 2 × 15 kg | 18 × 4,0 kg |
| Gesamtmasse des Systems | 280 kg | 115 kg | 77 kg |

Tabelle 13: Abschätzung der Gesamtmasse eines zentralen Systems

Um die Versorgung der Toiletten schon bei Flugzeugstart sicherzustellen, müssen die Leitungen zunächst mit Frischwasser gefüllt werden. Um 1m einer 3/4" Leitung mit Wasser zu füllen, werden ca. 0,25 l Wasser benötigt. D.h., daß allein zum Füllen der 2 Versorgungsleitungen über 30 l Frischwasser verbraucht werden.

Demgegenüber werden in einem dezentralen System für das Füllen der Einheiten und der kurzen Leitungen max. 1,0 l Wasser/Einheit d.h. insgesamt höchstens. 24 l Wasser verbraucht.

Konzeptbewertung

Wichtige allgemeine Kriterien für die Bewertung von Grauwasseraufbereitungs-Systemen sind:

- hohe Zuverlässigkeit
- geringes Gewicht
- geringes Installationsvolumen
- geringer Energieverbrauch

Die Auswahl eines geeigneten Grauwasser-Aufbereitungsverfahrens hängt von der Festlegung auf ein zentrales oder dezentrales System ab.

Ein zentrales Grauwasseraufbereitungs-System hat gegenüber einem dezentralen System den Vorteil, daß ein höherer Aufbereitungsaufwand und somit eine bessere Qualität des gereinigten Wassers realisierbar sind. So könnten z. B Umkehrosmose-Anlagen und Desinfektionsanlagen in zentralen Systemen integriert werden.

Schlußbericht

Der Wartungsaufwand für zentrale Einheiten könnte bedingt durch die kleinere Komponentenanzahl geringer sein, er hängt jedoch auch stark davon ab, welches Aufbereitungsverfahren eingesetzt wird.

Der Installationsaufwand und Platzbedarf eines zentralen Systems ist jedoch erheblich größer.

Die Option zur Nachrüstung eines Flugzeugs mit einem zentralen Grauwasseraufbereitungs-System ist sehr eingeschränkt.

Ein zentrales Grauwasseraufbereitungs-System hat gegenüber einem dezentralen System vom Standpunkt der Zuverlässigkeit den entscheidenden Nachteil, daß aufgrund der niedrigeren Redundanz im Falle eines Ausfalls einer Komponente, bis zur Hälfte der Toiletten betroffen sind.

Zentrale Systeme sind selbst bei Anwendung leichter aber teurer Titanrohre erheblich schwerer als dezentrale Systeme. In einem dezentralem System mit 15 Toilettenkabinen, darf eine Grauwassereinheit ein Gewicht von bis zu 6,4 kg haben, ohne schwerer zu sein als ein zentrales System mit Leitungen aus Titan.

Da die Nachteile eines zentralen Systems stark überwiegen, wurde in Abstimmung mit DA beschlossen, im Rahmen des Vorhabens dezentrale Einheiten für die Unterbringung in jeder Toilettenkabine zu untersuchen.

2.2.2 Aufbereitungsverfahren

Bei der ausschließlichen Verwendung als Toilettenspülwasser und der vorgesehenen kurzzeitigen Zwischenspeicherung kommt aus Kostengründen nur eine mechanische Abscheidung von Verunreinigungen in Betracht. Dazu zählen Siebe, Filter und Membranen.

Die konventionelle Filtration ermöglicht mittels Sieben einen Rückhalt von Partikeln bis 2 µm. Bei der Mikrofiltration, meist mit Filterpapier oder Filtervlies, beruht der Trenneffekt besonders bei Partikeln unter 1 µm auf Adsorptionserscheinungen. Hier wird der Filtrationsvorgang durch das sekundäre Filterbett bestimmt, daß durch den Niederschlag auf dem Filter entsteht.

Kontrollierte Rückhalteraten weisen Membranfiltermedien auf. Diese bestehen aus dünnen, hochporösen Schichten aus geschäumten sowie gereckten polymeren Verbindungen. Sie ermöglichen bei der Mikrofiltration eine Partikeltrennung im makromolekularen Bereich bis 0,1 µm. Mit der Ultra- beziehungsweise Nanofiltration lassen sich Partikel bis zu 1 nm abtrennen. Hier wird die Separation von Substanzen in der Regel mit dem Molekulargewicht angegeben.

Höchste Anforderungen sind nur von Membranfiltermedien zu erfüllen. Diese können im Durchflußverfahren (cross-flow) oder als Filterpresse (dead end) betrieben werden. Für den Einsatz der Membrantechnik kommen die interne Betriebsweise im Unterdruckverfahren und die externe Betriebsweise als Druckverfahren in Frage [25]. Unterdruckverfahren wurden mit gefilterten Abläufen (Permeat) von 20 bis 50 l/m²h ausgeführt. Sie arbeiten bei einem Unterdruck von 0,1 bis 0,9 bar und einem Energiebedarf von 0,1 bis 1,0 kWh pro m³ Permeat. Im

Schlußbericht

Druckverfahren werden Permeatflüsse zwischen 20 und 500 l/m² durch einen Druckunterschied von 1 bis 10 bar erreicht. Dabei entsteht ein Energiebedarf von 1 bis 7 kWh pro m³ Permeat [25]. Eine vorgeschaltete Siebung zur Grobabscheidung, mit einer Maschenweite zwischen 50 und 500 µm, entlastet die Membrananlage und gewährleistet eine höhere Betriebssicherheit.

Durch die Möglichkeit der Entfernung von Bakterien und Viren ist mit der Membrantechnik eine sehr hohe Ablaufqualität zu erreichen. [25]. Die Effektivität einer Abtrennung ergibt sich aus dem Größenverhältnis der Membranporen zu den abzutrennenden Mikroorganismen.

Bei den abzutrennenden Mikroorganismen ist sowohl die Größe der Keimgruppe (Tabelle 3) als auch ihre Größenvariation in Abhängigkeit der Nährstoffbedingungen zu berücksichtigen. So bedarf die Abtrennung von Bakterien einen Filter mit einem nominalen Porendurchmesser von weniger als 0,1 µm. Gegen Viren muß der Filter um zwei Potenzen kleiner sein.

Untersuchungen [26] an Membranen mit einer maximalen Porengröße vom 0,04 µm zeigten, daß im Abwasserpermeat weder Viren noch Bakterien nachweisbar waren. Mit 0,1 µm Porengröße konnte ein Rückhalt von Viren aus Abwasser über 4 bis 6 Größenordnungen erreicht werden. Zur Hygienisierung kann die Membrantechnik somit anstelle einer UV-Desinfektion oder Chlorung eingesetzt werden.

Die Vorteile der Keimreduktion werden durch die sehr hohen Betriebskosten und den hohen Wartungsaufwand zum Erhalt der Membranleistung und zur Verhinderung von Fouling gemindert [26]. Zudem führen Schäden an den Dichtungen zwischen Membran und Modulkörper zu Quellen einer Wiederverkeimung des Filtrates.

Die als Biofouling bezeichneten unerwünschten biologischen Prozesse führen zu einem Kapazitätsrückgang und oft zu einem mikrobiellen Abbau der Werkstoffe. Auf der Membran bildet sich ein Biofilm, der die Leistungsfähigkeit der Membran vermindert. Sogar bei der Membranversorgung mit Rohwasser ist der Biofilm nach einem Tag flächendeckend mehr als 5 µm dick.

Diese Deckschicht besteht aus Mikroorganismen, extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) und anorganischem/organischem Material [27]. Der Durchtrittswiderstand der sich ausbildenden Schicht wird in den meisten Anwendungsfällen so groß, daß dem gegenüber der Strömungswiderstand der Membran vernachlässigt werden kann [26]. In den Membransystemen zur Behandlung von Abwasser kann es durch das Fouling zu einer drastischen Verringerung der Membrandurchlässigkeit kommen. Mögliche Reinigungsmaßnahmen führen nur sehr kurzfristig zu Leistungsverbesserungen.

Gereinigt wird mit chemischen Stoffen, zum Beispiel Hypochlorit, H₂O₂, alkalischen Mitteln, Tensiden und Enzymen, die zu einer Schwächung des Biofilms führen, mit einer anschließenden mechanischen Entfernung der Deckschicht, zum Beispiel durch Spülen mit Wasser oder Luft beziehungsweise durch Ultraschall. Eine Reinigung gelingt jedoch nicht immer, da auch irreversible Fouling-Prozesse auftreten können.

Auch die Reinigungsmittel sind so zu wählen, daß sie nicht zur Bildung eines irreversiblen Belages führen. Genannt sind in diesem Zusammenhang einige kationische und nichtionische

Schlußbericht

Tenside und Formaldehyd. Das Abtöten von Mikroorganismen allein verhindert nicht die Entstehung von Biofilmen [27]. Im allgemeinen ist die Dauerdosierung von Bioziden üblich um Biofouling-Probleme zu beherrschen. Damit geht ein wirtschaftlicher Vorteil von Membranverfahren verloren.

Für die Spülung der Toiletten mit frischem Waschwasser ist eine Feinsiebung zur Aufbereitung ausreichend. Wesentliches Aufbereitungsziel ist die Vermeidung von Verstopfung in den Spüldüsen. Die Auswahl des Filtermaterials richtet sich nach der maximalen Standzeit und guter Wiederverwendbarkeit.

Nicht wiederverwendbar sind Wirrfaservliese (bis 1 µm nominal), die als Tiefenfilter verblocken und deren Reinigung zu aufwendig wird. Kunststoffgewebe werden möglicherweise von Bakterien angegriffen und unterliegen beim Reinigen einem hohen Verschleiß.

Drahtgewebe (ab 10µm) bieten durch die Möglichkeit der einfachen Reinigung und mehrfachen Einsetzbarkeit Vorteile.

Die Nachteile einer häufigen Demontage der Filtereinheit zur Entnahme des Filtermediums sind bei selbstreinigenden Filtern nicht vorhanden. Diese benötigen allerdings eine ausreichende Energiezufuhr und einen Vorrat an Klarwasser für einen Spülstoß mit Wasser oder Druckluft.

Als selbstreinigende Filter sind Tellerfilter (bis 25 µm) hervorzuheben die die Vorteile der Tiefenfiltration nutzen und mit einer besonderen Rückspülmethode funktionieren, bei der sich die Elemente durch Rotation beim Spülstoß reinigen oder auch Kantenspaltfilter (bis 50 µm), bei denen die Verunreinigungen rein mechanisch abgeschabt werden.

Schlußbericht

2.3 Systemdefinition

2.3.1 Definition der Funktionen

Zentrale Funktionen eines Grauwasseraufbereitungs-Moduls (Grey Water Reuse Module) GWM sind :

- die Aufbereitung von Händewaschwasser
- die Zwischenspeicherung des Wassers
- und der Transport des Wassers zur Toilette

Aus den Anforderungen:

- Sicherstellung der Verfügbarkeit von Wasser für die Toilettenspülung während der gesamten Missionszeit des Flugzeugs oder kurz :“ keine Trockenspülung“ und
- Abführung von überschüssigem Grauwasser in das Vacuum Waste System

ergibt sich die Notwendigkeit der Anbindung der Grauwasseraufbereitungs-Module in jeder Toilettenkabine an das Frischwassersystem und an das Vakuum Abwassersystem mit den dazugehörigen Funktionen:

- „Prefill“ d.h. Bereitstellung von Frischwasser, wenn kein aufbereitetes Grauwasser verfügbar ist
- „Sink“ d.h. Absenken des Wasserspiegels zum Schutz vor Überlaufen der Einheit

Um bei längeren Bodenzeiten in kalten Regionen eine Beschädigung des Systems zu verhindern, muß auch das Grauwasseraufbereitungs-System komplett drainiert werden können.

Außerdem ist eine vollständige Systemdrainage bei der regelmäßigen Durchführung der Frischwassersystem-Desinkektion erforderlich, wenn gleichzeitig auch das Grauwasseraufbereitungs-System desinfiziert werden soll.

Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Funktion: „Drain“ d.h. vollständige Entleerung des GWM.

Die übergeordnete Funktion der Steuerung der genannten Aufgaben übernimmt eine „Kontrolleinheit“ GCU (Grey Water Control Unit).

Schlußbericht

2.3.2 Definition der Komponenten

Ein dezentrales Grauwasseraufbereitungs-Modul (GWM) besteht aus folgenden Komponenten:

- Grauwasseraufbereitungs-Einheit (GWU) mit:
 - Grauwasserkammer
 - Füllstandsensoren
 - Filter
 - Belüftungsöffnung
- Prefill Ventil
- Drain Ventil
- Wasser Pumpe
- Kontrolleinheit GCU

Die Konzepte zu diesen Komponenten werden im folgenden ausführlich beschrieben.

2.3.3 Grauwasseraufbereitungs-Einheit (GWU)

Die Grauwasseraufbereitungs-Einheit im folgenden kurz Grauwassereinheit genannt, erfüllt folgende Funktionen:

- Zwischenspeicherung des anfallenden Grauwassers
- Aufbereitung des Grauwassers
- Speicherung des aufbereiteten Grauwassers

Die Einheit hat Schnittstellen zum Frischwassersystem, zum Abwassersystem und zum Kontrollsystem.

Für die Aufbereitung des Grauwassers kommen wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, die Aufbereitungsverfahren Filtration und Desinfektion in Frage.

Der Grauwasserfilter kann, wie in Haushaltsinstallationen üblich, auch außerhalb der Speichereinheit eingebaut werden. Um jedoch eine möglichst große Filterfläche und damit eine

Schlußbericht

lange Standzeit des Filters zu erreichen, wurden Bauweisen mit integriertem Filter bei der Auslegung der Einheit bevorzugt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei verschiedene Grauwassereinheiten entwickelt, gebaut und getestet. Die erste Einheit (Unit 1) hat einen zylindrischen Filter und die zweite Einheit (Unit 2) besitzt einen horizontalen Scheibenfilter.

Grauwasseraufbereitungseinheit mit zylindrischem Filter: Unit 1

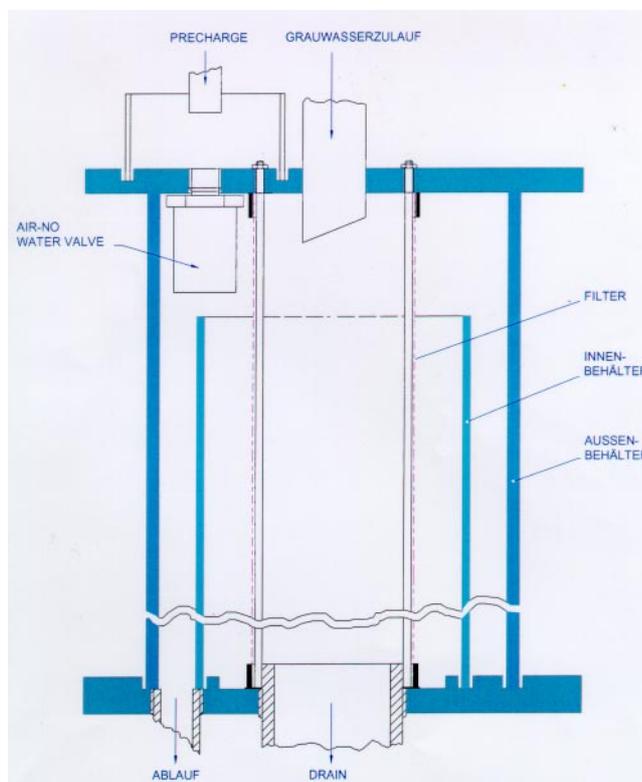


Abbildung 3: Grauwasseraufbereitungs-Einheit Unit 1 mit zylindrischem Filter

Das Grauwasser fließt vom Handwaschbecken über den zentralen Zulauf im oberen Teil der Einheit in den zylindrischen Filter und passiert den Filter von innen nach außen.

Um einen Druckausgleich in der Einheit mit dem Umgebungsdruck in der Kabine zu ermöglichen, ist im oberen Teil der Einheit ein „Air No Water Valve“ installiert, welches ein Überlaufen oder Überschwappen der Einheit verhindert. Diese Kammeröffnung wird gleichzeitig für den Frischwasserzulauf über das Prefill Ventil genutzt.

Schlußbericht

Am Boden der Einheit befindet sich außerhalb des Filters der Grauwasser Ablauf für filtriertes Wasser, das bei Bedarf über die Pumpe zur Toilette transportiert wird.

Innerhalb des zylindrischen Filters befindet sich ebenfalls am Boden der Einheit der Ablauf zum Drain Ventil welches die Einheit mit dem Vakuum Waste System verbindet.

Die Anordnung von Prefill Zulauf und Drain Ablauf ermöglicht die Rückspülung des Filters mit Frischwasser. Dadurch kann die Standzeit des Filters erheblich verlängert werden und der Filter kann in Notsituationen durch Rückspülung wieder durchgängig gemacht werden.

Eine zusätzlich getestete Variante der Grauwassereinheit mit zylindrischem Filter enthält einen Innenzylinder der wie die Einheit aus durchsichtigem Plexiglas gefertigt wurde.

Der Innenzylinder unterteilt die Grauwassereinheit in eine innere und eine äußere Kammer. Die Höhe des Innenzylinders wurde so gewählt, daß filtriertes Grauwasser von der inneren Kammer in die äußere Kammer fließt noch ehe der obere Füllstandssensor (High Level Sensor) erreicht wird. Erst wenn auch die äußere Kammer mit Wasser gefüllt ist, steigt der Wasserspiegel in der Einheit bis zum oberen Sensor und löst einen Sink-Zyklus aus.

Diese Bauweise stellt sicher, daß die Grauwassereinheit auch nach Öffnen des Drain Ventils noch einen Wasservorrat für eine oder mehrere Toilettenspülungen in der äußeren Kammer enthält. Die Öffnungszeit des Drain Ventils kann bei dieser Bauweise länger sein oder der Öffnungsquerschnitt des Ventils kann größer sein, ohne daß nach dem Öffnen des Drain Ventils Frischwasser aufgefüllt werden muß.

Andererseits kann die Einheit bei dieser Bauweise nur noch mit Hilfe der Pumpe zur Toilette vollständig drainiert werden.

Unit 1 Dimensionen

| | |
|--------------------------------|----------------|
| Außendurchmesser | 150 mm |
| Innendurchmesser | 139 mm |
| Außendurchmesser Innenzylinder | 110 mm |
| Innendurchmesser Innenzylinder | 104 mm |
| Filterdurchmesser | 70 mm |
| Grundplatte | 200x200x15 mm |
| Deckplatte | 200x200x10 mm |
| Drain Anschluß | 1" |
| Frischwasserzulauf (Zylinder) | Ø 64x60xH30 mm |
| Zulauf | 3/8" |

Schlußbericht

Grauwasseraufbereitungseinheit mit Scheibenfilter: Unit 2

In der Grauwassereinheit 2 (Unit 2) mit horizontal eingebautem Scheibenfilter befindet sich der Grauwasserzulauf unterhalb des Filters, d.h. der Filter wird von unten nach oben durchströmt.

Oberhalb des Filters liegt der Grauwasserablauf zur Pumpe für filtriertes Wasser.

Am tiefsten Punkt der Einheit kann überschüssiges Grauwasser über Drain Ablauf und Drain Ventil in das Vakuum System abgeleitet werden. Dabei wird der Filter zwangsläufig rückgespült.

Der Frischwasserzulauf befindet sich in der oberen Abdeckplatte der Einheit.

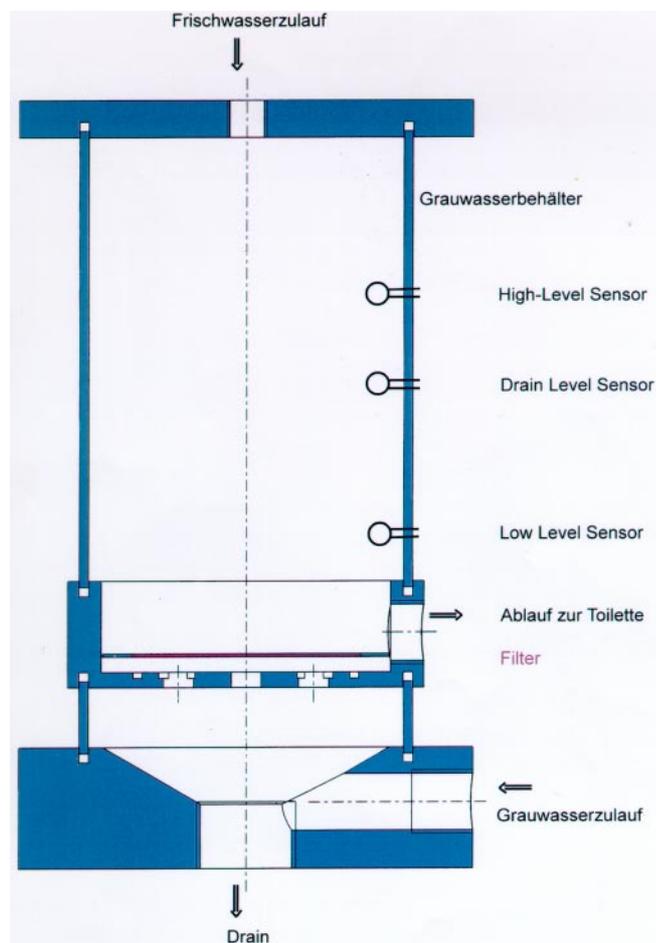


Abbildung 4: Grauwasseraufbereitungs-Einheit Unit 2 mit scheibenförmigem Filter

Schlußbericht

Unit 2 Dimensionen

| | |
|--------------------|-------------|
| Außendurchmesser | 110,4 mm |
| Innendurchmesser | 104,5mm |
| Filterdurchmesser | 70 mm |
| Grundplatte | Ø118x35 |
| Deckplatte | Ø150xH12 mm |
| Zwischenstück | Ø118xH35 mm |
| Frischwasserzulauf | ¼" |
| Grauwasserablauf | ½" |
| Drain Anschluß | 1" |
| Grauwasserzulauf | ½" |

2.3.4 Füllstandsensoren

Drei konduktive Füllstandsensoren werden in die Einheit an unterer, mittlerer und oberer Position eingebaut. Sie werden ihrer Position entsprechend genannt:

- Low Level Sensor
- Mid Level Sensor und
- High Level Sensor

Die für das konduktive Meßprinzip notwendige Elektronik ist in der Steuerungseinheit (Grey Water Control Unit GCU) integriert.

Aus experimentellen Gründen wurden in den ersten Einheiten Metallstäbe über die Abdeckung der Einheit als Sensoren eingesetzt. Dies hatte den Vorteil, daß die Position der Sensoren sehr einfach zu verstellen war. Es ist jedoch geplant nach Festlegung der Sensorposition die konduktiven Sensoren fest in die Einheit zu integrieren.

Schlußbericht

2.3.5 Prefill Ventil

Eine Anbindung der Grauwasseraufbereitungs-Einheit an das Frischwassersystem ist notwendig um Trockenspülungen auszuschließen. Bei Start des Flugzeugs steht noch kein aufbereitetes Grauwasser zur Verfügung und in seltenen Fällen kann es auch während des Fluges vorkommen, daß mehr Wasser für die Toilettenspülung verbraucht wird, als im Handwaschbecken anfällt.

Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten den Frischwasserzulauf zur Grauwassereinheit zu realisieren:

- Zulauf über das Handwaschbecken
- Getrennter Zulauf in die Grauwasseraufbereitungs-Einheit

| Variante | Zulauf über das Handwaschbecken | Zulauf in die Grauwasseraufbereitungs-Einheit |
|-----------|--|---|
| Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Keine zusätzliche Komponente – Kein Platzbedarf – Kein zusätzliches Gewicht – USPH Forderung ist erfüllt | <ul style="list-style-type: none"> – Unabhängige Ansteuerung – Einfache Nachrüstbarkeit – Akzeptanz der Passagiere |
| Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Wasserhähne müssen elektronisch ansteuerbar sein – Irritation der Passagiere; Wasser fließt in das Waschbecken ohne daß der Wasserhahn betätigt wurde | <ul style="list-style-type: none"> – Zusätzliche Komponente – Platzbedarf |

Tabelle 14: Frischwasserzulauf zur Grauwasseraufbereitungs-Einheit; Varianten

Die Variante „Zulauf über das Handwaschbecken“ wurde nicht weiter verfolgt, da eine Irritation der Passagiere durch „unkontrolliert“ laufendes Wasser in das Handwaschbecken nicht annehmbar ist.

Bei Anschluß des Frischwassersystems an das Grauwasseraufbereitungs-System sind die US Public Health Requirements (USPH-Requirements) zu beachten. Die Systeme sind so auszulegen, daß durch Systemfunktionen das Frischwasser nicht verunreinigt werden kann.

Schlußbericht

Auswahl der Sicherungseinrichtungen bzw. -armaturen

Es gibt laut DIN 1988, Teil 4 Ausgabe 1998, „Schutz des Trinkwassers, Erhaltung der Trinkwassergüte“ 10 verschiedene Sicherungseinrichtungen bzw.-Armaturen die im Folgenden mit abnehmenden Sicherungsgrad aufgeführt sind:

1. Freier Auslauf
2. Rohrunterbrecher Bauform A1 ohne beweglichem Teil
3. Rohrtrenner Einbauart 3
4. Rohrunterbrecher Bauform A2 mit beweglichem Teil
5. Rohrtrenner Einbauart 2
6. Rohrschleife
7. Rohrtrenner Einbauart 1
8. Sicherungskombination
9. Rückflußverhinderer
10. Rohrbelüfter Bauformen C,D,E

Unter einem „freien Auslauf“ versteht man eine Sicherungseinrichtung, bei der über eine freie Fallstrecke mit einem Sicherheitsabstand von $H \geq 2d$ (d = Rohrdurchmesser), mindestens jedoch 20 mm, das Trinkwasser übertragen wird.

Der Rohrunterbrecher Bauform A1 ist eine Armatur, die nur in senkrechten Leitungen eingebaut werden darf. Die Einbauhöhe H muß mindestens 150 mm über dem höchstmöglichen Wasserstand sein.

Freier Auslauf und Rohrunterbrecher Bauform A1 stellen den höchstmöglichen Grad aller denkbaren Sicherungsmaßnahmen dar. Sie sind die einzigen Maßnahmen die für den Schutz vor Erregern übertragbarer Krankheiten und giftiger Stoffe laut DIN 1988 zugelassen sind.

Da nicht ausgeschlossen werden kann, daß Grauwasser aus den Handwaschbecken mit krankheitserregenden Mikroorganismen kontaminiert ist, kommen für die Systemauslegung nur diese zwei Sicherungsmaßnahmen in Betracht gezogen.

Der „freie Auslauf“ erfordert ein großes Einbauvolumen, daher wurde die Anwendbarkeit von Rohrunterbrechern Bauform A1 weiterverfolgt.

Die Anforderungen an Armaturen die eine Verbindung vom Trinkwassersystem zu einem Wassersystem mit verunreinigtem Wasser herstellen, sind in der Deutschen Norm DIN 3266 Teil 1 und 2 festgelegt.

Allgemeine Richtlinien der amerikanischen Zulassungsbehörde „Food and Drug Administration“ für Toilettensysteme in Flugzeugen sind im „Handbook on Sanitation of Airlines“ sowie im „Guidelines for Sanitary Construction of Aircrafts Galleys and Galley Components“ enthalten. Die entsprechende Norm zur DIN 3266 ist die ASSE (American Society of Sanitary Engineering) Standard No. 1001 „Pipe Applied Atmospheric Type Vacuum Breakers“

Schlußbericht

2.3.6 Drain Ventil

Das Drain Ventil stellt die Verbindung zwischen Grauwasseraufbereitungs-Einheit und Vakuum Waste System her. Überschüssiges Grauwasser aber auch mögliche grobe Verunreinigungen wie Knöpfe, Glassplitter, Papierreste, u.s.w. werden über das Drain Ventil in das Abwassersystem abgeleitet. Da die Öffnungen des Ablaufs im Handwaschbecken einen Durchmesser von 6 mm haben, ist jedoch nicht mit wesentlich größeren Verunreinigungen in der Grauwasseraufbereitungs-Einheit zu rechnen.

Die Auswahl und Entwicklung eines geeigneten Drain Ventils gehört zu den Arbeitspaketen von AOA. Um jedoch die Grauwasseraufbereitungs-Einheiten in einem Teststand untersuchen zu können, wurde von MAN Technologie unterhalb der Grauwasser-Einheiten ein motorgetriebenes Schieberventil mit einer ½“ Öffnung installiert.

2.3.7 Wasser Pumpe

Für den Transport von aufbereitetem Grauwasser zur Toilette kommen folgende Konzepte in Betracht:

- Bleed Air in einem bedrückten Grauwassersystem
- Vakuum aus dem Waste System
- Transport über eine ansteuerbare Wasserpumpe

Eine Versorgung der Grauwassereinheiten mit Bleed Air wurde ausgeschlossen, da für zukünftige Flugzeuge die Forderung nach möglichst niedrigem Bleed Air Verbrauch besteht und die Anbindung jeder Toilette an das Zapflutleitungssystem technisch aufwendig ist.

Die Nutzung des Vakuums im Waste System für den Wassertransport in die Toilette setzt voraus, daß die Toilettenspülung nur bei geschlossenem Deckel funktioniert. Die Umstellung auf Grauwassernutzung hätte daher auch erhebliche Konsequenzen auf die Bauweise der Toilette. Aus diesen Gründen wurde diese Variante nicht weiter verfolgt.

Die Integration einer Wasserpumpe in das Grauwasseraufbereitungs-System bietet den Vorteil, daß das teure und reparaturanfällige „Rinse Valve“ entfallen kann.

Die Entwicklung einer geeigneten Wasserpumpe für den Transport von aufbereitetem Grauwasser zur Toilette ist ein Arbeitsanteil von AOA und wird von MT im Rahmen von LuFo1 nicht weiter verfolgt..

Schlußbericht

2.3.8 Kontrolleinheit (GWC)

Die Grauwasser Kontrolleinheit GWC erfaßt die Signale der Füllstandsensoren und steuert entsprechend das Öffnen und Schließen des Prefill- und des Drain Ventils:

- wird vom Low Level Sensor kein Wasser detektiert, wird ein Prefill Zyklus ausgelöst
- wird vom High Level Sensor Wasser detektiert, so wird ein Sink Zyklus ausgelöst
- wird der „Drain Schalter“ aktiviert, so wird ein Drain Zyklus durchgeführt

Die Kontrolleinheit übernimmt die Steuerung folgender Betriebszyklen:

Prefill Zyklus

Aufgrund der Füllstandsüberwachung öffnet das Prefill Ventil bis der Wasserstand den Low Level Sensor erreicht. Der „Low Level Sensor“ wird so plziert, daß immer ausreichend Wasser für mindestens eine Toilettenspülung (200 ml) verfügbar ist.

Sink Zyklus

Ist der obere Füllstand des „High Level Sensor“ erreicht, so öffnet das Drain Ventil. Sowohl filtriertes als auch unfiltriertes Grauwasser wird in das Vakuum System abgeleitet. Das Drain Ventil schließt sobald der Wasserstand in der Einheit unterhalb des „Mid Level Sensors“ abgesunken ist. Alternativ schließt das Ventil nach einer festgelegten Zeit.

Während des Sink Zyklus wird der Filter automatisch rückgespült, was dazu führt, daß die Standzeit des Filters erheblich verlängert. Gleichzeitig werden Verunreinigungen die den Filter nicht passieren können und sich über dem Drain Ventil absetzen, ebenso wie Schwebstoffe in das Abwassersystem abgeleitet.

System Drainage

Sowohl die Grauwassereinheit als auch die Grauwasserleitungen die zu der Einheit und von der Einheit weg führen, werden über das Drain Ventil vollständig entleert.

Anmerkung: Dies setzt jedoch voraus, daß die Grauwasserpumpe zwischen Toilette und Einheit nicht dicht schließt.

Steuerung des Prefill Zyklus

Das Prefill Ventil öffnet, wenn der Low Level Sensor kein Wasser erfaßt und schließt sobald der Wasserstand den Sensor erreicht oder nach einer festgelegten Zeit.

Schlußbericht

Steuerung des Sink Zyklus

Wenn der High Level Sensor Wasser detektiert wird ein Sink Zyklus durchgeführt:

- der Vakuum Generator wird aktiviert
- die Nachricht „Flush Request“ wird an den Vacuum System Controller VSC übermittelt
- nach 1,5 sec. Wird das Drain Ventil geöffnet
- sobald der Mid Level Sensor kein Wasser detektiert wird das Drain Ventil geschlossen
- nach 15 sec. Wird der VSC deaktiviert

Ein Sink Zyklus wird nicht durchgeführt wenn die Grauwasseraufbereitungs-Einheit durch den VSC inaktiviert ist.

Kontrolle der System Drainage

Wird der Drain Schalter aktiviert, so wird das gesamte Grauwasser in das Abwassersystem abgeleitet:

- der Vacuum Generator wird aktiviert
- die Nachricht „Flush Request“ wird an den Vacuum System Controller VSC übermittelt
- nach 1,5 sec. wird das Drain Ventil geöffnet
- 10 sec, nachdem der Low Level Sensor kein Wasser detektiert, wird das Drain Ventil geschlossen
- 5 sec. Nachdem das Drain Ventil geschlossen hat, wird der Vacuum Generator deaktiviert (VSC-Funktion)
- nach der System Drainage ist die Funktion „Prefill“ bis zum nächsten Einschalten aufgehoben.

Ein Drain Zyklus wird nicht durchgeführt, wenn die Grauwasseraufbereitungs-Einheit durch den VSC inaktiviert ist.

Da die Kontrollfunktionen der Grauwasseraufbereitungs-Einheit und der Toilettenspülung eng miteinander verknüpft sind und die heutige FCU ebenfalls eine dezentrale Kontrolleinheit in jeder Toilettenkabine ist, ist es sinnvoll diese Kontrollfunktionen in einer Grey Water Flush Control Unit GFC zu integrieren. Dies hat folgende Vorteile:

- geringerer Platzbedarf

Schlußbericht

- geringeres Gewicht und
- vor allem geringere Kosten.

2.4 Herstellung der Technologieträger

Um verschiedene Grauwasseraufbereitungs-Einheiten testen zu können, werden große Mengen Grauwasser in möglichst realitätsnaher Qualität benötigt. In gegenwärtigen Flugzeugen wird das Grauwasser während des Fluges über Drain Masts entsorgt. Es ist daher - anders als bei Frischwasser und Abwasser- nicht möglich am Ende eines Fluges Wasserproben zu ziehen und zu analysieren. Analysenergebnisse von Grauwasser aus Flugzeugen sind in der Literatur nicht bekannt und konnten auch nicht bei den Airlines oder Flugzeugherstellern abgefragt werden.

Der ursprüngliche Plan, Grauwasser während Langstreckenflügen in einem Airbus A340 aufzufangen, zu analysieren und anschließend „synthetisch“ d. h. im Labor herzustellen konnte nicht umgesetzt werden. Während eines Langstreckenfluges von ca. 12 Stunden fallen in einer Toilettenkabine ca. 60 Liter Händewaschwasser an. Ein Behälter dieser Größe kann in einer Toilettenkabine nicht untergebracht werden. Die Installation eines zentralen Grauwassertanks im Frachtraum des Flugzeugs war aus Kostengründen ebenfalls nicht möglich. Aus diesen Gründen wurde ein Teststand zur Herstellung von Grauwasser aufgebaut (Abbildung 5).

2.4.1 Herstellung von Grauwasser

Ein Handwaschbecken mit Wasserarmatur aus einem Airbus Flugzeug wurde unmittelbar neben den Toilettenräumen in einem Gebäude der MT fest an das Gebäudewassernetz angeschlossen (Abbildung 5) Unter dem Handwaschbecken wurde ein 40 Liter Behälter zum Auffangen des Händewaschwassers angeschlossen.

Die Wassermenge und Laufzeit des Wasserhahns pro Hebeldruck sind einstellbar.

Schlußbericht



Abbildung 5: Teststand zur Herstellung von Grauwasser

2.4.2 Teststand zur Grauwasseraufbereitung

Um Grauwasseraufbereitungs-Einheiten mit verschiedenen Filtern testen zu können, wurde ein erster Teststand (Abbildung 6) mit den in Tabelle 15 aufgelisteten Komponenten aufgebaut:

Schlußbericht



Abbildung 6: Grauwasseraufbereitungsteststand 1

In Abbildung 8 ist der Grauwasserteststand mit den wichtigsten Komponenten schematisch dargestellt.

Schlußbericht

| Nr. | Benennung | Bemerkungen |
|-----------|---|---|
| 1. | Grauwasserspeicher | |
| 1.1 | Vorratsbehälter 60 l Faß | aus PE mit Auslaufstutzen |
| 1.2 | Aufständerung | min. Höhe 175 cm |
| 1.3 | Schlauch ½“ (vom Faß zum Dosierventil) | |
| 2. | Händewasserdosierung | |
| 2.1 | Dosierventil | Magnetventil elektr. Ansteuerbar 1“ Anschluß |
| 2.3 | Schlauch 1“ | |
| 2.4 | Grauwasser-Zwischenspeicher | 350 ml aus Plexiglas |
| 2.5 | Grauwasserablaufventil | Magnetventil elektr. Ansteuerbar 1“ Anschluß |
| 3. | Grauwassereinheit | |
| 3.1 | MAN-Grauwassereinheit Unit 1 oder 2 | |
| 3.2 | Air No Water Valve bzw. Rohrunterbrecher | mit 8 mm Öffnung |
| 3.3 | Filtereinsätze | |
| 4. | Frischwasserzufuhr | |
| 4.1 | Kugelhahnventil (Frischwasser) | handbetätigt ½“ Anschluß |
| 4.2 | Schlauch vom Wasseranschluß | ½“ |
| 4.3 | Prefill Ventil | elektr. ansteuerbares Magnetventil |
| 4.3 | Schlauch zur Grauwassereinheit | ¼“ |
| 5. | Drain Ventil | |
| 5.1 | Drain-Ventil | Schieberventil elektr. ansteuerbar 1“ Öffnungsquerschnitt 2“ - Anschluß |
| 6. | Wasser Pumpe | |
| 6.1 | Pumpe | vorhanden |
| 6.2 | Schlauch (Von Filter zur Pumpe) | ½“ |
| 6.3 | Schlauch (Von Pumpe zum Spray Ring) | ½“ |
| 6.4 | Anschlußnippel an Spray Ring | |
| 7. | Toilette | |
| 7.1 | Toilette Assy (Originalbauteil) | |
| 7.2 | Spray Ring (Originalbauteil) | |
| 8. | Elektronik und Steuerung | |
| 8.1 | Elektrische Versorgung (Pumpe) | DC 24 V/ 20A |
| 8.2 | 3 Füllstandsensoren | Konduktives Meßprinzip |
| 8.3 | Wash Basin Controller | mit Anschluß an PC |
| 8.4 | Grey Water Toilet Controller | mit Anschluß an PC |
| 8.5 | PC | |

Tabelle 15: Grauwasserteststand 1; Komponenten

Schlußbericht

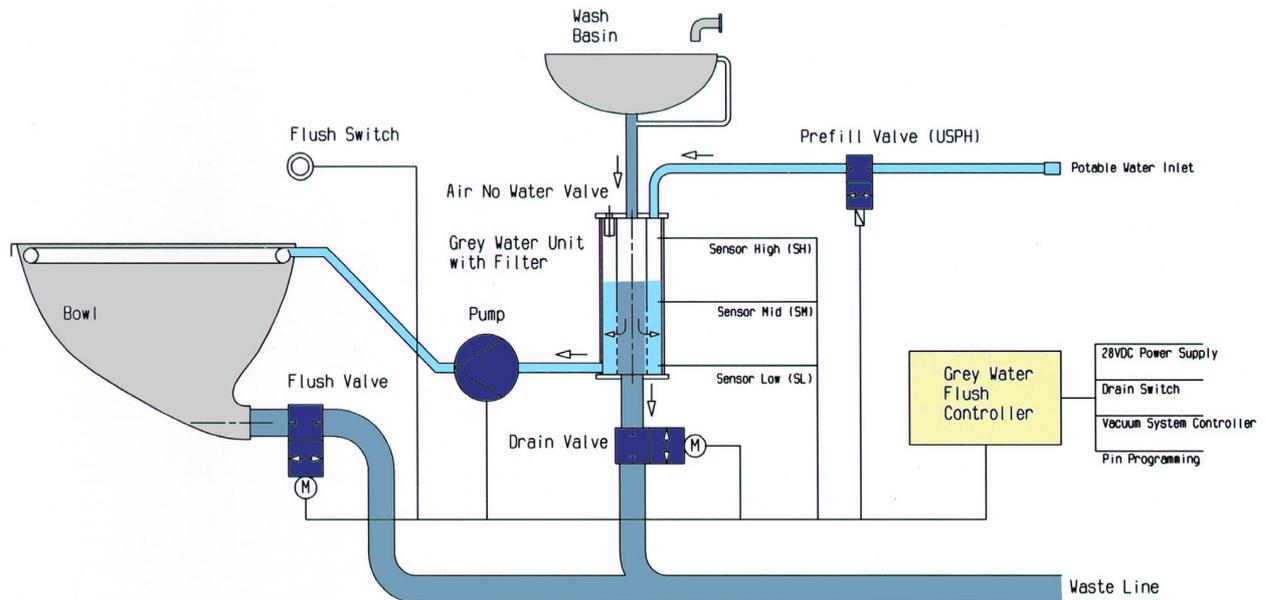


Abbildung 7: Grauwasserteststand, schematische Darstellung

Der Teststand konnte mit Hilfe eines am PC installierten Steuerungsprogramms, das von MAN Technologie eigens für die Durchführung von Langzeittests erstellt wurde, gesteuert werden. Die Funktionen „Flush Zyklus“ und „Drain Zyklus“ konnten darüber hinaus auch per Knopfdruck ausgelöst werden.

Nach Abschluß der ersten Versuchsreihen wurde beschlossen, den Teststand weiter auszubauen. Ein Vakuum Abwassersystem, bestehend aus einem Abwassertank und einer Vakuumpumpe wurden an die Grauwassereinheit und an die Toilette angeschlossen und die Komponenten der Toilettenkabine wurden in einer abgeschlossenen Kabine installiert. Dies hatte folgende Vorteile:

- durch den Anschluß an das Vakuumsystem konnte die Grauwassereinheit mit Vakuum rückgespült werden,
- die Toilettenspülung mit aufbereitetem Grauwasser und Vakuum wurde simuliert,
- die Aerosolbildung über der Toilette während einer Spülung konnte gemessen werden.
- die Drainage des Grauwasser Moduls konnte untersucht werden,

Der ausgebaute Grauwasserteststand 2 ist in Abbildung 8 dargestellt.

Schlußbericht

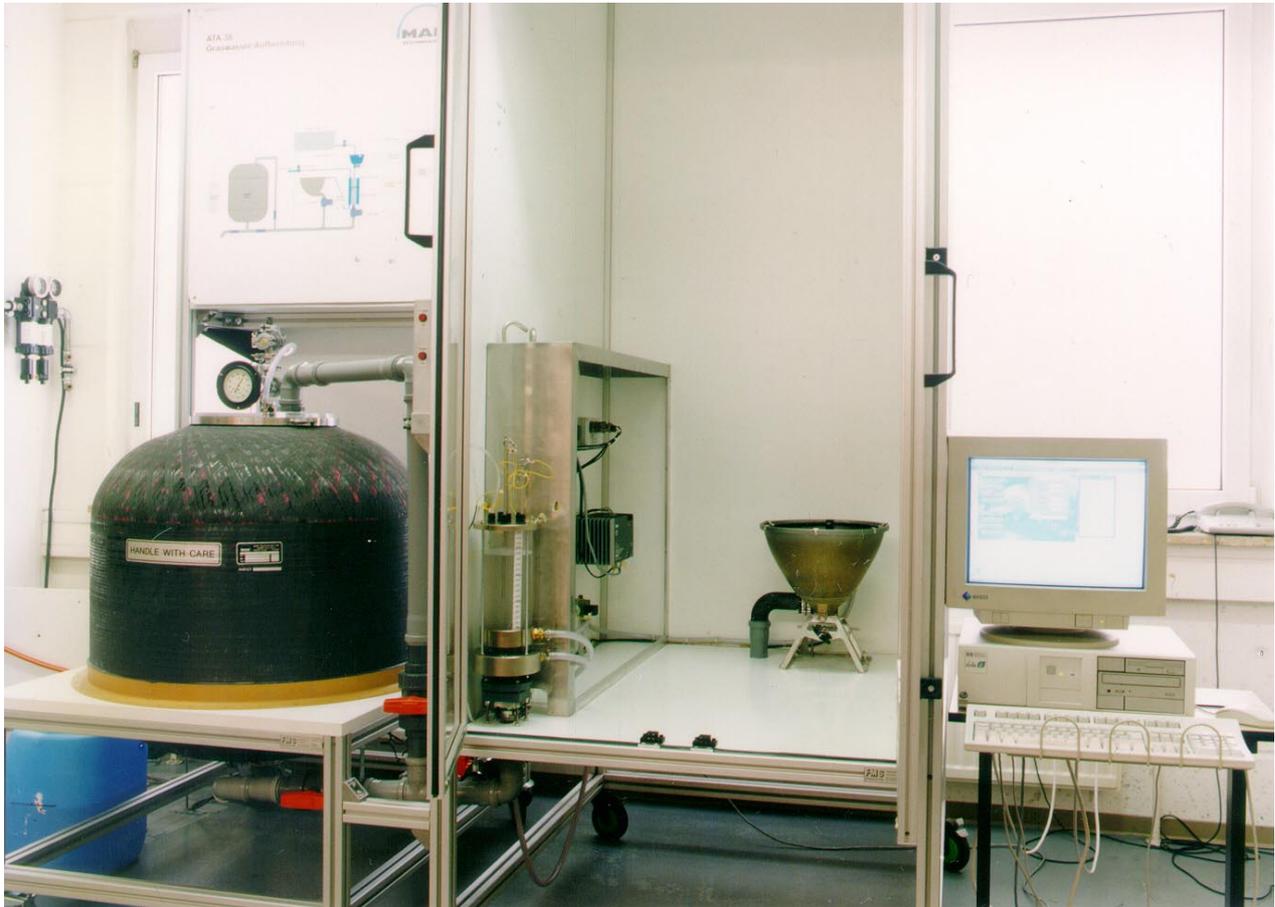


Abbildung 8: Ausgebauter Grauwasserteststand 2 mit Vakuum-Abwassersystem

2.5 Erprobung der Technologieträger

2.5.1 Versuchsplanung

Grundlage für die Durchführung der Versuche an den Grauwassertestständen, war die Schaffung einer Datenbasis aufbauend auf statistische Auswertungen von A340 Langstreckenflügen.

Schlußbericht

Darauf baute die folgende Versuchsplanung auf:

- Herstellung von Grauwasser im Teststand
- Analyse des Grauwassers
- Erstellen eines Simulations- und Steuerungsprogramms
- Dimensionierung der Grauwassereinheit mit Hilfe des Simulationsprogramms
- Langzeitversuche mit verschiedenen Grauwassereinheiten und Filtern
- Untersuchung der Aerosolbildung

2.5.2 Flugzeugspezifische statistische Daten

In den folgende Tabellen (Tabelle 16 und Tabelle 17) sind die flugzeugspezifischen Daten und Annahmen zu der Art und Häufigkeit der Benutzung von Toilettenkabinen zusammengefaßt. Die Annahmen bezüglich anfallender Grauwassermengen wurden aus statistischen Erhebungen von Airlines abgeleitet und mit DA abgestimmt.

| | minimal | maximal | Durchschnitt |
|--|---------|---------|--------------|
| Flugdauer in Stunden | 7 | 16 | 10 |
| Anzahl Passagiere pro Toilettenkabine | 7 | 45 | 35 |
| Wasserverbrauch pro Toilettenspülung (Knopfdruck) in Liter | 0,15 | 0,3 | 0,2 |
| Frischwasserverbrauch pro Wasserhahnbetätigung in Liter (Hebeldruck) | 0,25 | 0,35 | 0,3 |

Tabelle 16: Flugzeugspezifische Daten

Schlußbericht

| | minimal | maximal | Durchschnitt |
|---|---------|---------|--------------|
| Wasserverbrauch pro Toilettenbenutzung ¹ in Liter | 0,2 | 0,6 | 0,22 |
| Anzahl der Toilettenbesuche pro Flugstunde und Toilettenkabine | 0 | 16 | 10 |
| Anzahl der Toilettenbesuche pro Flugstunde und Passagier ² | 0,2 | 0,4 | 0,3 |
| Frischwasserverbrauch pro Händewaschen ³ in Liter | 0,25 | 1,2 | 0,35 |
| Anzahl Händewaschen pro Flugstunde und Passagier | 0 | 0,45 | 0,3 |
| Frischwasserverbrauch pro Zähneputzen in Liter | | 0,9 | 0,45 |
| Anzahl Zähneputzen pro Flug und Toilettenkabine | | 35 | 9 |
| Frischwasserverbrauch pro Rasur naß in Liter | | 1,8 | 1,5 |
| Anzahl Rasuren naß pro Flug und Toilettenkabine | | 10 | 4 |
| Frischwasserverbrauch pro Rasur trocken in Liter | | | 0,30 |
| Anzahl Rasuren trocken pro Flug und Toilettenkabine | | 10 | 4 |

Tabelle 17: Benutzerspezifische Daten

¹ Ein durchschnittlicher Wasserverbrauch von 0,22 l pro Toilettenbenutzung ergibt sich z.B. wenn z.B. 10% der Passagiere den Spülknopf 2 mal drücken

² Die statistische Auswertung von 10 Flügen Tokyo/Frankfurt mit einer Auslastung von 86% ergab ca. 0.3 Toilettenbesuche pro Flugstunde und Passagier

³ Nach statistischer Auswertung von 48 Flügen mit einem Airbus A340 und einer Flugdauer zwischen 7.15 und 10.40 Stunden beträgt der Frischwasserverbrauch 0,185 l/Pax/h d.h. daß z.B. 16% der Passagiere den Hebel am Handwaschbecken 2 mal drücken.

Schlußbericht

2.5.3 Herstellung von Grauwasser im Teststand

Zur Herstellung von möglichst realistischem Grauwasser, wie es während eines Langstreckenfluges entsteht, wurde bei MAN Technologie in Karlsfeld ein originales Airbus A340 Waschbecken mit Wasserhahn von Aqua Butzke und integriertem Seifenspender installiert. Der Seifenspender enthielt Flüssigseife von Lufthansa Code No. 363-1081.

Das Grauwasser wurde in einem 40 Liter Behälter unter dem Waschtisch aufgefangen und anschließend analysiert bzw. für die Tests der Grauwassereinheiten eingesetzt.

Der Zufluß aus dem Wasserhahn wird wie in den meisten Flugzeugen üblich per Hebeldruck ausgelöst. Abhängig vom Leitungsdruck und der manuellen Einstellung des Wasserhahns fließen etwa 250 bis 350 ml Wasser innerhalb von 8-20 Sekunden je Hebeldruck. Der Wasserhahn wurde für die Versuche auf 300 ml und 10 Sekunden je Hebeldruck eingestellt.

Die Auswertung der Handwaschbeckenbenutzungen am Teststand ergab folgende durchschnittliche Anzahl der Wasserhahn-Betätigungen:

- Händewaschen 2,2 mal
- Zähneputzen 2,4 mal
- Rasieren trocken 1,0 mal
- Rasieren naß 6,9 mal

Zur Herstellung von möglichst realistischem Grauwasser mußten Annahmen bezüglich Häufigkeit und Art der Benutzung getroffen werden:

- Flugdauer 10 Stunden
- Anzahl Händewaschen 3 je Passagier und Flug
- Anzahl Zähneputzen 1 je Passagier und Flug
- Anzahl Naßrasuren 0,125 je Passagier und Flug
- Anzahl Trockenrasuren 0,125 je Passagier und Flug

Neben den hauptsächlich durch den Passagier zugeführten Verunreinigungen wie Seife, Rasierschaum und Zahnpaste ist auch mit Papier, Make up, Lotion, Cremes, Haare, Glassplitter, Blut u.s.w. zu rechnen. Vom Wartungspersonal können Putzmittel und Desinfektionsmittel zugeführt werden. Diese Verunreinigungen dürfen die Funktion der Aufbereitungsanlage nicht beeinträchtigen.

Schlußbericht

2.5.4 Analyse des Grauwassers

Eine im chemischen Labor durchgeführte Analyse des gesammelten Grauwassers ergab folgende Ergebnisse:

- Mit 0,3 ml/l waren absetzbare Stoffe nur in geringen Mengen vorhanden.
- Abfiltrierbares betrug bei Proben I und II (Tabelle 18), die sich durch die Häufigkeit der Naßrasuren unterschieden, 74 beziehungsweise 20 mg/l.
- Der organische Anteil der Trockensubstanz betrug 51 beziehungsweise 65%.
- CSB-Werte lagen mit 550 und 610 mg/l im oberen Bereich im Vergleich zu Grauwasser in Gebäuden.
- In der filtrierten Probe zeigen beide Grauwasserproben im Mittel mit 426 mg/l Übereinstimmung beim chemischen Sauerstoffbedarf. Damit kann davon ausgegangen werden, daß 70% der Verschmutzung gelöst vorliegen.
- Der BSB₅ betrug 310 mg/l und entsprach dem Mittelwert der vergleichbaren Grauwässer. Werte von 90 mg/l BSB₅, wie sie in der Literatur auch zu finden sind, ergeben sich nur bei höherem Wasserverbrauch.
- Das CSB/BSB₅ Verhältnis zeigte mit 1,8 eine gute biologische Abbaubarkeit. Bei den Pflanzennährstoffen Stickstoff und Phosphor liegen die Mengen im vergleichsweise im unteren Bereich. Mit den festgestellten 9,5 mg/l N_{ges} und 3,0 mg/l P_{ges} ergibt sich ein ausgeglichenes Nährstoffverhältnis (C:N:P) von 100:3:1. Somit liegen für Bakterien optimale Wachstumsbedingungen vor. Die Fäulnisfähigkeit zeigte sich innerhalb von drei Tagen. Fäkalcoliforme waren mit 100 Kolonien bildende Einheiten (KBE) pro ml festgestellt worden. Geruchsentwicklungen traten bei belüfteten Proben, die im Glasgefäß bei Raumtemperatur und Dunkelheit drei Monate aufbewahrt wurden, nicht auf. Mit Sicherheit kann aber davon ausgegangen werden, daß sich Bakterien ohne Gegenmaßnahme in der Aufbereitungsanlage ansammeln und vermehren.
- Die Partikelgrößenanalysen (Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11) zeigen, daß mehr als 80% der im Grauwasser gefundenen Partikel kleiner als 20 µm sind. 40 bis 50% dieser Teilchen sind kleiner als 10µm und etwa 5% sind kleiner als 2µm. Im Unterschied zur Probe MAN I (Bild 1), bei der vermehrt Partikel zwischen 15 und 20 µm auftraten, zeigt die Probe II (Bild 2) vermehrt Partikel mit einer Größe von 3 bis 8 µm.

Gemessen wurde die Trübung mit 68 und 60 Einheiten (NTU). Aus den Werten der UV-Transmission von 23,7 beziehungsweise 27,0% läßt sich ableiten, daß die unbehandelten Grauwässer für eine UV-Desinfektion ungeeignet sind. Erst die Filtrate (0,45 µm) weisen die erforderliche Transmission von über 60% auf.

Schlußbericht

| | Einheit | Original | | | im Filtrat | |
|------------------------------------|---------|-------------------------------|----------------|-----------------------|------------|-----|
| | | I 27.6.1997 | II 4.7.1997 | III 26.1.1998 | I | II |
| Proben-Nr. | | | | | | |
| pH | | 7,2 | 8,6 | | | |
| Leitfähigkeit | µS/cm | 535 | 436 | | | |
| Trübung | NTU | 68 | 60 | | | |
| UV Transmission | % | 27,0 | 23,7 | 34 | 74 | 61 |
| Absetzbare Stoffe | ml/l | 0,3 | 0,2 | 36,5 | | |
| Abfiltrierbare Stoffe | mg/l | 74,0 | 20,2 | <0,1 | | |
| Org. Trockensubst. OTS | % | 65,0 | 51,2 | 16,0 | | |
| Partikelgrößen | | 80% < 20µm 50% davon <10µm | | 95% <25 µm | | |
| CSB | mg/l | 607 | 556 | | 424 | 428 |
| BSB ₅ | mg/l | 314 | 308 | | 252 | 167 |
| Stickstoff gesamt N _{ges} | mg/l | 9,2 | 9,7 | | 5,3 | 7,8 |
| Phosphor gesamt P _{ges} | mg/l | 3,2 | 2,8 | | 3,0 | 2,4 |
| Kohlenwasserstoffe KW | mg/l | 0,6 | n.b. | | | |
| Detergentien | mg/l | 23,8 | 61,8 | 147 | | |
| Fäulnisfähigkeit | d | <3 Tage | <3 Tage | <3 Tage | | |
| Gesamtkeimzahl | KBE | 1,1 · 10 ⁷ | n.b. | 1,3 · 10 ⁵ | | |
| Ges. Coliforme | KBE | 10 ² | n.b. | n.b. | | |
| Fäkalcoliforme | KBE | 10 ² | | 2,7 · 10 ³ | | |

Tabelle 18: Analysenergebnisse von drei Grauwasserproben und deren Filtrat (Filterporengröße 0,45 µm)

Schlußbericht

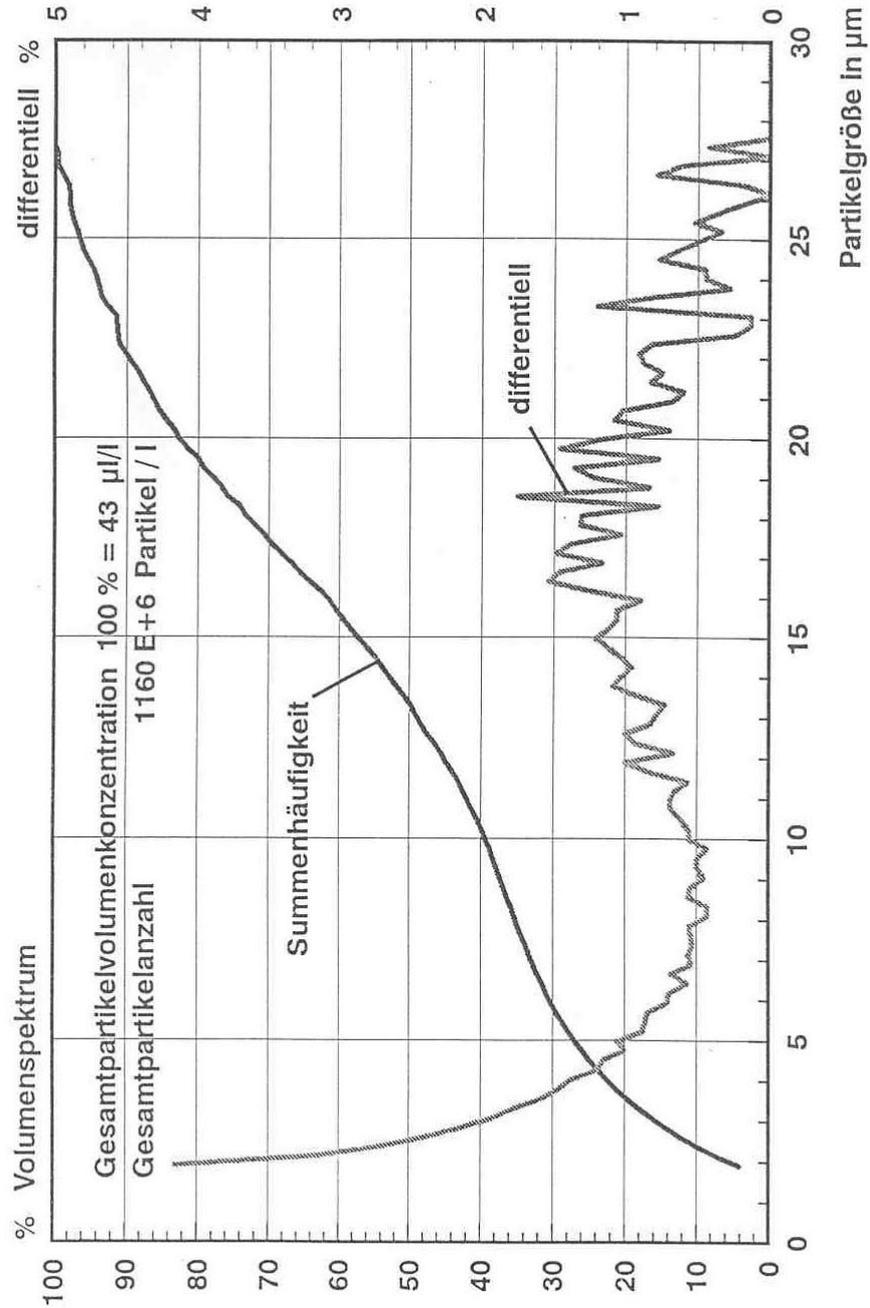


Bild 1 : Größenverteilungsspektren der Waschwasserprobe MAN I vom 27. Juni 1997.

Abbildung 9: Größenverteilungsspektrum der Grauwasserprobe I vom 27.6.1997

Schlußbericht

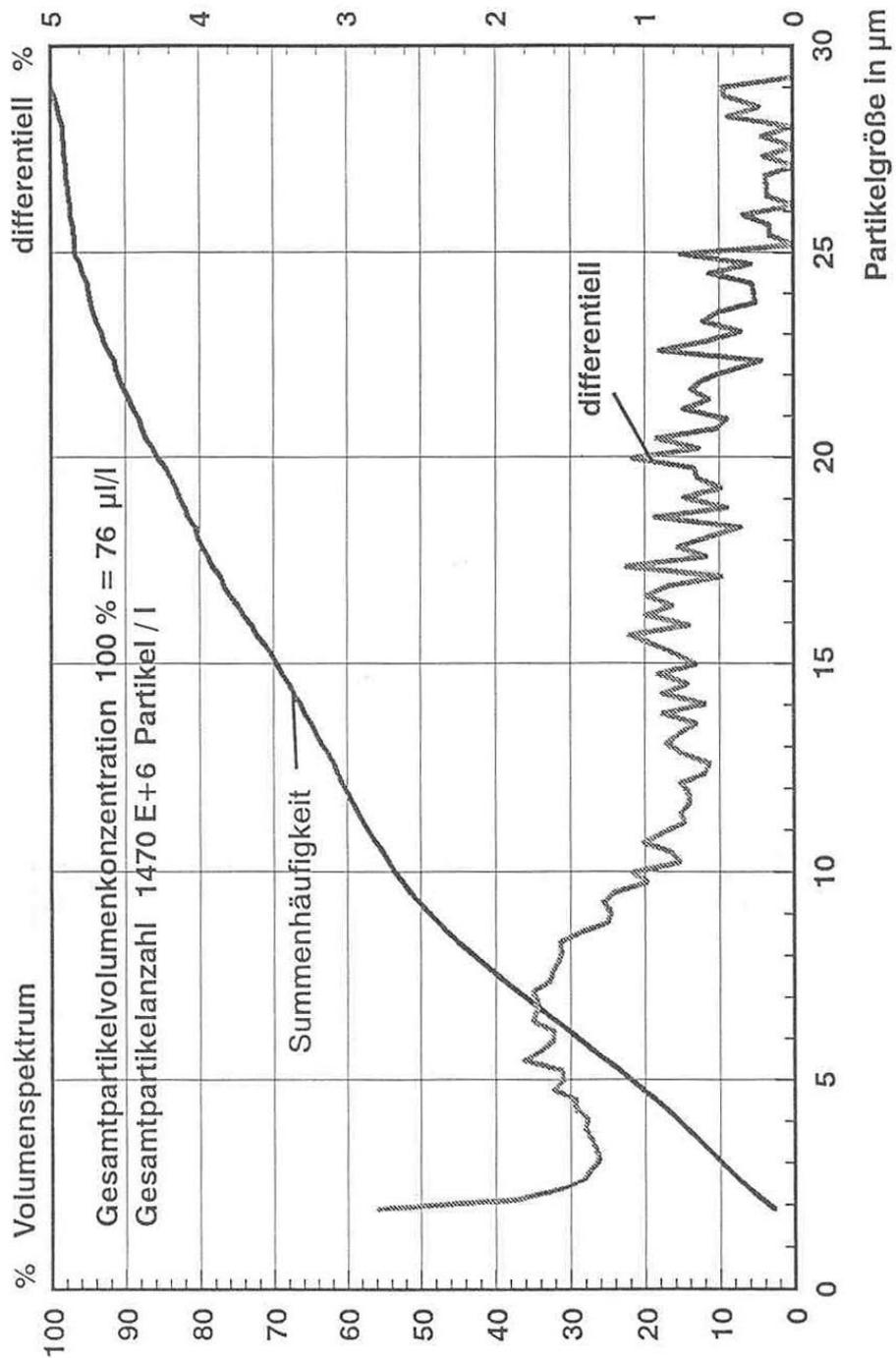


Bild 2 : Größenverteilungsspektren der Waschwasserprobe MAN II vom 14. Juli 1997.

Abbildung 10: Größenverteilungsspektrum der Grauwasserprobe II vom 4.7.1997

Schlußbericht

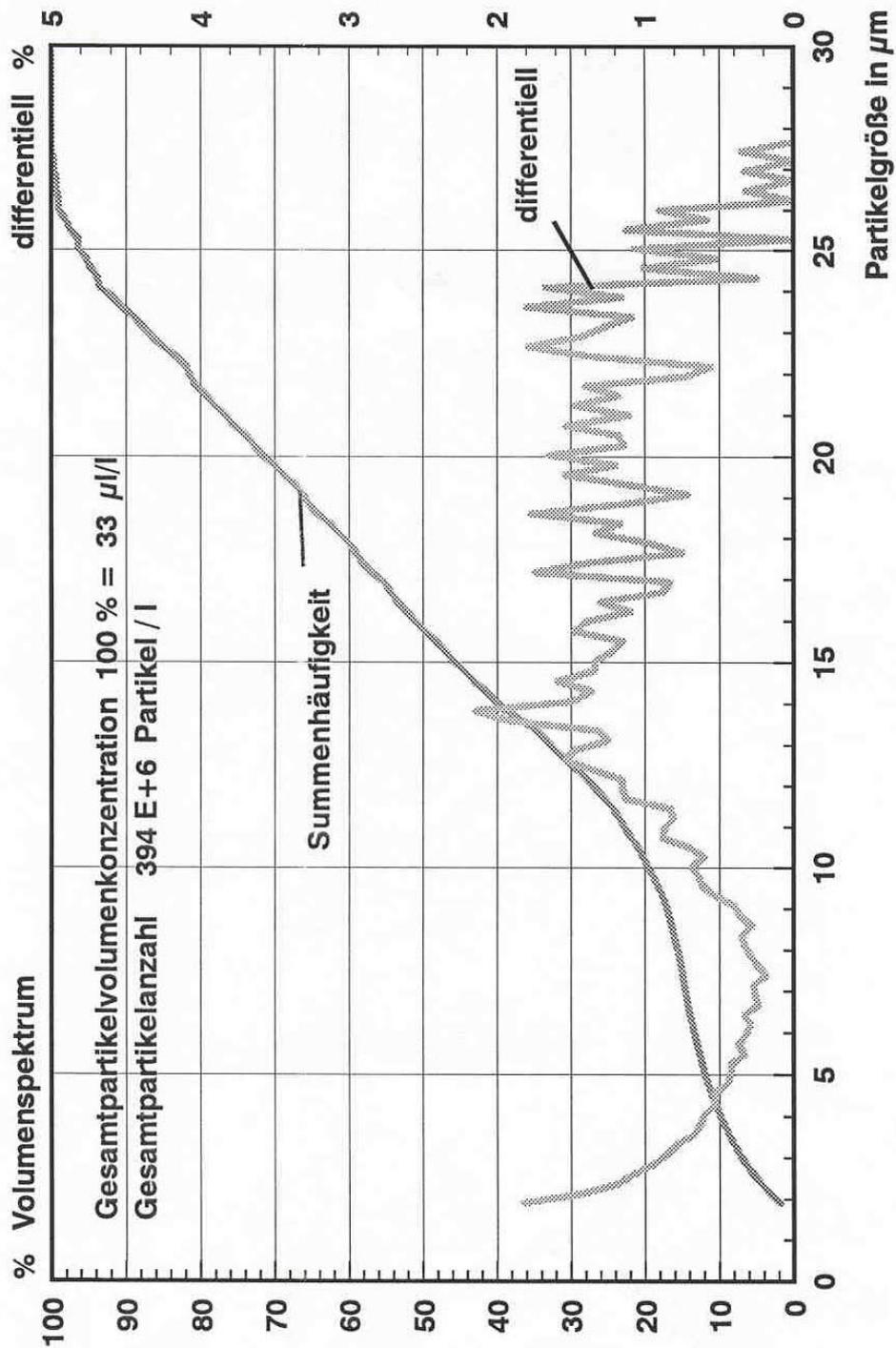


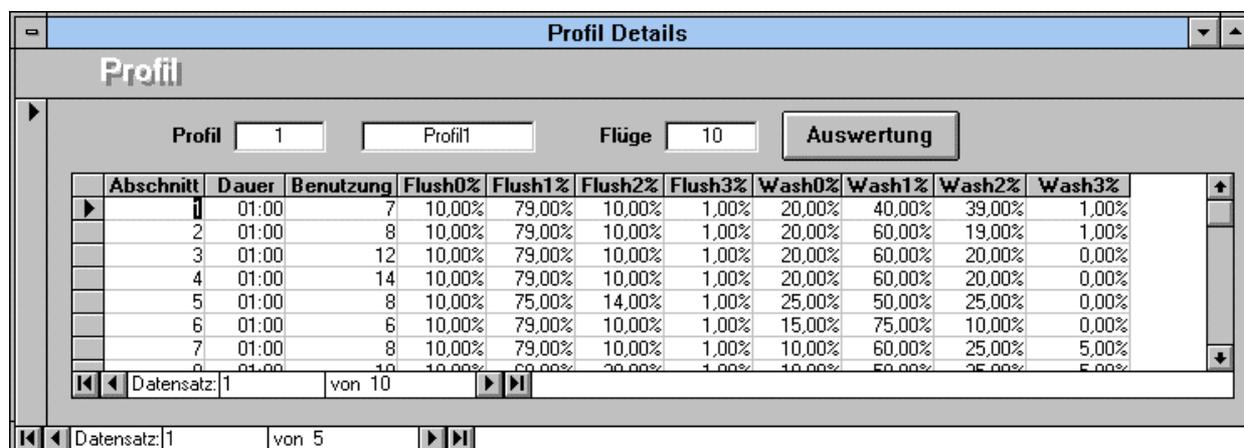
Abbildung 11: Größenverteilungsspektrum der Grauwasserprobe III vom 26.1.1998

Schlußbericht

2.5.5 Erstellen eines Simulations- und Steuerungsprogramms

Für die Simulation verschiedener Flüge im Teststand, sowie für die Dimensionierung der Grauwassereinheiten, wurde ein Simulations- und Auswertungsprogramm erstellt. Mit Hilfe dieses Programms konnten für verschiedene Flüge und Benutzerprofile folgende Eingangsparametern (Abbildung 12) variiert und der Teststand entsprechend angesteuert werden:

- Dauer des Fluges
- Einteilung des Fluges in Abschnitte mit unterschiedlicher Benutzungshäufigkeit
- Anzahl der Toilettenkabinen-Benutzungen
- Relative Häufigkeit der Wasserhahnbetätigungen: 0, 1, 2 oder 3 mal pro Kabinenbenutzung
- Relative Häufigkeit der Auslösung einer Toilettenspülung: 0, 1, 2 oder 3 mal pro Kabinenbenutzung



The screenshot shows a software window titled 'Profil Details'. It contains a table with columns for 'Abschnitt', 'Dauer', 'Benutzung', 'Flush0%', 'Flush1%', 'Flush2%', 'Flush3%', 'Wash0%', 'Wash1%', 'Wash2%', and 'Wash3%'. The table lists 8 sections with varying durations and usage frequencies. Below the table, there are navigation controls and a status bar showing 'Datensatz: 1 von 10' and 'Datensatz: 1 von 5'.

| Abschnitt | Dauer | Benutzung | Flush0% | Flush1% | Flush2% | Flush3% | Wash0% | Wash1% | Wash2% | Wash3% |
|-----------|-------|-----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 01:00 | 7 | 10,00% | 79,00% | 10,00% | 1,00% | 20,00% | 40,00% | 39,00% | 1,00% |
| 2 | 01:00 | 8 | 10,00% | 79,00% | 10,00% | 1,00% | 20,00% | 60,00% | 19,00% | 1,00% |
| 3 | 01:00 | 12 | 10,00% | 79,00% | 10,00% | 1,00% | 20,00% | 60,00% | 20,00% | 0,00% |
| 4 | 01:00 | 14 | 10,00% | 79,00% | 10,00% | 1,00% | 20,00% | 60,00% | 20,00% | 0,00% |
| 5 | 01:00 | 8 | 10,00% | 75,00% | 14,00% | 1,00% | 25,00% | 50,00% | 25,00% | 0,00% |
| 6 | 01:00 | 6 | 10,00% | 79,00% | 10,00% | 1,00% | 15,00% | 75,00% | 10,00% | 0,00% |
| 7 | 01:00 | 8 | 10,00% | 79,00% | 10,00% | 1,00% | 10,00% | 60,00% | 25,00% | 5,00% |
| 8 | 01:00 | 10 | 10,00% | 79,00% | 10,00% | 1,00% | 10,00% | 50,00% | 25,00% | 5,00% |

Abbildung 12: Beispielhafte Definition des Benutzerprofils

Weitere Eingangsparameter waren die Dimensionen verschiedener Grauwassereinheiten mit Scheibenfilter (Abbildung 13) und mit zylindrischem Filter (

Abbildung 14) sowie die Position der drei Füllstandssensoren.

Zur Simulation der Grauwassereinheit mit zylindrischem Filter (Unit 1) und Innenzylinder, wurde ein eigenes Programm erstellt. Bei dieser Simulation kommt die Höhe des Innenzylinders als zusätzlicher Eingangsparameter hinzu.

Schlußbericht

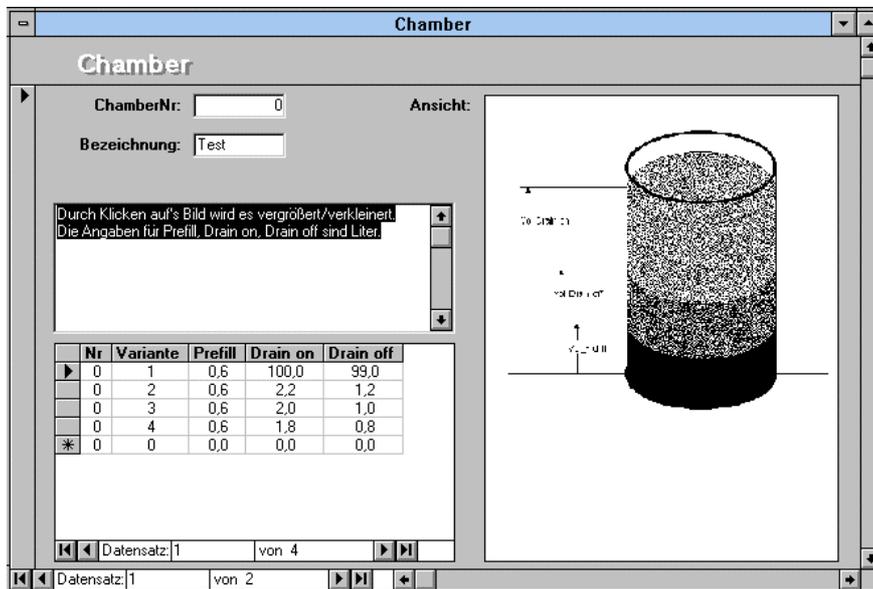


Abbildung 13: Beispielhafte Eingabe der Parameter einer Grauwassereinheit mit Scheibenfilter

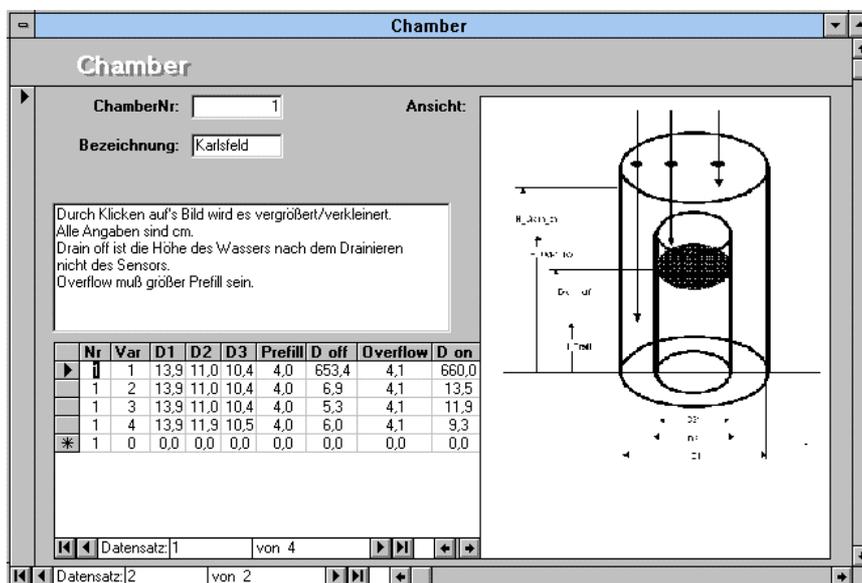


Abbildung 14: Beispielhafte Eingabe der Parameter einer Grauwassereinheit mit zylindrischem Filter und Innenzylinder

Die Anzahl der Flush-Zyklen, der Wash-Zyklen, der Sink-Zyklen und die Dauer des Frischwasserzuflusses wurden während der Simulationsversuche am PC und während der Lebensdauerersuche am Teststand festgehalten.

Mit Hilfe eines Auswertungsprogramms konnten daraus das Volumen:

Schlußbericht

- des Grauwassers aus dem Waschbecken
- des verbrauchten Toilettenspülwassers
- des zugeführten Frischwassers
- des drainierten Grauwassers

für verschiedene Flugprofile und Grauwassereinheiten berechnet werden. (Abbildung 15)

Auswertung

08. Dez. 98

| FlugNr | Total | T0 | T1 | T2 | T3 | W0 | W1 | W2 | W3 |
|-------------|-----------|----------------------|----------|----------------------|---------|-------------|-------|------------|------|
| | | Flushes % | | | | Pushes % | | | |
| | | Flushes | VolFlush | Pushes | VolWash | | | | |
| | | % VolFlush / Volumen | | % VolFlush / VolWash | | | | | |
| Bezeichnung | Variante | Prefill Liter | | % Pref / Vol | | Drain Liter | | | |
| 1 | 102 | 8 | 74 | 19 | 1 | 14 | 52 | 31 | 5 |
| | | 7,8% | 72,5% | 18,6% | 1,0% | 13,7% | 51,0% | 30,4% | 4,9% |
| | | 115 | | 23,0 Liter | | 129 | | 38,7 Liter | |
| | | 37,3% | | 59,4% | | | | | |
| | Test | 1 | | 1,0 | | 2,5% | | 0,0 | |
| | Test | 2 | | 1,0 | | 2,5% | | 15,2 | |
| | Test | 3 | | 1,7 | | 4,2% | | 16,4 | |
| | Test | 4 | | 2,3 | | 5,6% | | 16,9 | |
| | Karlsfeld | 1 | | 0,8 | | 2,0% | | 0,0 | |
| | Karlsfeld | 2 | | 1,5 | | 3,6% | | 16,1 | |
| | Karlsfeld | 3 | | 3,2 | | 7,6% | | 17,8 | |
| | Karlsfeld | 4 | | 2,9 | | 7,0% | | 17,8 | |

Abbildung 15: Auswertung eines Fluges (beispielhaft) mit folgenden Eingangsparametern:

- Anzahl der Toilettenkabinen-Besuche 102,
- Anzahl der Toilettenspülungen (T0, T1, T2 und T3) 115,
- Anzahl der Wasserhahn-Betätigungen (W0, W1, W2, W3) 129
- für die Varianten 1 bis 4 der Grauwassereinheit „Test“, mit Scheibenfilter und der Grauwassereinheit „Karlsfeld“ mit Zylindrischem Filter.
- In den unteren Zeilen „Test“ und „Karlsfeld“ ist das Volumen des benötigten Frischwassers („Prefill“) und des drainierten Grauwassers für die verschiedenen Konfigurationen angegeben.

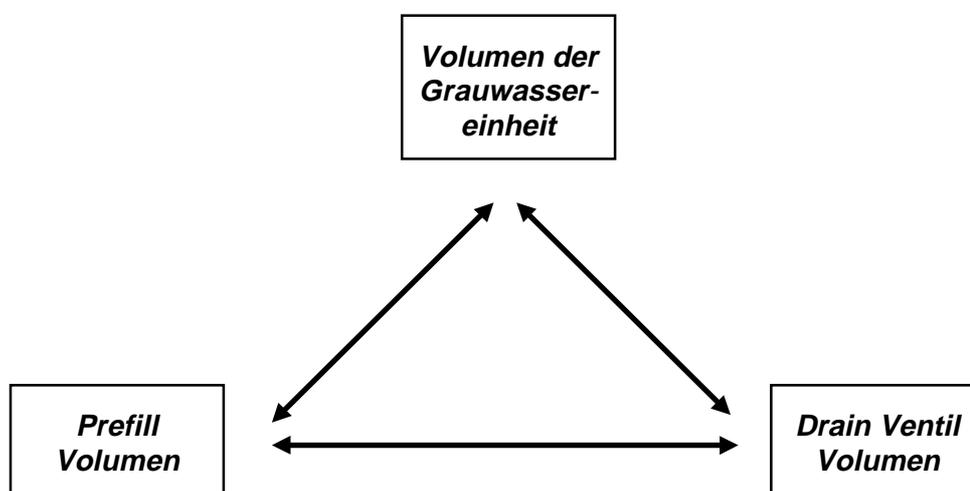
2.5.6 Dimensionierung der Grauwassereinheit

Die Forderung nach einem niedrigen Frischwasserverbrauch zur Toilettenspülung ist dimensionierend für die Grauwassereinheit. Der Frischwasserverbrauch einer Grauwassereinheit hängt ab von:

Schlußbericht

- der Größe der Einheit
- den Drain Ventil Eigenschaften
- der Einstellung des Low Level Sensors, der das Prefill Volumen festlegt.

Diese drei Parameter bedingen sich wiederum gegenseitig.



1. Das Prefill Volumen ist das Wasservolumen, das in der Grauwassereinheit benötigt wird, um den Wasserstand zu erreichen bei dem der Low Level Sensor Kontakt zum Wasser hat und das Prefill Ventil wieder schließt. Es wird so eingestellt, daß die Pumpe zur Toilettenspülung keine Luft ansaugt. Das Prefill Volumen hängt daher von der Querschnittsfläche der Grauwassereinheit und dem Wasserdurchsatz der Pumpe ab. Es ist größer als die Mindestmenge von 200 ml pro Spülung und wird ebenfalls experimentell bestimmt.
2. Die Grauwasser-Aufbereitungseinheit dient gleichzeitig als Grauwasserspeicher. Je größer der Grauwasserspeicher ist, um so kleiner ist der Frischwasserverbrauch. Da die Platzverfügbarkeit unter dem Handwaschbecken jedoch sehr begrenzt ist, ist eine Optimierung der Größe der Grauwassereinheit notwendig.
3. Der Frischwasserverbrauch hängt gleichzeitig auch davon ab, wieviel Grauwasser über das Drain Ventil während eines Sink Zyklus in das Vakuum Abwassersystem abgelassen wird. Je mehr Wasser während der Öffnung des Drain Ventils abfließt, um so mehr Frischwasser wird von der Grauwassereinheit verbraucht. Da die Öffnungszeit des Ventils nicht beliebig verkürzt werden kann, muß unter Umständen der Öffnungsquerschnitt des Ventils reduziert werden. Ist das Volumen des (während eines Sink Zyklus) drainierten Wassers jedoch sehr

Schlußbericht

klein, so ist auch der Rückspüleffekt des Filters gering. Die Abhängigkeit des drainierten Wasservolumens von der Öffnungszeit bzw. der Position des „Mid Level Sensors“, dem Öffnungsquerschnitt, den Dimensionen der Grauwassereinheit und dem Unterdruck im Abwassersystem kann nur experimentell bestimmt werden.

Zur Dimensionierung der Grauwassereinheit mit Hilfe des Simulations- und Auswertungsprogramms wurden 100 Flüge mit verschiedenen Benutzerprofilen ausgewertet:

| | |
|--|------|
| – Dauer des Fluges | 10 h |
| – durchschnittliche Anzahl der Toilettenkabinen-Benutzungen pro Stunde | 10 |
| – Gesamtanzahl der Toilettenspülungen pro Flug und Toilette | 125 |
| – Gesamtanzahl der Wasserhahn-Betätigungen pro Waschbecken | 133 |
| – durchschnittlicher Frischwasserverbrauch pro Waschbecken und Flug | 40 l |
| – durchschnittlicher Grauwasserverbrauch pro Toilette und Flug | 25 l |

In einer Grauwassereinheit mit einem Prefill Volumen von 0,4 Liter kann der Frischwasserverbrauch von 0,4 Liter auch in einer sehr großen Einheit nicht unterschritten werden, wenn man davon ausgeht, daß die Einheit vor Flugzeugstart drainiert wurde und daher für die erste Toilettenspülung kein Grauwasser verfügbar ist.

In Abbildung 16 ist die Abhängigkeit des Frischwasserverbrauchs einer GW-Einheit von dem Volumen der Einheit und dem Volumen des drainierten Grauwassers pro Sink-Zyklus dargestellt. Es ist zu erkennen, daß der Frischwasserverbrauch erst ansteigt wenn das Volumen der Einheit kleiner als 2,2 Liter ist. In einer Einheit mit einem Volumen von 1,8 Litern steigt der Frischwasserverbrauch ab einem Drain-Volumen von mehr als 1 Liter steil an (Abbildung 17). Das Prefill Volumen darf in einer Einheit mit 1,8 Liter und einem Drain Volumen von 1 Liter nicht größer als 0,6 Liter sein (Abbildung 18).

Schlußbericht

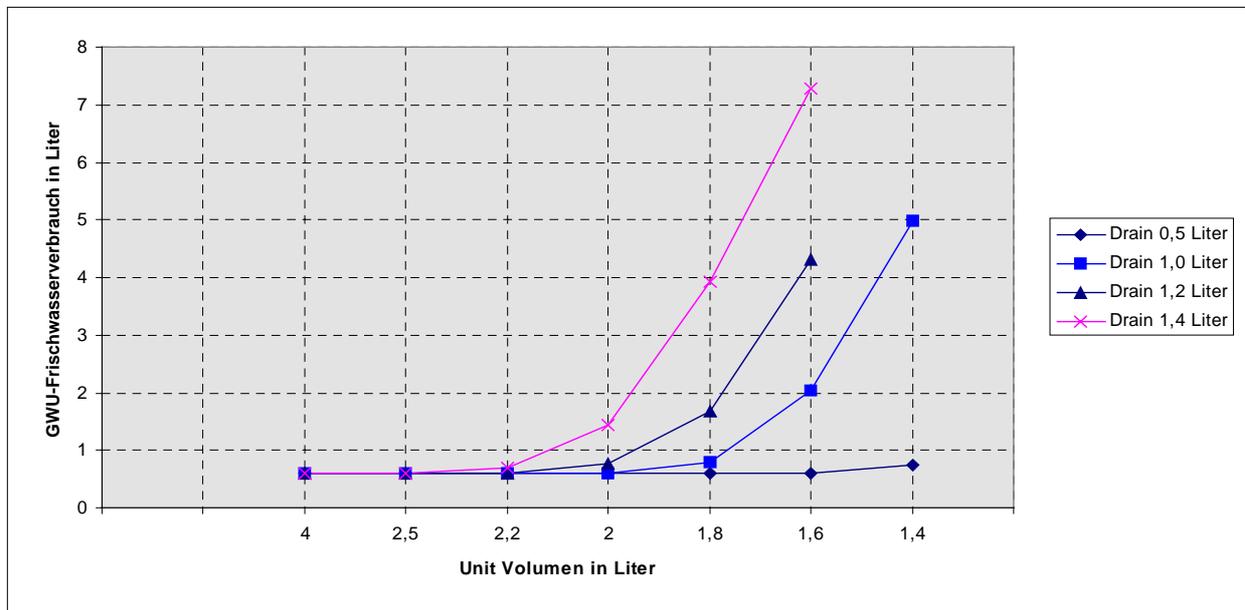


Abbildung 16: Frischwasserverbrauch einer Grauwassereinheit in Abhängigkeit vom Volumen der Einheit (10 Stunden Flug, 10 Benutzungen pro Stunde, Prefill Volumen 0,4 l)

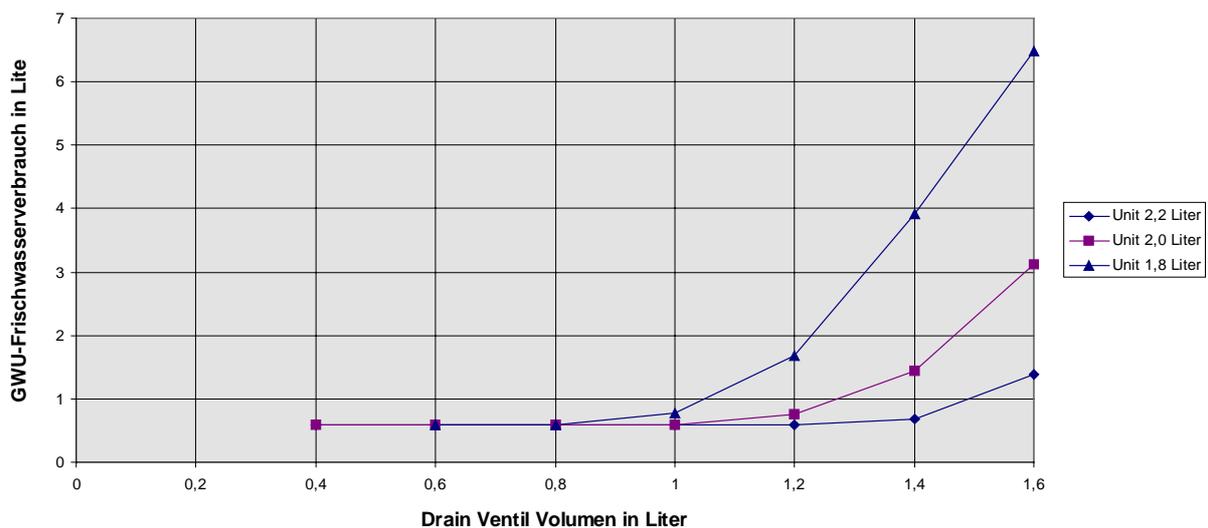


Abbildung 17: Frischwasserverbrauch einer Grauwassereinheit in Abhängigkeit vom Drain Volumen (10 Stunden Flug, 10 Benutzungen pro Stunde, Prefill Volumen 0,4 l).

Schlußbericht

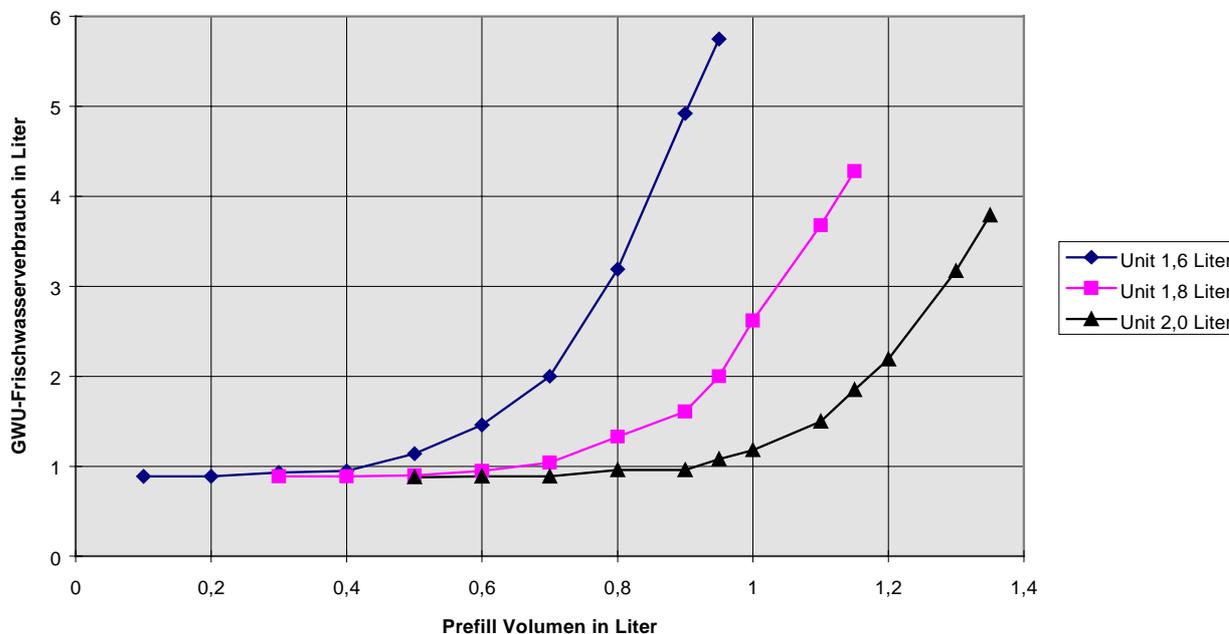


Abbildung 18: Frischwasserverbrauch einer Grauwassereinheit in Abhängigkeit vom Prefill Volumen (10 Stunden Flug, 10 Benutzungen pro Stunde, Drain Volumen 1 l)

Zur Simulation einer Grauwassereinheit mit zylindrischem Filter und Innenzylinder wurde ein eigenes Programm erstellt.

Die Auswertung verschiedener Benutzerprofile mit dieser Grauwassereinheit ergab einen höheren Frischwasserverbrauch als für eine Einheit ohne Innenzylinder, unabhängig davon welche Höhe der Innenzylinder hatte. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß nach Start des Flugzeugs die Grauwassereinheit zunächst kein Grauwasser enthält sondern mit Frischwasser bis zum Low Level Sensor aufgefüllt wird. Erst nachdem das Handwaschbecken benutzt wurde, fließt Grauwasser in die Einheit. Dieses Wasser steht jedoch zunächst nicht für die Toilettenspülung zur Verfügung. Erst wenn die innere Kammer mit Grauwasser gefüllt ist und in die äußere Kammer überläuft, ist filtriertes Grauwasser für die Toilettenspülung verfügbar.

Aus diesem Grund wurde beschlossen, diese Variante der Grauwassereinheit mit zylindrischem Filter zunächst nicht weiter zu verfolgen und erst wieder aufzugreifen, wenn die Bau- und Funktionsweise des Drain Ventils dies erfordern.

Schlußbericht

Zusammenfassung

- Ein Grauwassereinheit-Volumen von 2 Litern ist ausreichend, wenn das Drain Volumen 1,2 Liter und das Prefill Volumen 0,6 Liter nicht überschreiten. Unter diesen Bedingungen ist der Frischwasserverbrauch nicht größer als 1 Liter pro Flug.
- Ein Frischwasserverbrauch von 1 Liter pro Flug und Einheit entspricht 2,5% des verbrauchten Händewaschwassers bzw. 2,0% des gesamten Frischwasservorrats.
- Wird das Volumen der Grauwassereinheit auf 1,8 Liter reduziert, so muß das Drain Ventil Volumen auf 1 Liter und das Prefill Volumen auf 0,4 Liter reduziert werden, um den Frischwasserverbrauch nicht zu erhöhen.

2.5.7 Langzeitversuche mit verschiedenen Grauwassereinheiten und Filtern

Eines der wichtigsten Kriterien für die Auswahl eines Filters ist die Filterstandzeit, d.h. die Betriebszeit eines Filters bis zum Austausch. Als Maß für die Standzeit eines Filters wurde die Anzahl der Waschzyklen W_{count} definiert. Das Frischwasservolumen betrug pro Hebeldruck am Handwaschbecken 300 ml Wasser (V_w). Das Grauwasservolumen V_{gw} das während der Standzeit eines Filters aufbereitet wurde, kann aus diesen Größen einfach abgeleitet werden:

$$W_{\text{count}} = \text{Anzahl der Waschzyklen (Wasserhahn-Betätigungen)}$$

$$V_w = \text{Wasservolumen pro Hebeldruck am Wasserhahn} = 300 \text{ ml}$$

$$V_{\text{gw}} = W_{\text{count}} \cdot V_w$$

Um die Standzeit des Filters bezogen auf die Flugstunden berechnen zu können, mußte eine Annahme über den durchschnittlichen Wasserverbrauch an Handwaschbecken pro Stunde getroffen werden.

Statistische Erhebungen an einem Airbus A340 mit 32 Passagieren pro Toilettenkabine, haben einen Gesamtfrischwasserverbrauch von 0,198 l/ PAX/ h ergeben.

Unter der Annahme, daß etwa die Hälfte des Wassers im Handwaschbecken verbraucht wird, ergibt sich eine durchschnittliche Anzahl von rund 10 Wasserhahn-Betätigungen/Flugstunde und Toilettenkabine.

Die Anzahl der Waschzyklen $W_{\text{count}} / 10$ ergibt die geschätzte Betriebszeit eines Filters in Flugstunden.

Schlußbericht

Position der Sensoren während der Langzeittests

Die Position der Sensoren in Unit 1 und 2 (Tabelle 19 und Tabelle 20) wurde so ausgewählt, daß das Volumen der Einheit (vom High Level Sensor bestimmt) und das Volumen des während eines Sink Zyklus drainierten Grauwassers in beiden Einheiten übereinstimmen. Lediglich das Prefill Volumen war bedingt durch die unterschiedliche Bauweise der Einheiten in Unit 2 mit 600 ml etwas größer als in Unit 1. Das Prefill Volumen wurde in beiden Einheiten so festgelegt, daß keine Luft von der Pumpe angesaugt wurde.

| Sensor | Position | Funktion | Volumen |
|-------------------|----------|----------------|---------|
| High Level Sensor | 135 mm | Drain on | 2000 ml |
| Mid Level Sensor | 68 mm | Drain off | 1000 ml |
| Low Level Sensor | 34 mm | Prefill Volume | 500 ml |

Tabelle 19: Position der Sensoren in Unit 1

| Sensor | Position | Funktion | Volumen |
|-------------------|----------|----------------|---------|
| High Level Sensor | 235 mm | Drain on | 2000 ml |
| Mid Level Sensor | 120 mm | Drain off | 1000 ml |
| Low Level Sensor | 60 mm | Prefill Volume | 600 ml |

Tabelle 20: Position der Sensoren in Unit 2

Die ersten Testläufe wurden sowohl mit Unit 1 als auch mit Unit 2 am ersten Teststand ohne Vakuum zur Rückspülung durchgeführt.

Testergebnisse am ersten Teststand ohne Vakuum mit Unit 1 und 2

In Unit 1 wurde als Filtermedium zunächst Kunststofffilter aus Polyester-Quadratmaschengewebe bzw. Polypropylen Nadelfilz getestet. Kunststofffilter sind im Vergleich zu Edelstahl kostengünstig, können jedoch nicht gereinigt und wiederverwendet werden. Wegen der geringen Stabilität ist ein Filterträger notwendig. Dadurch verringert sich jedoch die offene Siebfläche A_0 des eingesetzten Filters. Als Filterträger wurde ein Lochblech aus Edelstahl eingesetzt.

Schlußbericht

Die ersten drei Testläufe mit Kuststofffiltern (Tabelle 21) mußten nach relativ kurzer Laufzeit abgebrochen werden, da die Filter bereits nach ca. 1000 Wasch-Zyklen zugesetzt waren. 1000 Wasch-Zyklen entsprechen einer Betriebszeit von ca. 100 Flugstunden bzw. 10 Flügen mit einer Flugzeit von 10 h.

Die kurze Standzeit der Filter wurde auf die geringe offene Siebfläche A_0 des Lochblechs und auf das fehlende Vakuum während dem Rückspülen zurückgeführt.

| Test-Nr. | Test-dauer Tage | Filtergewebe | Maschen- weite mm | Draht- stärke mm | Wasch- zyklen |
|----------|--------------------|--|-------------------------|------------------------|------------------|
| 1 | | Polyester PES Filterträger: Lochblech aus Edelstahl mit 0,80 mm Bohrungen; offene Siebfläche A_0 19-25% | 0,05 | 0,036 | 1 030 |
| 2 | | Polyester PES Filterträger: Lochblech aus Edelstahl mit 0,80 mm Bohrungen offene Siebfläche A_0 19-25% | 0,104 | 0,034 | 1 210 |
| 3 | | Polypropylen needlona (Nadelfilz) PP/PP301 CS 17 TAN 3709 ; Luftdurchlässigkeit 450 l/min Filterträger: Lochblech aus Edelstahl mit 0,80 mm Bohrungen offene Siebfläche A_0 19-25% | - | - | 972 |

Tabelle 21: Testergebnisse am ersten Teststand mit Unit 1 (zylindrischer Filter, Filterfläche: 292,5 cm²)

Während der ersten zwei Testläufe (Nr. 4 und 5) mit Unit 2 (Tabelle 22) wurde Edelmetallgewebe als Filter eingesetzt. Das kreisförmig zugeschnittene Filtergewebe wurde auf eine Platte mit eingefrästen Kanälen und Bohrungen aufgelegt und mit einem angeschraubten Metallring und einer Gummidichtung fixiert.

Schlußbericht

| Test-Nr. | Test-dauer Tage | Filtergewebe | Maschen- weite mm | Draht- stärke mm | Wasch- zyklen |
|----------|--------------------|---|-------------------------|------------------------|------------------|
| 4 | 3 | Edelstahl Filtergewebe Betamesh 20 Filterträger: Metallplatte mit Bohrungen | 0,018-0,022 | - | 838 |
| 5 | 18 | Edelstahl Quadratmaschengewebe Filterträger: Metallplatte mit Bohrungen | 0,100 | 0,315 | 2 746 |
| 6 | 22 | Polyester Gewebe PES 200/45 Filterträger: Metallplatte mit Bohrungen Filterabdeckung: Quadratmaschengewebe w = 0,80 mm; d = 0,315 A ₀ = 51% | 0.200 | 0,45 | 5 508 |

Tabelle 22: Testergebnisse am ersten Teststand mit Unit 2 (Scheibenförmiger Filter, Filterfläche: 45,4 cm²)

Der Testlauf Nr.5 wurde nach 2746 Wasch-Zyklen und Simulation von 4 Rasuren (durch Zugabe von Barthaaren aus einem Rasierapparat und Rasierschaum mit Wasser teilweise aufgelöst) abgebrochen, um den Filter mikroskopisch zu untersuchen. Obwohl der Filter noch funktionsfähig war, war ein großer Teil der Filterporen bereits zugesetzt. Die im Rasierapparat fein zerkleinerten Barthaare wurden durch den Filter mit einer Maschenweite von 100 µm nur zum Teil zurückgehalten.

Der große Einfluß der Filtermaschenweite auf die Standzeit ist an den Ergebnissen von Testlauf 4 bis 6 deutlich erkennbar.

Die Standzeit eines Filters aus Kunststoff in Unit 2 wurde in Testlauf Nr.6 (Tabelle 22) untersucht. Der weiche Filter mußte zusätzlich auch von oben fixiert werden .Er wurde mit einem groben Quadratmaschengewebe aus Edelstahl abgedeckt.

Testlauf Nr.6 wurde nach etwa 4000 Wasch-Zyklen unterbrochen. Es wurden 6 Rasuren simuliert und der Versuch anschließend ohne Beeinträchtigung fortgeführt. Der Versuch wurde nach 5508 Wasch Zyklen abgebrochen. Der Filter war noch funktionsfähig. Die relativ lange Standzeit des Filters war auf die große Maschenweite des Kunststofffilters zurückzuführen.

Schlußbericht

Testergebnisse am zweiten Teststand mit Vakuum

Um die Auswirkung des Vakuums auf den Sink- und Drain Zyklus in der Grauwassereinheit auch im Teststand simulieren und untersuchen zu können, wurde der Teststand wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, mit einem Vakuum Abwassersystem ausgerüstet. Der Unterdruck im Vakuumsystem betrug -400 bis -680 mbar.

Die Testläufe Nr 7 bis 10 wurden an diesem modifizierten Teststand durchgeführt.

| Test-Nr. | Unit | Test-dauer Tage | Filtergewebe | Maschen- weite mm | Draht- stärke mm | Wasch- zyklen |
|----------|------|--------------------|---|-------------------------|------------------------|------------------|
| 7 | 1 | | Edelstahl Drahtgewebe Glatte Tresse 24 x 110 ohne Filterträger | 0,110 | 0,36/0,026 | 8 733 |
| 8 | 2 | 29 | Edelstahl Drahtgewebe Glatte Tresse 24 x 110 ohne Filterträger | 0,110 | 0,36/0,026 | 5 987 |

Tabelle 23: Vergleich der Standzeit von Unit 1 und 2 mit gleichem Filtergewebe

Um die Abhängigkeit der Filterstandzeit von der Bauweise der Filtereinheit untersuchen zu können, wurden das gleiche Filtergewebe in Unit 1 und 2 eingebaut und in Testlauf 7 und 8 am neuen Teststand untersucht. (Tabelle 23). Der Gewebetyp „glatte Tresse“ hat eine ausreichende Eigenstabilität und muß daher nicht abgestützt werden.

Nach ca. 4000 Waschzyklen wurden die Testläufe unterbrochen und es wurden Rasuren simuliert, Orangensaft mit Fruchtfleisch sowie Kaffee und Kaffeesatz zugegeben. Danach wurde der Filter untersucht. Die Maschenöffnungen waren zum größten Teil frei. Die Tests wurden danach fortgesetzt und erst abgebrochen, nachdem die Filter zugesetzt waren und die Dauer eines Waschzyklus von 12 auf 19 Sekunden anstieg. Das Grauwasser konnte den Filter nur noch sehr langsam passieren.

Die lange Filterstandzeit wurde auf folgende Verbesserungen zurückgeführt:

- Eine wirksamere Rückspülung der Filter bedingt durch das Vakuum im Abwassersystem
- Keine Abstützung des Filtergewebes und dadurch eine größere offene Siebfläche

Die deutlich längere Filterstandzeit in Unit 1 ist auf die größere Filterfläche von 292 cm² gegenüber 45 cm² in Unit 2 zurückzuführen. Die Druckdifferenz zwischen der Grauwassereinheit und dem Vakuum-Abwassersystem während des Drainierens und gleichzeitigem Rückspülen des Filters hat dagegen einen geringeren Einfluß auf die Standzeit.

Schlußbericht

Die folgenden Testläufe wurden daher mit Unit 1 durchgeführt (Tabelle 24).

Im folgenden Test Nr. 9 wurde erneut ein stabiles Drahtgewebe Typ 580 „Tela-Gewebe“ ohne Abstützung eingesetzt. Der zylindrische Filter wurden bei MT aus einem Drahtgewebe durch Punktschweißen gefertigt. Die Maschenweite war mit 0,127 mm geringfügig größer als in Test Nr. 7 und 8.

Die stabilen Gewebetypen „Glatte Tresse“ und „Tela“ benötigen keine Abstützung, haben aber wegen der dichten Webart und der größeren Drahtdicke eine geringere offene Siebfläche als Quadratmaschengewebe.

Um die Filtereigenschaften dieser stabileren Drahtgewebetypen mit den Eigenschaften von Quadratmaschengewebe zu vergleichen wurde im folgenden Test Nr. 10 das zweilagige Gewebe Topmesh 160 getestet.

Mit diesem Filtermaterial wurden die besten Ergebnisse erzielt. Topmesh 160 besteht aus zwei Lagen gesintertem Quadratmaschengewebe. Das feine Gewebe mit 160 µm Maschenweite dient als Filter und das grobmaschige Gewebe mit 2 mm Maschenweite dient als Stütze.

| Test-Nr. | Test-dauer Tage | Filtergewebe | Maschen- weite mm | Draht- stärke mm | Wasch- zyklen |
|-----------------|----------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 9 | | Type 580 Tela ohne Filterträger | 0,127 | 0,08 | 12 551 |
| 10 | | 2 Lagen Quadratmaschen- gewebe ohne Filterträger | 0,160 /2,0 | - | 19 046 |

Tabelle 24: Testergebnisse an zweiten Teststand mit Vakuumsystem;
Unit 1 (zylindrischer Filter, Filterfläche: 292,5 cm²)

Eine weitere Maßnahme zur Verlängerung der Standzeit war die Simulation einer turnusmäßigen Desinfektion. Das Frischwassersystem von Flugzeugen wird abhängig von der Airline in regelmäßigen Abständen desinfiziert. Die Desinfektion des Grauwasseraufbereitungsmoduls kann in diese Prozedur mit einbezogen werden, ohne daß dadurch ein zusätzlicher Aufwand verursacht wird.

Während Testlauf Nr. 9 wurde die Filtereinheit und der Teststand nach 23 Tagen Betriebszeit mit einer Chlorlösung desinfiziert. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden bereits 7941 Wash-Zyklen durchgeführt. Der Filter war mit Bakterien bewachsen und ein Wash-Zyklus dauerte 19 sec gegenüber 12 sec. bei Versuchsbeginn. Nach weiteren 18 Tagen und 5100 Wasch-Zyklen bildete sich ein flockiger Belag auf dem Filter und die Dauer eines Wasch-Zyklus betrug 24 sec. Der Belag konnte durch Desinfektion mit einer 100 ppm H₂O₂ Lösung (1h Einwirkzeit) nicht

Schlußbericht

entfernt werden. Bevor die letzte Versuchsreihe gestartet wurde, wurde der Teststand erneut mit einer 100 ppm H₂O₂ Lösung desinfiziert.

Um die Keimbildung in der Filtereinheit zu unterdrücken wurde während Test Nr. 10 bereits nach 11 Tagen (3300 Wash-Zyklen) und weiteren 7 Tagen (2100 Wash-Zyklen) eine Desinfektion mit 100 ppm H₂O₂ Lösung durchgeführt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Die Standzeit der Filter war in Unit 1 höher als in Unit 2
2. Das beste Filtermaterial war Topmesh 160 mit einer Maschenweite von 160 µm
3. Mit diesem Filter wurde eine Standzeit von rund 19 000 Waschzyklen erreicht, dies entspricht einer Flugzeit von 1900 Stunden
4. Ein bereits ausgebildeter Filterbelag aus Bakterien, Pilzen und Algen konnte durch Desinfektion nicht beseitigt werden. Turnusmäßige Desinfektionen müssen rechtzeitig durchgeführt werden um der Ausbildung eines Filterbelags vor zu beugen.

Schlußbericht

2.5.8 Untersuchung der Aerosolbildung

Die Studie „Bestimmung der Aerosolbildung an einem Toilettenkabinentstanz“ wurde für für MAN Technologie AG im Rahmen des Luftfahrtforschungsprojekts 1 vom Institut für Wasserchemie und chemische Balneologie Lehrstuhl für Hydrochemie und Umweltanalytik der Technischen Universität München erstellt. Die Studie ist in Anlage 1 des Abschlußberichts enthalten.

Die durchgeführten Messungen zeigten, daß sowohl innerhalb der Toilettenkabine des Teststandes als auch im Bereich der Toilettenschüssel kein Aerosolanstieg nach dem Auslösen der Spülung beobachtet werden kann. Bei herkömmlichen Toiletten ist jedoch ein Aerosolanstieg von ca. 2000 Partikeln pro cm^3 im näheren Bereich der Schüsseloberfläche zu erfassen. Der fehlende Aerosolanstieg über der Flugzeugtoilette im Teststand ist auf das Vakuum im Abwassersystem zurückzuführen.

Da der zu untersuchende Teststand im Gegensatz zu einer herkömmlichen Haushaltstoilette kein erfaßbares Aerosol erzeugte, waren keinerlei weitere Messungen hinsichtlich physikalisch-chemischer Charakterisierung des Aerosols notwendig.

Schlußbericht

2.5.9 Betriebskostenuntersuchung

Die Ergebnisse der Studie " Betriebskostenberechnung für Wassersysteme in Großraumflugzeugen" (Juni 1996) von Applied Science [33] im Auftrag von MAN Technologie sind im Folgenden kurz zusammengefaßt. Die Studie ist in Kapitel 4 enthalten.

Vier verschiedene Konzepte des Wassersystems wurden einander gegenübergestellt. Die Kurzbezeichnungen von A bis D sowie die grundlegenden Merkmale dieser Konzepte sind in Tabelle 25 enthalten.

| | |
|----------|--|
| A | Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast (offen): 1. Referenzsystem |
| B | Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast (geschlossen): 2. Referenzsystem |
| C | Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast (offen) |
| D | Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast (geschlossen) |

Tabelle 25: Untersuchte Systemvarianten

In der Arbeit wurde unter Wassersystem (Tabelle 26) im Gegensatz zur ATA-Definition lediglich ein System verstanden bestehend aus:

- Frischwasser und Abwassertanks
- gegebenenfalls Grauwasserleitungen und Drain Masts
- gegebenenfalls Grauwasseraufbereitungsanlagen

Die Studie wurde im Vorfeld weiterer Untersuchungen zur Grauwasseraufbereitung durchgeführt, um die Grenzen eines neuen Wassersystems abstecken zu können. Zu diesem Zeitpunkt konnten lediglich Annahmen bezüglich Anschaffungskosten und Masse der Grauwassersystem-Komponenten getroffen werden.

Schlußbericht

| Flugzeugtyp/Varianten | A 340-200 | Megaliner |
|-----------------------|-----------|-----------|
| A | 212 | 416 |
| B | 238 | 462 |
| C | 214 | 428 |
| D | 212 | 424 |

Tabelle 26: Wassersystem-Masse in kg (nur relevante Teile wie Tanks, Leitungen, Drain Mast und GWUs).

Annahmen: eine GWU wiegt 4,5 kg, 8 GWU im A340, 16 GWU im Megaliner

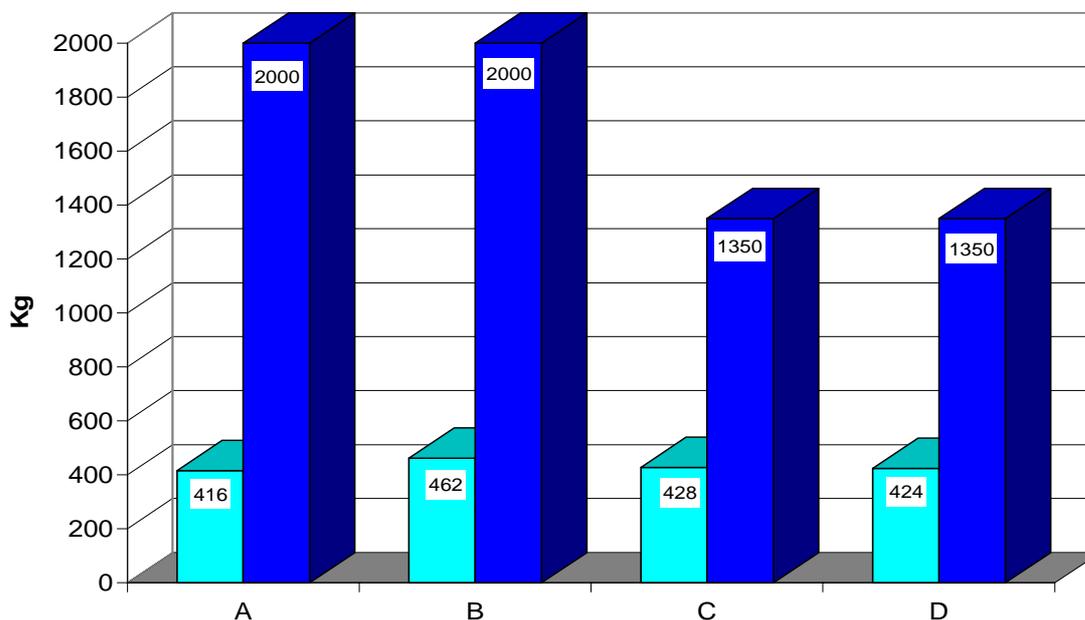


Abbildung 19: Wassermasse und Systemmasse für die Varianten A bis D

Schlußbericht

| Flugzeugtyp/Varianten | A 340-200 | Megaliner |
|-----------------------|-----------|-----------|
| A | 79 000 | 136 450 |
| B | 97 000 | 163 600 |
| C | 89 000 | 156 450 |
| D | 95 000 | 159 600 |

Tabelle 27: Wassersystem-Kosten in US \$ (nur relevante Teile wie Tanks, Leitungen Drain Mast und GWUs).
 Annahme: eine GWU kostet 2000 US\$.

| Flugzeugtyp/Varianten | A 340-200 | Megaliner |
|-----------------------|-----------|-----------|
| A | 40 099 | 70 060 |
| B | 47 485 | 82 515 |
| C | 32 450 | 57 095 |
| D | 35 535 | 61 960 |

Tabelle 28: Betriebskosten der Wassersysteme DOCsys berechnet aus Abschreibung und Kraftstoffkosten ohne Wartungskosten .
 Angaben in US\$ pro Jahr und Flugzeug

Schlußbericht

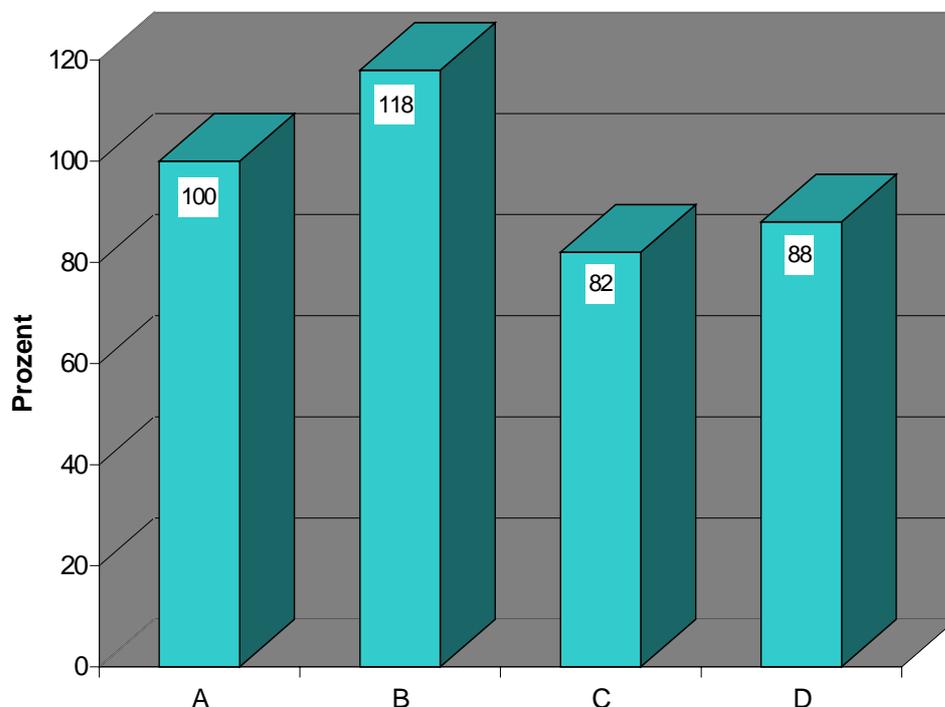


Abbildung 20: Betriebskosten der Wassersysteme DOC_{sys} berechnet aus Abschreibung und Kraftstoffkosten ohne Wartungskosten.
Angaben in % Variante A = 100%

Ergebnisse

Unter der Annahme daß ein Grauwassermodul pro Toilette 4,5 kg wiegt und 2000 US\$ kostet, ergab sich ein Betriebskostenvorteil für Großraumflugzeuge mit Grauwasseraufbereitung (Konzept C und D) gegenüber bisherigen Flugzeugen. Er beträgt für einen Megaliner mit Grauwasseraufbereitung und ohne Drain Masts (Konzept D) 8100 US\$ pro Flugzeug und Jahr.

Der Kostenvorteil ist vor allem auf den niedrigeren Kraftstoffverbrauch eines Flugzeugs mit Grauwasseraufbereitung zurückzuführen. So benötigt ein Megaliner mit Grauwasseraufbereitung ca. 650 Liter weniger Frischwasser. Dadurch wird das Abfluggewicht erheblich reduziert.

Spätere Untersuchungen haben ergeben, daß sowohl Gewicht als auch Kosten der Grauwasseraufbereitungseinheiten gegenüber den getroffenen Annahmen reduziert werden können.

Schlußbericht

3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Realisierbarkeit von Grauwasseraufbereitungsanlagen für Flugzeuge wurden innerhalb des Vorhabens untersucht und demonstriert.

Wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit sind:

- Dezentrale Grauwasser-Aufbereitungsanlagen in den Toilettenkabinen bieten gegenüber einer zentralen Aufbereitung erhebliche Vorteile. Vor allem kann ein Leitungssystem zum Sammeln und Verteilen des Grauwassers entfallen.
- Ein dezentrales Grauwasseraufbereitungs-Modul bestehend aus folgenden Komponenten wurde entwickelt: Grauwassereinheit mit Filter und Sensoren, Prefill Ventil, Drain Ventil, Wasserpumpe und Kontrolleinheit.
- Die Grauwassereinheit ist zentrales Element des Systems. In der Einheit mit einem Volumen von 2 Litern wird das Grauwasser filtriert und gespeichert. Eine Bauweise mit zylindrischem Filter erwies sich als am besten geeignet.
- In umfangreiche Langzeit-Tests mit verschiedenen Filtern konnte ein Filtermaterial gefunden werden, das eine Standzeit von 1900 Flugstunden hat.
- Die Untersuchung der Aerosolbildung - als eine der wichtigsten Gefährdungen in einer Toilettenkabine - hat ergeben, daß über einer Vakuum Toilette kein Aerosol entsteht.
- Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen haben gezeigt, daß Flugzeugvarianten mit Grauwasseraufbereitung niedrigere Betriebskosten verursachen als bestehende Flugzeuge.

Die Installation von Grauwasseraufbereitungs-Modulen hat erhebliche Auswirkungen auf Konzeption, Auslegung und Merkmale des gesamten Wassersystems eines Flugzeugs:

- Die Betriebskosten des Wassersystems können aus folgenden Gründen reduziert werden:
 - Niedrigere Kraftstoffkosten durch geringeres Abfluggewicht
 - Reduzierung der Frischwasser-Tankkapazität um 30 %
 - Grauwasserleitungen und Drain Masts können entfallen
- Flugzeuge mit Grauwasseraufbereitung sind umweltfreundlich. Grauwasser muß nicht über Drain Masts entsorgt werden. Der Kraftstoffverbrauch ist niedriger.

Schlußbericht

- Die Gefährdung einer Kontamination des Frischwassers mit Krankheitserregern aus dem Abwassersystem ist erheblich geringer, da die Verbindung zwischen Frischwasser- und Abwassersystem über das „Rinse Valve“ der Toiletten entfällt.
- Ablagerungen in Abwasserleitungen können durch seifenhaltiges Toilettenspülwasser reduziert werden
- Da die Toiletten nicht mehr als Verbraucher im Frischwassersystem auftreten, kann der Durchmesser der Versorgungsleitungen verringert werden und die Gleichzeitigkeit des Systems verbessert werden.

Die umfangreichen Auswirkungen der Grauwasseraufbereitung auf Flugzeug-Wassersysteme sowie die Integration von Grauwasseraufbereitungs-Modulen müssen weiter untersucht und Zulassungsfragen müssen geklärt werden, um Vorbehalte die gegenüber einem völlig neuen System im Flugzeug immer bestehen, auszuräumen.

Schlußbericht

4 LITERATUR / ERGÄNZENDE BERICHTE

- [1] Wohlfahrt, R. Abwasserrecycling. Literaturdokumentation, Informationszentrum Raum und Bau der Fraunhofer Gesellschaft - IRB - Stuttgart (1996) [Hrsg.]
- [2] Bork, I. Grauwasser ein diffuses Thema. Steinkeramik Sanitär (1996) H. 10, S. 50-53
- [3] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Österreich [Hrsg.] Abwasserentsorgung von Einzelobjekten in alpiner Lage, Qualitative und quantitative Erhebung des Grauwasseranfalls. Wasserwirtschaftskataster (1995) Wien.
- [4] Nolde, E. Wasserrecycling in einem 4-Sterne Hotel. Wwt, Wasserwirtschaft-Wassertechnik (1996) H. 6, S. 39-41
- [5] Kiefer, E. Wasser-Recycling, WC spülen mit Grauwasser, Moderne Hotel-Technik (1996) H. 4, S. 6-9
- [6] Peinemann, H. Eagner, D. Erste Untersuchungen zur Eignung einer neuen Kupferlegierung für den Einsatz im Bereich Recyclingwasser. Sanitär- und Heizungstechnik, 59 (1994) H. 2, S. 140-143
- [7] Nolde, E. Dott, W. Verhalten von hygienisch relevanten Bakterien und Pilzen im Grauwasser. Das Gas- und Wasserfach, Wasser Abwasser, 132 (1991) H. 3, S. 108-114
- [8] Nolde, E. Technische Regeln und Verordnungen, Bremse oder Motor der Betriebswassernutzung? In: fbr-wasserspiegel (1997) H. 1, Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e. V. Kasseler Straße 1a, 60486 Frankfurt am Main.
- [9] --- Richtlinie des Rates der Europäischen Gemeinschaften vom 08.12.1975 über die Qualität der Badegewässer (76/160/EWG) Amtsblatt der EG vom 05.02.1976 - L 31/1
- [10] Lücke, F.-K. Brauchwasserqualität, Anforderungen und Realität, Wasser Abwasserpraxis, 5 (1996) H. 3, S. 19-21
- [11] Hildebrand, R. Low-Tec für den Haushalt, Grauwasserrecycling. Gesundes Bauen und Wohnen (1987) H. 28, S. 34-36

Schlußbericht

- [12] Dott, W. Hygienisch, mikroskopische und abwassertechnische Beurteilung verschiedener Aufbereitungsverfahren zur Grauwassernutzung. TU Berlin, FB 06, Technischer Umweltschutz, Fachbereich Hygiene. Forschungsvorhaben Berlin (1988-1990)
- [13] Kayser, R. Probleme und Grenzen der Nutzung von Wasch- und Badeabwasser zur WC-Spülung. TU Braunschweig, Siedlungswasserwirtschaft, Förderkennzeichen 10202611 (1989-1990)
- [14] Dott, W. Substitution von Trinkwasser durch die Nutzung von Betriebswasser im Haushalt - eine sinnvolle Maßnahme? TU Berlin, FB 06, Technischer Umweltschutz, Fachbereich Hygiene. Forschungsvorhaben Berlin (1991 - 1993)
- [15] Hegemann, W. Integriertes Wasserkonzept zur dezentralen Abwasserentsorgung durch eine Pflanzenkläranlage. Teilprojekt C, TU Berlin, Siedlungswasserwirtschaft, Forschungsprojekt (1990-1993)
- [16] Jeppesen, B. domestic greywater re-use, Australia's challenge for the future. Desalination, 106 (1996) H. 1-3, S. 311-315
- [17] Imura, M.
Sato, Y.
u.a. Development of a high-efficiency household biofilm reactor. Water Science and Technology, 31 (1995) H. 9, S. 163-171
- [18] Oppenlander, T.
Baum, G. Wasseraufbereitung mit Vakuum-UV/UV Eximer-Durchflußphotoreaktoren. Das Gas- und Wasserfach, Wasser-Abwasser 137 (1996) H. 6, S. 321-325
- [19] Friedman, M.A.
Styczynski, T.E. Grey water recycling with a unique vapour compression distillation. SAE Technical Paper Series, Warrendale, PA, USA, 921318, S. 1-8
- [20] Lorch, H.-J. Bakteriologische und chemische Bewertungsmaßstäbe für die Regenwassernutzung. Gwf, Wasser-Abwasser, 137 (1996) H. 3, S. 133-139
- [21] Dott, W. Hygienische Beurteilung der Grauwassernutzung. TU Berlin, FB 06, Technischer Umweltschutz, Fachbereich Hygiene. [Hrsg.] Berlin (1996)
- [22] Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen [Hrsg.] Der Block 103 in Berlin-Kreuzberg, Ein städtebauliches und ökologisches Modelvorhaben. Städtebau und Architektur, 28 (1994) 70 S.
- [23] Gesellschaft Stadterneuerung Berlin Theorie und Praxis, Ökologie in der Görlitzer Straße 39. S.T.E.R.N. GmbH, Dokumentation, Internationale Bauausstellung

Schlußbericht

- [Hrsg.] Berlin (1986)
- [24] Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen [Hrsg.] Merkblatt „Betriebswassernutzung in Gebäuden“. Auswertung der Berliner Modelvorhaben. Selbstverlag (1995)
- [25] Kollbach, J.-St. Haeske, J. Schilling, St. Planerische Aspekte bei Membrananlagen zur Wasseraufbereitung; in: Rautenbach, R. u.a.: Möglichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung, Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, RWTH Aachen, 30. Juni - 1. Juli 1997.
- [26] Liebeskind, M. Mikrobiologische Aspekte beim Einsatz der Membrantechnologie; in: Rautenbach, R. u.a.: Möglichkeiten und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung, Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, RWTH Aachen, 30. Juni - 1. Juli 1997
- [27] Flemming, H.-C. Biofouling bei Membranprozessen. Springer Verlag, Berlin (1995)
- [28] Rautenbach, R. Melin, T. Dohmann, M. [Hrsg.] Möglichkeit und Perspektiven der Membrantechnik bei der kommunalen Abwasserbehandlung und Trinkwasseraufbereitung. 1. Aachener Tagung, Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, RWTH Aachen, 30. Juni - 1. Juli 1997.
- [29] Henze, M. Waste design for households with respect to water, organics and nutrients. Wat.Sci.Tech, 35 (1997) H. 9, s. 113-120
- [30] Grassmann, P. Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik Verlag Salle + Sauerländer (1982) S. 322
- [31] Public Health Service Handbook on Sanitation of Aviation

Schlußbericht

ERGÄNZENDE BERICHTE ZUM SCHLUSSBERICHT

- | | | |
|--------|---------------------|--|
| [32] | Universität München | Bestimmungen der Aerosolbildung an einem Toilettenkabinenteststand |
| [33] | Applied Science | Betriebskostenrechnung für Wassersysteme in Großraumflugzeugen |



ANLAGEN

1. Bestimmung der Aerosolbildung an einem Toilettenkabinenteststand

erstellt für MAN Technologie AG im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogrammes 1 vom Institut für Wasserchemie und chemische Balneologie, Lehrstuhl für Hydrochemie der technischen Universität München.

2. Betriebskostenberechnung für Wassersysteme in Großraumflugzeugen

erstellt für MAN Technologie AG im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogrammes 1 von Applied Science, Dieter Scholz.



[32]

BESTIMMUNG DER AEROSOLBIDUNG AN EINEM TOILETTENKABINENTSTAND

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-----|-------------------------------|---|
| 1 | Einleitung | 2 |
| 2 | Theoretische Grundlagen | 2 |
| 3 | Versuchsaufbau | 4 |
| 4 | Ergebnisse | 4 |
| 4.1 | Kabinenmessungen | 4 |
| 4.2 | Vergleichsmessungen | 7 |
| 5 | Zusammenfassung | 8 |

1 EINLEITUNG

Da die Vernebelung von Flüssigkeiten, in denen Feststoffe gelöst oder suspendiert sind, zur Bildung von Aerosolen führen kann [1], könnte auch bei der Spülung einer Toilette Aerosol entstehen. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des zur Spülung benutzten Grauwassers können sich an Unebenheiten der Schüssel oder durch das "Aufeinanderprallen" von Strömungsprofilen entgegengesetzter Richtung partikelhaltige Tröpfchen ablösen; nach der Verdampfung des Wassers bleiben fein dispergierte Partikel in der Luft zurück.

Da feine inhalierte Partikel ($d_p < 1 \mu\text{m}$) bis in die Alveolen vordringen können, ist durch die eventuell als toxisch oder pathogen einzustufenden Substanzen nach Deposition im Lungentrakt mit einer Gefährdung zu rechnen [2]. Eine Diskussion von epidemiologischen Studien über die gesundheitlichen Risiken luftgetragener Partikel gibt [3].

Die Vorgabe für die durchzuführenden Untersuchungen lautete, während eines Spülvorganges einer Flugzeugtoilette die Aerosolbildung innerhalb der Toilettenkabine zu bestimmen und gegebenenfalls zu charakterisieren. Die Messungen erfolgten an einem Teststand der Firma MAN Technologie AG in Karlsfeld. Die Aussagekraft der gemessenen Daten sollte durch einen Vergleich des Teststandes mit einer herkömmlichen Haushaltstoilette gesteigert werden.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die Bestimmung der Anzahlkonzentration von in Luft dispergierten Schwebstoffen, sogenannten Aerosolen, erfolgt üblicherweise mit einem Kondensationskernzähler (CNC, condensation nucleus counter) [4]. Ein CNC ist ein kontinuierlich arbeitender optischer Partikelzähler, in dessen Innerem Partikel mit Durchmessern $d_p < 1 \mu\text{m}$ durch heterogene Kondensation mit n-Butanol auf einige μm vergrößert werden, so daß diese durch einen konventionellen Streulichtdetektor erfaßt werden können (Transmissionsmessung). Der schematische Aufbau eines CNC ist in Abbildung 1 dargestellt.

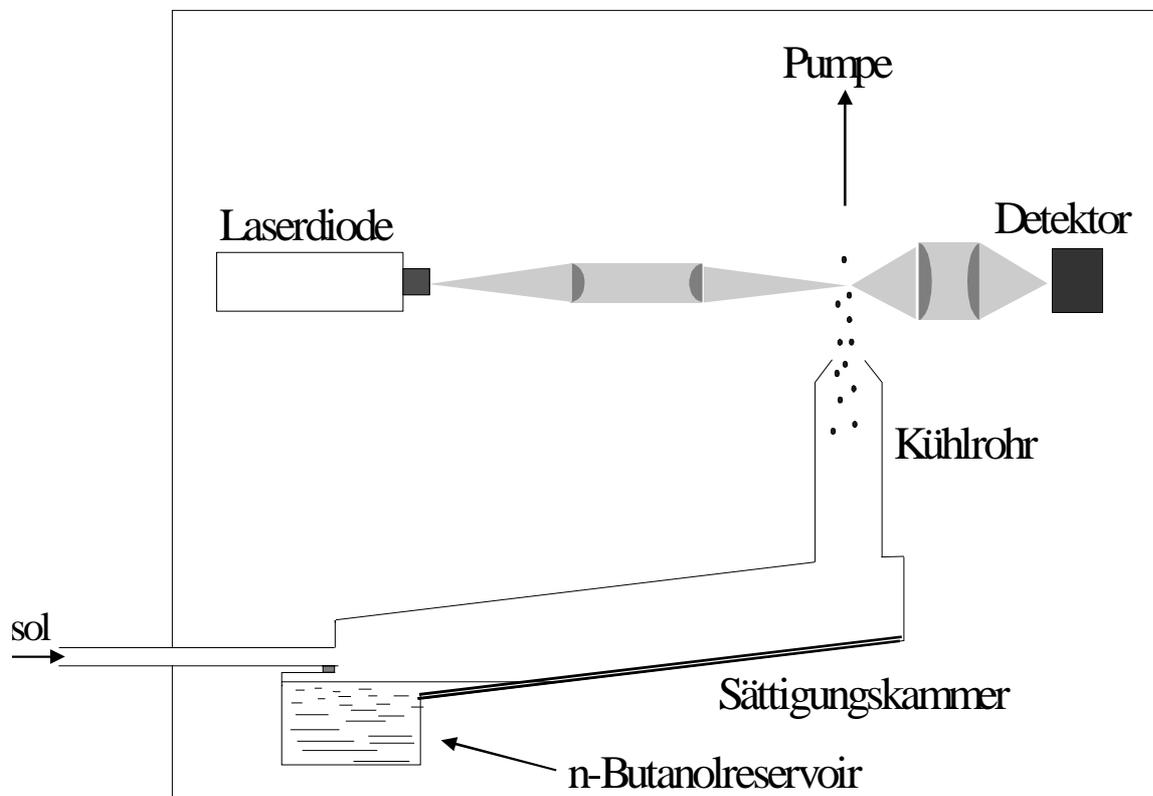


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines CNC (TSI-Typ).

Die Partikel / n-Butanol-Tröpfchen passieren einen gebündelten Lichtstrahl (beim verwendeten Modell TSI CNC 3025 ist dies eine Laserdiode) und das entstehende Streulicht wird auf einen Photodetektor fokussiert, der aus der Intensität des ankommenden Lichtstrahls einen proportionalen elektrischen Spannungspuls induziert. Durch die interne Pumpe wird der Aerosolfluß konstant gehalten (0.3 l min^{-1}), so daß aus dem Detektorsignal eine Partikelanzahlkonzentration bestimmt werden kann.

Weitere Details zur Beschreibung des verwendeten CNC sind [5] zu entnehmen.



3 VERSUCHSAUFBAU

Der Teststand besteht aus einer Toilette inklusive originalgetreuer Spülvorrichtung in einer Toilettenkabine mit einem Volumen von ca. 2100 l (Kabinenvolumen abzüglich des Waschvorrichtungsvolumens). Die zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration erforderliche Probenahme wurde an verschiedenen Raumpunkten im Bereich der Toilettenschüssel und innerhalb der Kabine durchgeführt.

Die interne Pumpe des CNC saugt durch einen antistatischen Probenahmeschlauch (TYGON®) das Aerosol an. Der Probenahmeschlauch wird mittels Stativ an verschiedenen Raumpunkten fixiert, so daß die eventuelle Bildung eines Aerosols durch den Spülvorgang im gesamten Raum erfaßt werden kann. Eine Datenerfassungseinheit zeichnet die von der seriellen Schnittstelle des CNC gelieferten Meßwerte zeitabhängig auf.

4 ERGEBNISSE

4.1 Kabinenmessungen

Bei sämtlichen Messungen wurden zur Bestimmung der Aerosolkonzentration innerhalb der Kabine Messwerte über einen Zeitraum von jeweils 30 s aufgenommen, bevor die Spülung computergesteuert ausgelöst wurde (Hintergrundmessung). Die Dauer des Grauwasserausstoßes zur Spülung der Toilettenschüssel betrug 2 s. Danach wurde durch eine Vakuumpumpe das Wasser 5 s in einen Sammelbehälter gesaugt. Abschließend wurde bei jeder Messung erneut die Aerosolkonzentration für 30 s gemessen. Die Datenerfassungseinheit lieferte in Abständen von 2 s jeweils die Partikelanzahlkonzentration [cm^{-3}].

In den Abbildungen 2 – 5 sind die Meßwerte für verschiedene Raumpunkte gegen die Zeit aufgetragen. Die relativen Koordinaten der Raumpunkte bezüglich des ovalen oberen Schüsselrandes (Abmessungen: X = 32,6 cm, Y = 37,6 cm, Z = 0 cm) sind in Tabelle 1 aufgelistet.

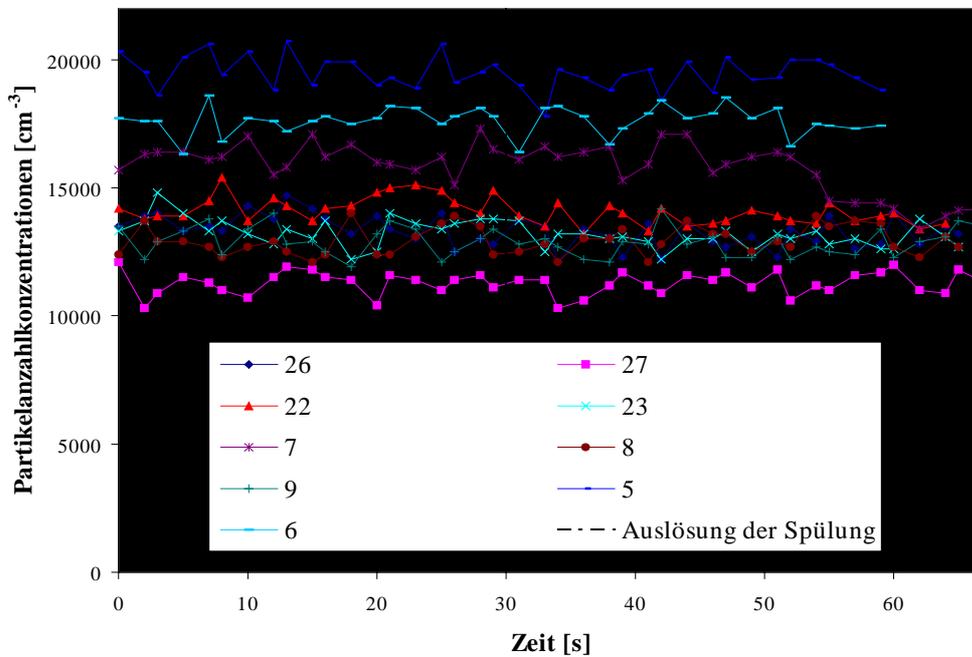


Abb. 2: Partikelanzahlkonzentrationen an verschiedenen Punkten auf Höhe des oberen Schüsselrandes .

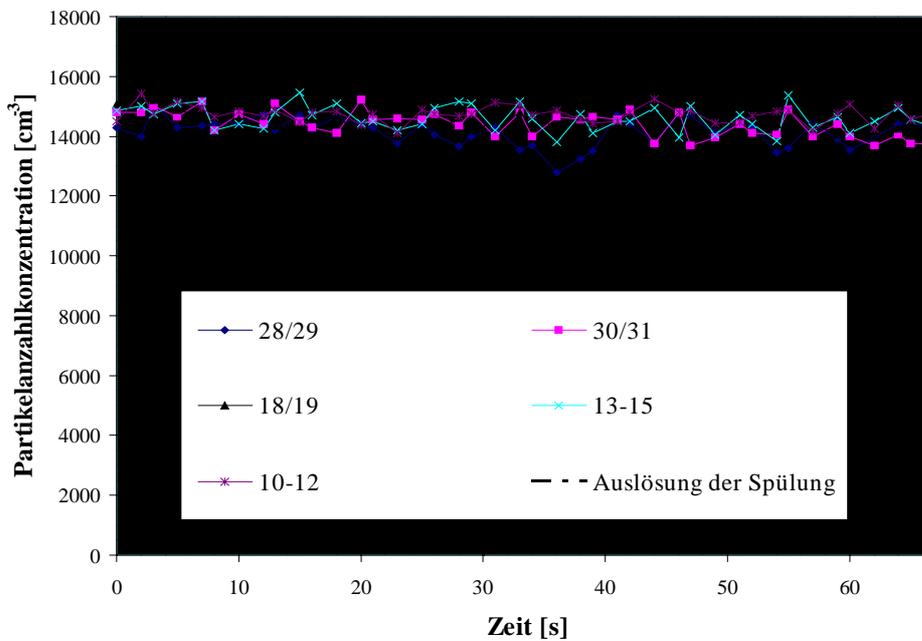


Abb. 3: Partikelanzahlkonzentrationen an verschiedenen Punkten oberhalb derToilettenschüssel.

Schlußbericht

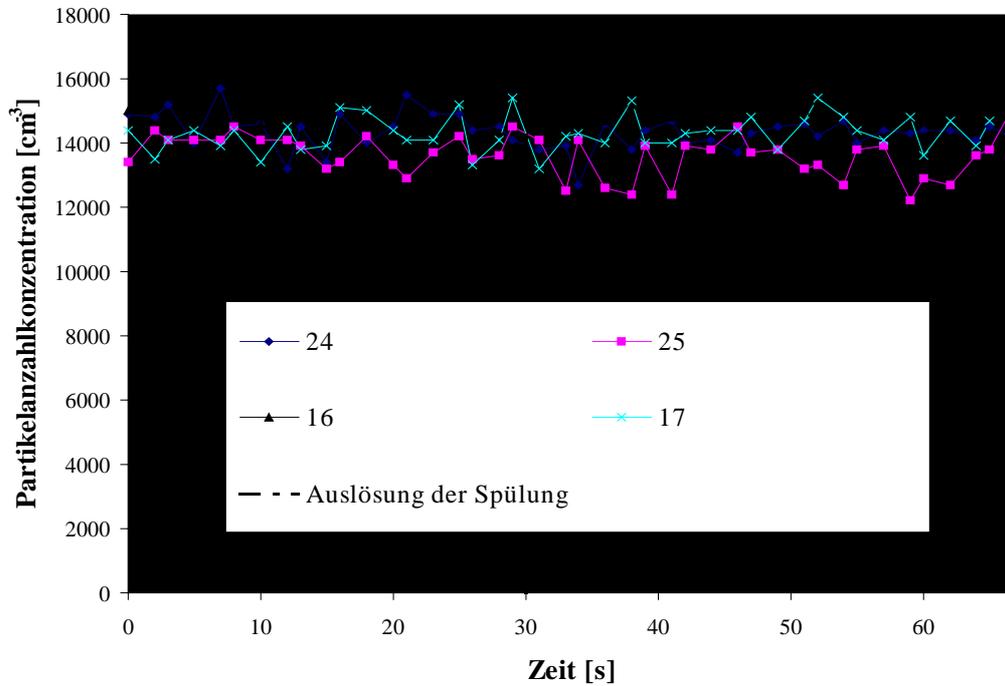


Abb. 4: Partikelanzahlkonzentrationen an verschiedenen Punkten unterhalb des oberen Schüsselrandes.

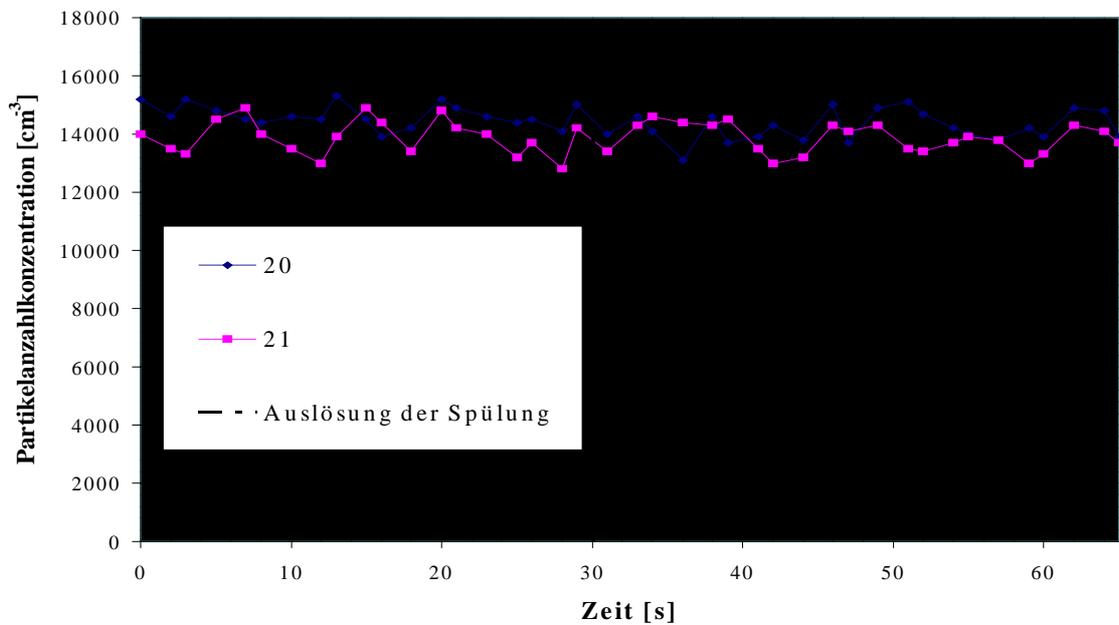


Abb. 5: Partikelanzahlkonzentrationen innerhalb der Kabine, 1 m von der Toilettenschüssel entfernt.

Schlußbericht

| Messung-Nr. | X [cm] | Y [cm] | Z [cm] |
|-------------|--------|--------|-----------|
| 5, 6 | 16,3 | 18,8 | 0,0 |
| 7 - 9 | 16,3 | 32,0 | 0,0 |
| 10 - 12 | 16,3 | 17,5 | 7,0 |
| 13 - 15 | 5,0 | 18,5 | 3,0 |
| 16, 17 | 16,3 | 35,0 | - 8,0 |
| 18, 19 | 16,3 | 9,5 | 20,0 |
| 22, 23 | 26,0 | 19,5 | 0,0 |
| 24, 25 | 16,3 | 32,5 | Am Auslaß |
| 26, 27 | 4,0 | 25,5 | 0,0 |
| 28, 29 | 22,0 | 12,0 | 4,5 |
| 30, 31 | 22,0 | 12,0 | 16,0 |

Tabelle 1 Koordinaten der Raumpunkte des Probenahmeschlauches relativ zum oberen Schüsselrand.

4.2 Vergleichsmessungen

Die Vergleichsmessungen wurden an einer herkömmlichen Toilette am Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie der TU München durchgeführt. Abbildung 6 zeigt als Ergebnis die Partikelanzahlkonzentrationen an 3 verschiedenen Raumpunkten. Die Meßreihen enthalten hier jeweils zwei Spülvorgänge im Abstand von 20, bzw. 40 s. Da dieser Teil der Messungen nur als qualitativer Vergleich dienen soll, wurden keine weiteren Charakterisierungen hinsichtlich des entstehenden Aerosols in räumlicher und zeitlicher Auflösung vorgenommen.

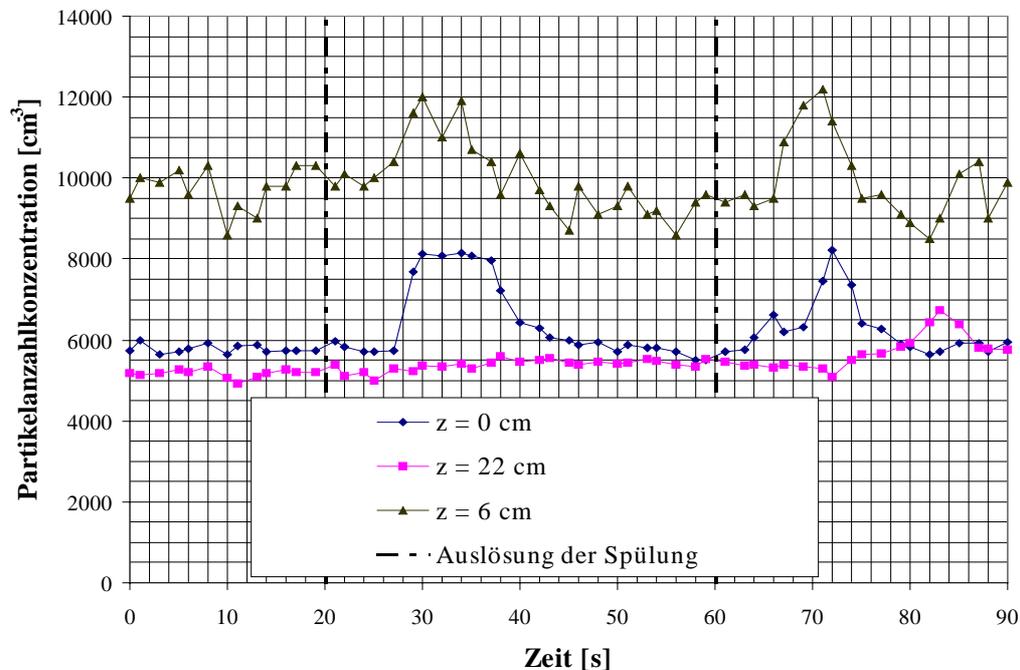


Abb. 6: Übersicht über die Partikelanzahlkonzentrationen der Vergleichsmessungen mit $z =$ Vertikaler Abstand des Probenahmeschlauches vom oberen Schüsselrand.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Messungen zeigen, daß sowohl innerhalb der Toilettenkabine des Teststandes als auch im Bereich der Toilettenschüssel kein Aerosolanstieg nach dem Auslösen der Spülung (bei $t = 30 \text{ s}$) beobachtet werden kann. Bei herkömmlichen Toiletten ist jedoch ein Aerosolanstieg von ca. 2000 Partikeln pro cm^3 im näheren Bereich der Schüsseloberfläche zu erfassen.

Da der zu untersuchende Teststand im Gegensatz zu einer herkömmlichen Haushaltstoilette demnach kein erfaßbares Aerosol erzeugt, sind keinerlei weitere Messungen hinsichtlich physikalisch-chemischer Charakterisierung des Aerosols notwendig.



6 LITERATUR

- [1] Hinds, W. C., *Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley & Sons, New York, **1982**.
- [2] Marquardt, H. und Schäfer, S. G., *Lehrbuch der Toxikologie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, **1997**.
- [3] Reichhardt, T., "Weighing the Health Risks of Airborne Particulates." Environ. Sci. Technol. (29) 360A - 364A, **1995**.
- [4] Liu, B. Y. H., Pui, D. Y. H., McKenzie, R. L., Agarwal, J. K., Jaenicke, R., Pohl, F. G., Preining, O., Reischl, G. P., Szymanski, W. W. und Wagner, P. E., "Intercomparison of Different "Absolute" Instruments for Measurement of Aerosol Number Concentration." J. Aerosol Sci. (13) 429 - 450, **1982**.
- [5] Agarwal, J. K. und Sem, G. J., "Continuous Flow, Single-Particle-Counting Condensation Nucleus Counter." J. Aerosol Sci. (11) 343 - 357, **1980**.

[33]

**BETRIEBSKOSTENBERECHNUNG FÜR
WASSERSYSTEME IN GROßRAUMFLUGZEUGEN**

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Voraussetzungen | 2 |
| 2 | Betriebskosten von Flugzeugsystemen | 4 |
| 3 | Kostenelemente bei Wassersystemen | 11 |
| 4 | Variable und fixe Massen | 14 |
| 5 | Systempreis und Abschreibungsmodell..... | 20 |
| 6 | Kraftstoffpreis..... | 21 |
| 7 | Durchschnittliche Flugzeit und Flugzeugnutzung | 22 |
| 8 | Flugtechnische Daten | 24 |
| 9 | Berechnungsergebnisse..... | 26 |
| 10 | Sensitivitäten..... | 29 |
| 11 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 32 |
| 12 | Literaturverzeichnis | 34 |



Schlußbericht

1 VORAUSSETZUNGEN

Das Wassersystem (genauer: Wasser-/Abwassersystem) eines Flugzeugs wird nach Definition der Air Transport Association of America (ATA) nach [ATA 94] mit „Water/Waste“ bzw. „ATA-Chapter 38“ bezeichnet. Das Wasser-/Abwassersystem hat die Aufgabe

- Frischwasser in Toiletten (Lavatories) und Küchen (Galleys) zur Verfügung zu stellen,
- Fluide und Abfallprodukte in den Fluiden aus Toiletten und Küchen zu entsorgen.

Vier verschiedene Konzepte (Varianten) des Wassersystems werden in dieser Arbeit einander gegenübergestellt. Die untersuchten Varianten der Wassersysteme zusammen mit den für diese Varianten eingeführten Kurzbezeichnungen enthält Tabelle 1.1.

Tabelle 1.1 Untersuchte Systemvarianten und eingeführte Kurzbezeichnungen

| | |
|---|--|
| A | Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast (Referenzlösung) |
| B | Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast |
| C | Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast |
| D | Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast |

Tabelle 1.2 Definition von Begriffen

| | |
|---|--|
| Frischwasser | Trinkwasser welches sich in den Frischwassertanks befindet. Das Frischwasser / Trinkwasser kann den Wasserhähnen an den Handwaschbecken in den Toiletten oder in den Küchen (Galleys) entnommen werden |
| Händewaschwasser | Wasser welches aus den Handwaschbecken abfließt |
| Küchenwasser | Wasser welches aus den Küchen abfließt |
| Grauwasser | Händewaschwasser und/oder Küchenwasser |
| Toilettenspülwasser | Wasser welches zur Toilettenspülung eingesetzt wird |
| Abwasser | der Inhalt der Abwassertanks |
| Drain Mast | (beheizter) Auslaß zum Ableiten des Grauwassers über Bord |
| Grauwassersystem | Drainagesystem einschließlich Drain Mast zum Ableiten des Grauwassers über Bord |
| Grauwasseraufbereitungs- -anlage | Anlage zur Aufbereitung von Grauwasser (hier: des Händewaschwassers) zu Toilettenspülwasser |

Die technischen Details der untersuchten Konzepte werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Für das weitere Verständnis ist die Definition einiger Begriffe (Tabelle 1.2) und die Kenntnis des Grundprinzips der Varianten (Tabelle 1.3) ausreichend.



Schlußbericht

Tabelle 1.3 Das Grundprinzip der untersuchten Systemvarianten

| Systemvariante | Grundprinzip |
|--|---|
| Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast | Grauwasser verläßt das Flugzeug über das Grauwassersystem, Toilettenspülwasser (aus Frischwasser) und Fäkalien werden in den Abwassertanks gesammelt |
| Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast | Grauwasser, Toilettenspülwasser (aus Frischwasser) und Fäkalien werden in den Abwassertanks gesammelt |
| Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast | Toilettenspülwasser wird mittels Grauwasseraufbereitungsanlage gewonnen. Dabei überschüssiges Händewaschwasser und das Küchenwasser verlassen das Flugzeug über den Drain Mast. Gewonnenes Toilettenspülwasser und Fäkalien werden in den Abwassertanks gesammelt |
| Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast | Alles Grauwasser (teilweise zwischenzeitlich genutzt als Toilettenspülwasser) und Fäkalien werden in den Abwassertanks gesammelt |

In dieser Arbeit wird unter dem Stichwort **Wassersystem** („untersuchtes Wassersystem“) im Gegensatz zur ATA-Definition lediglich ein System verstanden bestehend aus

- den Frischwassertanks,
- den Abwassertanks,
- gegebenenfalls dem Grauwassersystem,
- gegebenenfalls der Grauwasseraufbereitungsanlage.

Weiterhin wird die Masse des Wassers bei der Berechnung der Betriebskosten berücksichtigt soweit es sich in den Frischwassertanks (zu Beginn des Fluges) bzw. Auch in den Abwassertanks (zunehmend gegen Ende des Fluges) befindet.

Es werden folglich nicht alle ATA 38-Komponenten berücksichtigt, sondern nur die Komponenten, in denen sich die untersuchten Varianten unterscheiden. Dieses Vorgehen reicht für einen Vergleich der Varianten aus. Die Höhe der berechneten Betriebskosten entspricht demnach *nicht* den Kosten zum Betrieb von ATA 38, sondern denen verursacht durch das „untersuchte Wassersystem“ mit seinen willkürlich - aber zweckmäßig - festgelegten Systemgrenzen.

Die Berechnung der Betriebskosten soll dazu beitragen, eine objektivierte **Auswahl des besten Konzeptes** zu treffen. Weiterhin können die Auswirkungen geänderter Massen des Systems sowie unterschiedlicher Systempreise auf die Betriebskosten aufgezeigt werden.

Berechnet werden **Kostenbestandteile der direkten Betriebskosten** (Direct Operating Costs, **DOC**) des Wassersystems („untersuchtes Wassersystem“, wie oben definiert) aus Sicht einer Luftverkehrsgesellschaft, die ein Flugzeug mit einer der untersuchten Systemvarianten betreibt. Unter Berücksichtigung der im Vorprojekt vorliegenden Daten werden in dieser Arbeit **nur zwei der drei wesentlichen Kostenbestandteile** der direkten Betriebskosten **berücksichtigt**

- *Abschreibung* und
- *Kraftstoffkosten* verursacht dadurch, daß Systemmassen und Wasser während des Fluges in der Luft gehalten werden müssen.

Der erfahrungsgemäß dritte wichtige Kostenbestandteil der direkten Betriebskosten: die *Wartungskosten* können in dieser Arbeit noch nicht berücksichtigt werden. Abschnitt 3 geht qualitativ

Schlußbericht

jedoch auf alle Kostenelemente der direkten Betriebskosten von Flugzeugsystemen ein. Indirekte Betriebskosten (Indirect Operating Costs, **IOC**) lassen definitionsgemäß keinen Schluß auf das untersuchte Flugzeug, Flugzeugsystem oder -teilsystem zu, und brauchen daher nicht betrachtet zu werden¹.

Anmerkung:

- 1.) Direkte Betriebskosten von Flugzeugsystemen, teilsystemen oder Komponenten werden gelegentlich auch als *Cost Of Ownership (COO)* bezeichnet. Da mit COO unter Umständen jedoch nur die Kosten für den *Besitz* - nicht jedoch für die *Nutzung* - eines Flugzeugs, Flugzeugsystems oder -teilsystems gemeint sind, ist in jedem Fall die Definition der angegebener COO zu überprüfen.
- 2.) Zur begrifflichen Trennung wird zwischen DOC und DOC_{SYS} unterschieden:
 - ohne weitere Erklärungen sind mit DOC die direkten Betriebskosten gemeint, berechnet für das gesamte Flugzeug,
 - mit DOC_{SYS} sind direkte Betriebskosten gemeint, berechnet lediglich für Flugzeugsysteme oder -teilsysteme.

Die betrachteten **Großraumflugzeuge** sind der Airbus A340-200 (als Referenz), der Airbus A340-600 (wobei unterstellt wird, das die Wassersystem-Varianten konzipiert für die A340-200 identisch auf die A340-600 übernommen werden) und das durch die Airbus-Partner untersuchte Flugzeugprojekt für sehr hohe Passagierzahlen - hier genannt: Megaliner.

2 BETRIEBSKOSTEN VON FLUGZEUGSYSTEMEN

Nach Definition der Air Transport Association of America [ATA 67] enthalten die **DOC des gesamten Flugzeugs** nur flugzeugabhängige Kosten. Aufgegliedert wird in Kosten verursacht durch

- Cockpitbesatzung,
- Kraftstoff (Variable: *Fuel*),
- Wartung (Variable: *DMC*, Direct Maintenance Costs),
- Abschreibung (Variable: *Depr*),
- Versicherung.

Bei den DOC für Flugzeugsysteme - bei den DOC_{SYS} - sind die Kosten für die **Cockpitbesatzung** ein fester Betrag (solange nicht durch die Art der Systeme die Anzahl der Besatzungsmitglieder verändert wird). Aus diesem Grund sollen die Kosten der Cockpitbesatzung hier nicht den DOC der Systeme zugeschlagen werden. Trainingskosten für die Cockpitbesatzung bzw. Das Wartungspersonal gehören traditionell nicht zu den DOC und werden daher ebenfalls nicht in den DOC_{SYS} erfaßt. Kosten für die **Versicherung** des Flugzeugs gegen Beschädigung oder Verlust sind abhängig vom Flugzeugpreis und damit auch vom Preis der Flugzeugsysteme. Nach [ROSKAM 90] betragen sie nur etwa 2% der DOC. Unterschiedliche Gestaltungen von Versicherungsbedingungen können zu stark unterschiedlichen Versicherungskosten führen. Hier werden die Versicherungskosten aufgrund der geringen Bedeutung vernachlässigt, anstatt einer pauschalen Berücksichtigung durch einem Prozentsatz der Anschaffungskosten oder der Analyse individueller Versicherungsbedingungen. Damit können die **Kostenelemente** der direk-

¹ DOC sollten nach [BODERGRAVEN 90] nur flugzeugabhängige Kosten enthalten. IOC dagegen nur passagierabhängige Kosten.

Schlußbericht

ten Betriebskosten von Flugzeugsystemen als DOC_{SYS} in Anlehnung an [ATA 67] definiert werden:

$$DOC_{SYS} = Depr_{SYS} + Fuel_{SYS} + DMC_{SYS} \quad . \quad (2.1)$$

Bei Flugzeugsystemen spielen über die drei Kostenelemente der Gleichung (2.1) hinaus, im Zusammenhang mit der Flugzeugwartung, **weitere Kostenelemente** eine Rolle:

- *Verspätungskosten* einschließlich der Kosten für Flugabsagen verursacht durch das untersuchte Flugzeugsystem (Variable: *Delay*).
- *Ersatzteilbevorratungskosten* berechnet aus der Verzinsung des gebundenen Kapitals der Ersatzteile am Lager. Andere Lagerhaltungskosten können nicht als 'rein flugzeugabhängig' angesehen werden und bleiben daher hier bei der Berechnung der direkten Betriebskosten unberücksichtigt. (Variable: *SHC*, Spare Holding Costs)

Damit können direkte Betriebskosten von Flugzeugsystemen als **erweiterte DOC_{SYS}** definiert werden:

$$DOC_{SYS,erw} = Depr_{SYS} + Fuel_{SYS} + DMC_{SYS} + Delay_{SYS} + SHC_{SYS} \quad . \quad (2.2)$$

Die DOC_{SYS} werden hier berechnet für ein Flugzeug im Betrieb während eines Jahres (Einheit: US\$ / Flugzeug / Jahr). Eine Umrechnung der DOC_{SYS} in jede andere für DOC übliche Einheit ist natürlich möglich.

Abschreibung

Technisch begründete Abschreibungskosten entstehen aus einer Mischung von zeitlicher und gebrauchsbewingter Abnutzung. In welchem Maße ein Flugzeugsystem einerseits zeitlicher bzw. Andererseits gebrauchsbewingter Abnutzung unterliegt hängt vom Verschleißverhalten des Systems ab. **Zeitlich bedingte Abschreibung** ergibt sich aus

- Systempreis (Variable: *Price*),
- Restwert (Variable: *Residual*),
- Nutzungsdauer *N* in Jahren.

Der gebrauchsbewingte Abschreibungsanteil wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Für eine zeitlich bedingte lineare Abschreibung von Flugzeugsystemen gilt

$$Depr_{SYS} = \frac{Price - Residual}{N} \quad . \quad (2.3)$$

Der Index „SYS“ wird nun zur Vereinfachung der Schreibweise in dieser und den folgenden untergeordneten Gleichungen fallen gelassen.

Kraftstoffkosten $Fuel_{SYS}$

Die für Flugzeugsysteme *antelligen* Kraftstoffkosten werden hier getrennt, entsprechend ihrer physikalischen Ursache (Index: *X*) berechnet. Diese getrennte Darstellung soll eine detailliertere Interpretation der DOC_{SYS} ermöglichen. Es werden verschiedene **Kraftstoffverbrauchsursachen** unterschieden: Kraftstoffkosten für

- den Transport von Systemmassen

Schlußbericht

- konstanter Größe ('feste Massen'), Index: $X = mf$;
- den Transport von Systemmassen, die sich
- während des Fluges ändern ('variable Massen'), Index: $X = mv$;
- Wellenleistungsentnahme vom Triebwerk, Index: $X = P$;
- Zapfluentnahme vom Triebwerk, Index: $X = B$;
- Stauluftbedarf, Index: $X = R$;

$$Fuel_{sys} = Fuel_{mf} + Fuel_{mv} + Fuel_P + Fuel_B + Fuel_R \quad . \quad (2.4)$$

Die einzelnen Kraftstoffkosten $Fuel_X$ sind abhängig vom jeweiligen Kraftstoffverbrauch pro Flug und Ursache ($m_{fuel, X}$), dem Kraftstoffpreis (Variable: $FuelPrice$) und der Anzahl der Flüge pro Jahr (Variable: NFY , Number of Flights per Year):

$$Fuel_X = m_{fuel, X} \cdot FuelPrice \cdot NFY \quad . \quad (2.5)$$

Berechnung des Kraftstoffverbrauchs getrennt nach Flugphase und Ursache

Der Kraftstoffverbrauch verursacht durch Wellenleistungsentnahme „ $X = P$ “, Zapfluft „ $X = B$ “, Luftwiderstand „ $X = D$ “ oder Stauluftbedarf „ $X = R$ “ während einer Flugphase i besteht einerseits aus dem erforderlichen Kraftstoff für diese geforderten Leistungen $m_{fuel, i, X, f}$ (Index: f für 'fuel') und andererseits aus Kraftstoff, der für den Transport dieser Kraftstoffmassen während vorangehender Flugphasen mitgeführt werden muß $m_{fuel, i, X, m}$ (Index: m für 'fuel for mass of fuel')

$$m_{fuel, i, X} = m_{fuel, i, X, m} + m_{fuel, i, X, f} \quad \text{für } X = P, B, D, R \quad . \quad (2.6)$$

Für feste und variable Systemmassen (Index: „ mf „ und „ mv “) existiert ein $m_{fuel, i, X, f}$ naturgemäß nicht

$$m_{fuel, i, X} = m_{fuel, i, X, m} \quad \text{für } X = mf, mv \quad . \quad (2.7)$$

Folgende **Flugphasen** i sollen hier berücksichtigt werden:

- i = 1:** Start und Warmlauf der Triebwerke,
- i = 2:** Rollen,
- i = 3:** Start,
- i = 4:** Steigflug,
- i = 5:** Reiseflug,
- i = 6:** Sinkflug,
- i = 7:** Landung, Rollen, Abstellen.

Die Masse am *Ende* der Flugphase Nr. 7 (Landung, Rollen, Abstellen) sei mit m_7 bezeichnet. Diese Masse ist die Masse des Flugzeugsystems gebildet aus der Summe der Massen Komponenten, die zum System gezählt werden m_{komp} - evtl. zuzüglich der Masse von nicht verbrauchten Betriebsstoffen (z.B. nicht verbrauchtes Frischwasser!). Diese Masse wird hier als feste Flugzeugsystemmasse (mf) bezeichnet. Kraftstoff, der zum Transport der Systemmasse und zum Betrieb der Systeme mitgenommen werden mußte, ist zu diesem Zeitpunkt per Definition bereits verbraucht:



Schlußbericht

$$m_7 = m_{7,mf} = m_{fix}$$

$$m_{7,(X \neq mf)} = 0 \quad . \quad (2.8)$$

Die Massen am *Ende* der Flugphase Nr. 6 (Sinkflug) für die jeweilige Ursache X ($m_{6,X}$) beinhaltet die Massen am *Ende* der nachfolgenden Flugphase Nr. 7 ($m_{7,X}$), sowie die Kraftstoffmasse, die *während* der Flugphase Nr. 7 für die jeweilige Ursachen „“ erforderlich ist ($m_{fuel,7,X}$):

$$m_{6,X} = m_{7,X} + m_{fuel,7,X} \quad . \quad (2.9)$$

Eine entsprechende Betrachtung ließe sich anstellen für die Massen am *Ende* der Flugphasen Nr. 5 bis Nr. 1. Allgemein gilt für alle Flugphasen i und alle Ursachen *außer* für variable Systemmassen

$$m_{(i),X} = m_{i,X} + m_{fuel,i,X} \quad \text{für } X = mf, P, B, D, R \quad . \quad (2.10)$$

Für variable Flugzeugsystemmassen (Index: „mv“) bei konstantem Verbrauch $\dot{m}_{i,mv}$ der Dauer t_i während der Flugphase i gilt hingegen

$$m_{(i),mv} = m_{i,mv} + \dot{m}_{i,mv} \cdot \tau_i + m_{fuel,i,mv} \quad . \quad (2.11)$$

$$m_{fuel,X} = \sum_{i=1}^7 m_{fuel,i,X} \quad . \quad (2.12)$$

Eine Berechnung des Kraftstoffverbrauchs beginnt also zweckmäßigerweise am Ende des Fluges ($i=7$) von dem aus schrittweise zum Beginn des Fluges ($i=1$) vorgearbeitet wird. Der gesamte für eine Ursache „X“ verbrauchte Kraftstoff während eines Fluges ist Die Massenverhältnisse

$$\frac{m_{i,X}}{m_{(i),X}} = \frac{m_{i,X}}{m_{i,X} + m_{fuel,i,X}} \quad (2.13)$$

werden in Anlehnung an z.B. [RAYMER 89] *mission segment weight fractions* genannt und sind aus der Erfahrung des Flugzeugentwurfs für den Transport von fixen Massen bekannt. Der Kraftstoffverbrauch in den **Flugphasen $i = 1, 2, 3, 7$** wird hier mit Hilfe dieser aus der Erfahrung bekannten **weight fractions** also den Größen m_i / m_{i-1} nach Tabelle 3.1 berechnet. Die Werte der Tabelle 3.1 basieren auf Angaben in [ROSKAM 90] und wurden auf Flugzeugsysteme angepaßt. Die notwendige Anpassung wird in [SCHOLZ 95] diskutiert. Die Massenverhältnisse werden für die Flugphasen $i=1, 2, 3, 7$ näherungsweise auch für andere Kraftstoffverbrauchsursachen als feste Massen - also auch für X^1 *mf* - genutzt.

Tabelle 2.1: Vorgeschlagene Werte für die Massenverhältnisse m_i / m_{i-1} für Flugzeugsysteme nach Gleichung (2.13)

| Flugphase | 1 | 2 | 3 | 7 |
|-----------------|---|---|-------|-------|
| m_i / m_{i-1} | 1 | 1 | 0,995 | 0,996 |

Schlußbericht

Kraftstoffverbräuche können dann bei bekannten Massenverhältnissen m_i / m_{i-1} für die Flugphasen $i = 1, 2, 3, 7$ berechnet werden mit

$$m_{fuel,i,X} = m_{i,X} \left(\frac{m_{(i),X}}{m_{i,X}} - 1 \right) . \quad (2.14)$$

Die Kraftstoffverbräuche werden hier für die **Flugphasen $i = 4, 5, 6$** für jede Ursache „X“ gemeinsam in einer Gleichung behandelt und hergeleitet. Zur Berechnung wird ein Ansatz gemäß der **Reichweitenformel nach Breguet** (vergleiche z.B. [RAYMER 89]) gemacht. Beim Transport von festen Massen - in diesem Zusammenhang also $m_{i,f}$ bzw. Allgemein $m_{i,X}$ - während einer Flugphase i ist

$$dm = SFC_i \cdot T_{i,X} \cdot d\tau . \quad (2.15)$$

Die Masseänderung dm während einer Zeit $d\tau$ berechnet sich also aus

- dem schubspezifischen Kraftstoffverbrauch SFC_i (Einheit: kg/(Ns)) und
- dem erforderlichen Schub zum Transport der Masse $m_{i,X}$: $T_{i,X}$.

Je Masseänderung dm kann eine Zeit

$$d\tau = \frac{1}{SFC_i \cdot T_{i,X}} dm \quad (2.16)$$

geflogen werden. Für Steig-, Reise- und Sinkflug gilt allgemein

$$T_{i,X} = m_{i,X} \cdot g \cdot \left(\frac{\cos \gamma_i}{L/D_i} + \sin \gamma_i \right) , \quad (2.17)$$

$$\sin \gamma_i = \frac{R/C_i}{V_{TAS,i}} , \quad (2.18)$$

$$\cos \gamma_i = \sqrt{1 - \left(\frac{R/C_i}{V_{TAS,i}} \right)^2} . \quad (2.19)$$

in den Gleichungen ist g die Erdbeschleunigung. Für die jeweilige Flugphase i ist: R/C_i die Steigrate (Rate of Climb), $V_{TAS,i}$ die wahre Fluggeschwindigkeit (True Air Speed), L/D_i die Gleitzahl und γ_i der Bahnneigungswinkel. Es gilt:

- Steigflug: $R/C_4 > 0$; $g_4 > 0$;
- Reiseflug: $R/C_5 = 0$; $g_5 = 0$;
- Sinkflug: $R/C_6 < 0$; $g_6 < 0$.

Da Kraftstoff im Sinkflug nicht erzeugt werden kann, gilt Gleichung (2.17) nur für erforderliche positive Triebwerksschübe $T > 0$ und somit nur für Bahnneigungswinkel

Schlußbericht

$$\gamma_6 \geq \arctan \left(\frac{I}{L/D_6} \right) . \quad (2.20)$$

Auch beim schnellen Sinken mit konstanter Geschwindigkeit ist diese Bedingung noch erfüllt, wenn korrekte Werte für L/D_6 in Abhängigkeit von der jeweiligen Konfiguration vorliegen (z.B. L/D_6 bei ausgefahrenen Spoilern). Bei

$$\gamma_6 \approx \arctan \left(\frac{I}{L/D_6} \right) \quad (2.21)$$

also im Gleitflug (bei „minimum idle“), geht der erforderliche Schub gegen Null und der *SFC*-Wert gegen unendlich, weil zur Aufrechterhaltung des Triebwerkprozesses ein geringer Kraftstoffmassenstrom erforderlich ist. Dieser Kraftstoffmassenstrom sollte jedoch für den Kraftstoffverbrauch durch Flugzeugsysteme unberücksichtigt bleiben, weil er unabhängig von den Systemmassen anfällt. Mit der Abkürzung

$$k_{E,i} = SFC_i \cdot g \cdot \left(\frac{\cos \gamma_i}{L/D_i} + \sin \gamma_i \right) \quad (2.22)$$

erhalten wir aus Gleichung (2.16) und (2.17)

$$d\tau = \frac{I}{m_{i,X} \cdot k_{E,i}} dm . \quad (2.23)$$

Dies integriert über alle Masseänderungen durch Kraftstoffverbrauch während einer Flugphase i

$$t_i = \frac{I}{k_{E,i}} \int_{m_i}^{m_{i1}} \frac{1}{m_{i,X}} dm . \quad (2.24)$$

ergibt eine Dauer t_i der Flugphase:

$$t_i = \frac{I}{k_{E,i}} \ln \left(\frac{m_{i1}}{m_i} \right) . \quad (2.25)$$

Für feste Massen gilt

Der Kraftstoffverbrauch verursacht durch feste Flugzeugsystemmassen in der i -ten Flugphase ist mit Gleichung (2.10) :

$$m_{fuel,i,f} = m_{i,f} \cdot \left(e^{t_i \cdot k_{E,i}} I \right) . \quad (2.26)$$

Weiterhin ist ebenso

Schlußbericht

$$m_{fuel,i,X,m} = m_{i,X} \cdot \left(e^{t_i \cdot k_{Ei}} - 1 \right) . \quad (2.27)$$

$$t_5 = FT - t_4 - t_6 . \quad (2.30)$$

$$t_4 = \frac{h}{R / C_4} , \quad (2.28)$$

$$t_6 = \frac{h}{R / C_6} , \quad (2.29)$$

Die Dauer der jeweiligen Flugphase t_i ergibt sich aus der Gesamtflugzeit FT , der durchschnittlichen Steig- bzw. Sinkrate R / C_i und der Reiseflughöhe h :

Der Kraftstoffverbrauch durch den Transport von festen Flugzeugsystemmassen über einen Flug vom Start der Triebwerke bis zum Abstellen kann nun mit den Gleichungen (2.12), (2.14) und (2.26) mit (2.22) abgeschätzt werden.

Eine Überprüfung dieser einfachen Abschätzung nach *Breguet* bezogen auf einzelne Flugphasen durch verifizierte Entwurfsdaten von Airbus-Flugzeugen bei Kurz-, Mittel- und Langstreckenflügen ergab einen durchschnittlichen Fehler von 5%. Die verbleibende Ungenauigkeit der Rechnung kann vor allem mit der geringen Genauigkeit gegebener *SFC*-Werte begründet werden.

Schlußbericht

Kraftstoffverbrauch durch den Transport von variablen Massen

Variable Massen: Ein Massenstrom variabler Systemmassen wird vereinbarungsgemäß positiv angenommen, wenn Massen nach außenbords gebracht werden (Beispiel: Wassersystem). Dies gilt ebenfalls für den Verbrauch von Kraftstoff. Der Massenstrom wird negativ angenommen, wenn Massen während des Fluges aufgenommen werden. Es wird die Annahme getroffen, daß der Verbrauch $\dot{m}_{i,mv}$ konstant ist während der jeweils betrachteten Flugphase. Über alle Flugphasen beträgt die variable Masse dann

$$m_{\text{variabel}} = \sum_{i=1}^7 \dot{m}_{i,mv} \cdot \tau_i = \dot{m}_{4,mv} \cdot \tau_4 + \dot{m}_{5,mv} \cdot \tau_5 + \dot{m}_{6,mv} \cdot \tau_6 , \quad (2.31)$$

weil τ_1 , τ_2 , τ_3 und τ_7 im Vergleich zum Steig-, Reise- und Sinkflug (Index: 4, 5, 6) sehr kurz sind.

Kraftstoffverbrauch: Es sei $t = 0$ zu Beginn jeder Flugphase i . Für die Masseänderung $d m_{i,mv}$ während der Zeit $d t$ in der Flugphase i ist

$$d m_{i,mv} = \dot{m}_{i,mv} d \tau . \quad (2.32)$$

Gleichung (2.27) abgeleitet nach m_i und Gleichung (2.32) eingesetzt in das Ergebnis führt auf

$$d m_{\text{fuel},i} = \left(e^{\tau \cdot k_{E,i}} - 1 \right) \dot{m}_{i,mv} \cdot d \tau . \quad (2.33)$$

Dies integriert über eine Flugphase i von $t = 0$ bis $t = t_i$ ergibt (vergleiche auch [AIR 1168])

$$m_{\text{fuel},i,mv} = \frac{\dot{m}_{i,mv}}{k_{E,i}} \left(e^{t_i \cdot k_{E,i}} - 1 \right) \dot{m}_{i,mv} t_i . \quad (2.34)$$

Berechnung weiterer Kostenelemente

Die Berechnung der Kraftstoffkosten durch Wellenleistungsentnahme, Zapfluft, Luftwiderstand und Stauluft sowie die Berechnung von Verspätungskosten und Ersatzteilbevorratungskosten ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Aus diesem Grund wird auf die entsprechenden Berechnungsgrundlagen nicht weiter eingegangen.

3 KOSTENELEMENTE BEI WASSERSYSTEMEN

Wassersysteme verursachen direkte Betriebskosten, DOC_{SYS} , durch

- 1.) Abschreibung,
- 2.) Kraftstoffkosten durch den Transport von fixen Massen,
- 3.) Kraftstoffkosten durch den Transport von variablen Massen,
- 4.) Kraftstoffkosten durch Wellenleistungsentnahme vom Triebwerk,
- 5.) Kraftstoffkosten durch Zapfluftentnahme,
- 6.) Kraftstoffkosten durch Luftwiderstand,

Schlußbericht

- 7.) Wartungskosten,
- 8.) Verspätungskosten,
- 9.) Ersatzteilbevorratungskosten
- 10.) Die Beschaffungskosten für das Wasser selbst (beträgt wenige % und bleibt hier unberücksichtigt).

Zu 1.) 2.) und 3.):

Die Berechnungsgrundlagen der Kostenelemente nach 1.) 2.) und 3.) wurden in Abschnitt 2 bereits vorgestellt. Die erforderlichen Eingabeparameter werden in den Abschnitten 4 bis 8 diskutiert. Die Berechnungsergebnisse enthält Abschnitt 9.

Zu 4.):

Für die Beheizung von Leitungen und Drain Masts verbraucht das Wassersystem elektrische Energie. Bei einem Konzept mit Grauwassersystem und Drain Masts werden mehr zu beheizen- de Leitungen und Komponenten zu erwarten sein. Derartige Konzepte (Varianten **A** und **C**) benötigen demnach mehr elektrische Leistung. Die Leistung wird von Generatoren bereitgestellt, die an den Triebwerken angebracht sind. Die Generatoren entnehmen den Triebwerken **Wellenleistung**. Die Wellenleistungsentnahme erhöht den spezifischen Kraftstoffverbrauch (*SFC*) der Triebwerke. Für Heizzwecke ist erfahrungsgemäß eine vergleichsweise hohe Leistung erforderlich. Im Vergleich zu den Hauptanteilen der DOC_{SYS} :

- Abschreibung,
- Kraftstoffkosten durch den Transport von Massen,
- Wartungskosten

werden die Kosten durch Wellenleistungsentnahme trotzdem eine untergeordnete Rolle ein- nehmen, können jedoch bei Varianten mit ähnlichen DOC_{SYS} den entscheidenden Unterschied ausmachen: etwa im Vergleich der Varianten C und D. Ähnlich sind die Überlegungen bei den anderen Kostenbestandteilen:

Zu 5.):

Frischwasser kann durch **Zapfluft** von den Triebwerken zu den Wasserhähnen befördert werden. Dies ist z.B. beim Airbus A340 der Fall. Eine Leistung wird den Triebwerken erst bei Entnahme eines Zapfluftmassenstromes entnommen. Eine statische Druckentnahme erfolgt ohne Entzug von Leistung. Da die Zapfluftmassenströme verursacht durch das Wassersystem klein sind (wenige m^3 pro Flug), werden die Kraftstoffkosten durch Zapfluftentnahme von untergeordneter Bedeutung sein.

Zu 6.):

Ein Konzept ohne Drain Masts verursacht weniger **Luftwiderstand**. Der Luftwiderstand hängt ab von der Fluggeschwindigkeit, der Projektionsfläche des Drain Masts zur Anströmrichtung, der Luftdichte und dem Widerstandsbeiwert als Funktion von Reynolds- und Machzahl. Weiterhin ist der Luftwiderstand durch gegenseitige Beeinflussung (interference drag) zwischen Drain Mast und Rumpf zu beachten. Der Kraftstoffverbrauch durch den Luftwiderstand der Drain Masts kann nicht vernachlässigt werden. Benachteiligt sind die Varianten **A** und **C**.

Zu 7.):

Je mehr Komponenten ein System enthält desto größer ist erfahrungsgemäß der Wartungsauf- wand. Das Grauwassersystem und die Grauwasseraufbereitungsanlage bringen zusätzliche Teile in das Flugzeug. Das Grauwassersystem hat in der Vergangenheit bereits Probleme bereitet. Benachteiligt hinsichtlich der **Wartungskosten** sind die Varianten **A** und **D** einfach, die Variante **C** sogar doppelt, weil sie sowohl das Grauwassersystem als auch die Grauwasser- aufbereitungsanlage enthält.



Schlußbericht

Zu 8.)

ATA 38 ist im Vergleich zu anderen Flugzeugsystemen „durchschnittlich“ an **Abflugverspätungen und Flugabsagen** beteiligt. Eine z.B. doppelte Rate an Verspätungen durch das Wassersystem würde sich im Flugbetrieb also durchaus bemerkbar machen. Verspätungen und Flugabsagen machen sich jedoch erfahrungsgemäß in den DOC_{SYS} nicht besonders stark bemerkbar. Viel größer ist hingegen der subjektive Einfluß durch Image-Verlust und organisatorischen Aufwand im Betrieb der Airline. Benachteiligt sind die Varianten **C** und **D**, weil sie die neue Technik der Grauwasseraufbereitung enthalten.

Zu 9.)

In die Berechnung der Ersatzteilbevorratungskosten gehen u.a. die Parameter

- Systempreis und
- Mean Time Between Unscheduled Removals, MTBUR

ein. Neue, aufwendige und damit teure Systemlösungen sind folglich im Nachteil: Varianten **C** und **D**

Um die Bewertung zusammenfassen zu können, sei einmal angenommen, daß die Wartungskosten den 5-fachen Anteil an den DOC_{SYS} im Vergleich zu den Punkten 4, 6, 8 und 9 haben. Es ergibt sich dann ein „Bild der Minus-Punkte“ gemäß. Soll das Ergebnis aus Tabelle 3.1 mit den Ergebnissen aus Abschnitt 9 verglichen werden, so mag folgende Aufteilung der Wichtigkeit besser sein als gar keine: die in Tabelle 3.1 behandelten Punkte werden mit 30 ... 45% gewichtet gegenüber dann 70 ... 55% für die Punkte aus Abschnitt 9.

Tabelle 3.1: Vergleich und Aufrechnung der Nachteile (-) die die Varianten A bis D bei den zusätzlichen Bewertungskriterien erfahren

| Bewertungskriterium | Wichtung | A | B | C | D |
|---|----------|------|----|------|------|
| Wellenleistung | 1 | - | | - | |
| Zapfluft | 0 | / | / | / | / |
| Luftwiderstand | 1 | - | | - | |
| Wartung | 5 | - | | -- | - |
| Abflugverspätung und Flugabsagen | 1 | | | - | - |
| Ersatzteilbevorratungskosten | 1 | | | - | - |
| Summe der gewichteten Minus-Punkte | ----- | 7 | 0 | 14 | 7 |
| Minuspunkte relativ zu Variante A | ----- | 100% | 0% | 200% | 100% |

Schlußbericht

4 VARIABLE UND FIXE MASSEN

Wasser und Frischwasserverbrauch

Während des Fluges gelangt Frischwasser aus den Frischwassertanks in die Abwassertanks in Form von Toilettenspülwasser und/oder Grauwasser. Die Masse des Wasser in Form von Frischwasser, Toilettenspülwasser und/oder Grauwasser wird in der Berechnung der Betriebskosten berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wird jedoch die Masse der Fäkalien in den Abwassertanks. Grund: Die Masse der Fäkalien hat sich auch schon zu Beginn des Fluges an Bord befunden - wenn auch in anderer Form. Es handelt sich also bei den Fäkalien um eine Verschiebung von Massen aus der Kabine in das Wassersystem. Diese Massenverschiebung wirkt sich flugmechanisch nicht aus (wenn Verlagerungen des Flugzeugschwerpunktes vernachlässigt werden) und kann daher auch bei einer Betriebskostenberechnung entfallen.

Der Frischwasserverbrauch im Flugzeug gliedert sich nach Erfahrung der *Daimler Benz Aerospace Airbus* in

- 33.3 % Toilettenspülwasser
 - 12.3 % Küchenwasser \
 - \
 - 54.3 % Händewaschwasser /
- > 66.6 % Grauwasser

Die variable Masse und der Massenstrom außenbords

Beim Einsatz einer Grauwasseraufbereitungsanlage können die 33.3 % Toilettenspülwasser aus Grauwasser gewonnen werden. Durch eine Grauwasseraufbereitung muß daher kein Toilettenwasser als Frischwasser mitgenommen werden. Die erforderliche Masse m an Frischwasser

(Index: *frisch*) ohne Grauwasseranlage (Index: *grau*) reduziert sich mit Grauwasseraufbereitungsanlage (Index: *grau*) um 33.3 % :

$$m_{frisch,grau} = \frac{2}{3} \cdot m_{frisch,grau} \quad (4.1)$$

Zweckmäßigerweise wird auch die **Größe der Tanks** nach dem Bedarf an Frischwasser ausgewählt (dies ist bei der vorliegenden Aufgabenstellung der Fall und wird im Folgenden unterstellt), so daß für die maximale Wassermasse in den Tanks m_{tank} gilt

$$m_{tank,grau} = \frac{2}{3} \cdot m_{tank,grau} \quad (4.2)$$

Wieviel Frischwasser m_{frisch} für einen Flug wirklich benötigt wird , also die **erforderliche Frischwassermenge**, kann durch den Nutzungsgrad k_{nutz} des zur Verfügung stehenden Tankvolumens ausgedrückt werden

$$m_{frisch} = k_{nutz} \cdot m_{tank} \quad (4.3)$$

Ohne Grauwasseraufbereitungsanlage besteht die Möglichkeit die 66.6 % Grauwasser über Drain Masts abzuführen. Die Masse des abgeführten Wassers (Index: *drain*) ist

$$m_{drain,grau} = \frac{2}{3} \cdot m_{frisch,grau} \quad (4.4)$$

Mit Grauwasseraufbereitungsanlage wird mindestens die Hälfte des Grauwassers zu Toilettenwasser aufbereitet, so daß maximal nur noch die verbleibende Hälfte des Grauwassers über Drain Masts abgeführt werden kann. Die Masse des abgeführten Wassers (Index: *drain*) ist dann



Schlußbericht

$$m_{\text{drain,grau}} = \frac{1}{3} \cdot m_{\text{frisch,grau}} \quad (4.5)$$

bzw. (4.1) eingesetzt in (4.5)

$$m_{\text{drain,grau}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{frisch,grau}} \quad (4.6)$$

Zusammenfassend: Die **Masse des abgeführten Wassers** m_{drain} , die auch als **variable Masse** m_{variabel} bezeichnet werden kann, hängt ab von der Systemvariante (k_{variante} nach Tabelle 4.1) und dem Nutzungsgrad der Tanks k_{nutz}

$$m_{\text{variabel}} = m_{\text{drain}} = k_{\text{nutz}} \cdot k_{\text{variante}} \cdot m_{\text{tank}} \quad (4.7)$$

Tabelle 4.1 Die Variable k_{variante} als Funktion der Systemvariante des Wassersystems

| Kürzel | Variante | k_{variante} |
|--------|--|-----------------------|
| A | Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast | 2/3 |
| B | Wassersystem ohne Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast | 0 |
| C | Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung mit Drain Mast | 1/2 |
| D | Wassersystem mit Grauwasseraufbereitung ohne Drain Mast | 0 |

Bei einer Flugzeit FT - und angenommenem konstantem Verbrauch - verläßt Grauwasser mit einem **Massenstrom**

$$\dot{m}_{\text{variabel}} = \frac{m_{\text{variabel}}}{FT} \quad (4.8)$$

das Flugzeug über Drain Masts.

Fixe Masse

Die fixe Masse m_{fix} , also die Masse, die während des Fluges konstant bleibt, errechnet sich nach **Bild 1**:

$$m_{\text{fix}} = m_{\text{komp}} + m_{\text{res}} + m_{\text{frisch}} - m_{\text{variabel}} \quad (4.9)$$

In Gleichung (4.9) ist:

- m_{frisch} Masse des erforderlichen Frischwassers
- m_{komp} Summe der Masse der Komponenten im System
- m_{res} Masser der Reserve mitgeführten Frischwassers
- m_{variable} variable Masse des über Drain Masts abgeführten Wassers

Schlußbericht

Berechnet wird m_{frisch} nach Gleichung (4.3), m_{komp} ist gegeben und

$$m_{res} = k_{res} \cdot m_{tank} \quad (4.10)$$

Zu beachten ist, daß für den Nutzungsgrades k_{nutz} und die relative Frischwasserreserve k_{res} über den Füllungsgrad der Tanks $k_f \overset{\text{All}}{\Delta}$ die Bedingung

$$k_f \overset{\text{All}}{\Delta} = k_{nutz} + k_{res} \leq 1 \quad (4.11)$$

erfüllen werden muß (sonst entspräche das einem überfülltem Tank). Die fixe Masse m_{fix} kann jetzt alternativ zu (4.9) auf die Grundparameter zurückgehend berechnet werden aus

$$m_{fix} = m_{komp} + (k_{res} + k_{nutz} - k_{nutz} \cdot k_{variante}) \cdot m_{tank} \quad (4.12)$$

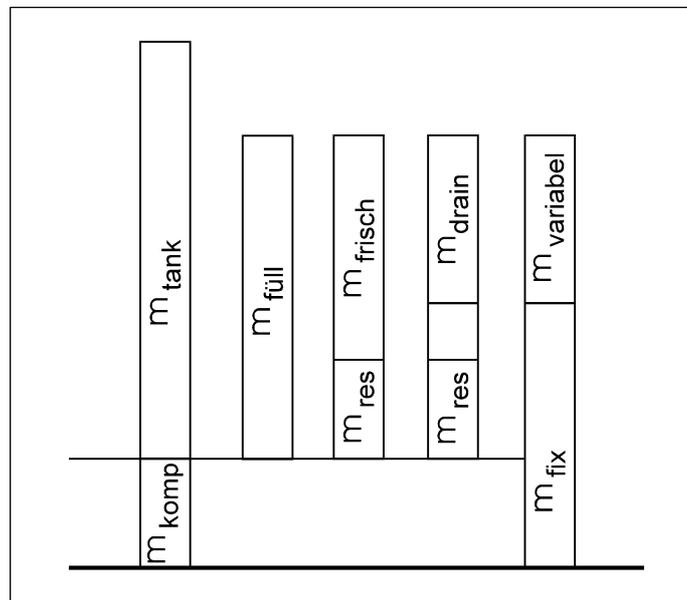


Abbildung 4.1 Zusammensetzung der Massen des Wassersystems

Erforderliche Mengen von Frischwasser und Frischwasserreserven

Wieviel Frischwasser m_{frisch} für einen Flug erforderlich ist, hängt insbesondere ab von

- der Anzahl der Passagiere und Mitglieder der Crew an Bord,
- der Dauer des Fluges,
- der Zeit während der der Flug stattfindet (Tag oder Nacht),
- kulturellen Gewohnheiten der Passagiere.

Die Auswertung von Daten die durch Virgin Atlantic bei 48 Flügen mit der A340 aufgezeichnet wurden führt nach Tabelle 4.2 auf einen durchschnittlichen spezifischen Frischwasserverbrauch $k_{Verbrauch}$ von 0.185 l pro Passagier und Flugstunde. Bei Flügen am Tage wurde ein geringfügig höherer Verbrauch festgestellt als bei Flügen in der Nacht. **Bild 2** läßt für den spezifischen



Schlußbericht

Frischwasserverbrauch keine eindeutige Abhängigkeit von der Flugzeit erkennen.

Tabelle 4.2 Frischwasserverbrauch pro Passagier und Flugstunde nach Daten aufgezeichnet durch Virgin Atlantic bei 48 Flügen mit dem Airbus A340

| | Anzahl Passagiere an Bord, <i>PAX</i> | Nutzladefaktor, <i>NLF</i> | Flugzeit, <i>FT</i> | spez. Frischwasserverbrauch, <i>k_{Verbrauch}</i> Durchschnitt | spez. Frischwasserverbrauch, <i>k_{Verbrauch}</i> Flug am Tag | spez. Frischwasserverbrauch, <i>k_{Verbrauch}</i> Flug in der Nacht |
|------------|--|-------------------------------|------------------------|--|---|---|
| Einheit | - | % | h : min | l/Pax/h | l/Pax/h | l/Pax/h |
| Durchschn. | 294 | 89 | 8 : 24 | 0.185 | 0.198 | 0.173 |
| max. | 330 | 100 | 10 : 40 | 0.241 | 0.241 | 0.205 |
| min. | 208 | 63 | 7 : 15 | 0.134 | 0.150 | 0.134 |

Die erforderliche Masse an Frischwasser kann unter Berücksichtigung der Anzahl der Passagiersitze (*n*), der Flugzeit (*FT*), des Nutzladefaktors (*NLF*) aus

$$m_{frisch} = k_{Verbrauch} \cdot NLF \cdot n \cdot FT \quad (4.13)$$

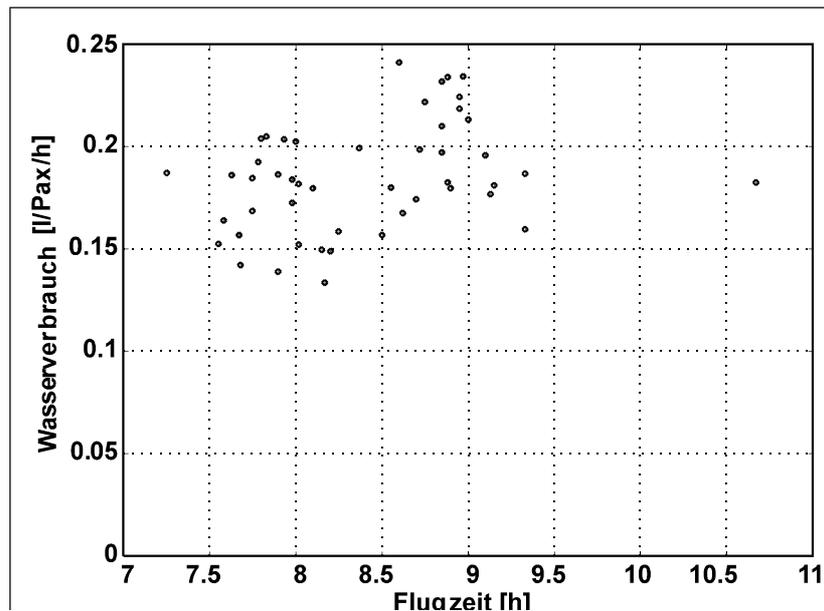
bestimmt werden. Der Nutzungsgrad k_{nutz} des zur Verfügung stehenden Tankvolumens ist definiert als

$$k_{nutz} = \frac{m_{frisch}}{m_{tank}} \quad (4.14)$$

Für einen Airbus A340 mit Frischwassertanks, die maximal 1050 kg Wasser fassen, ergibt sich dann mit durchschnittlichen Werten aus Tabelle 2 bei einer Flugzeit von $FT = 7$ h (vergleiche Abschnitt 7) ein Nutzungsgrad $k_{nutz} = 0.36$. Als Referenzwert für die Betriebskostenberechnung wurde $k_{nutz} = 0.5$ gewählt.

Um Kraftstoff zu sparen, werden die Frischwassertanks bei Lufthansa auf Langstreckenflügen so befüllt, daß nach der Landung eine relative **Frischwasserreserve** k_{res} von 5 ... 10 % verbleibt. Andere Airlines wie z.B. Virgin Atlantic befüllen die Frischwassertanks zu 100 %, um auf jeden Fall sicherzustellen, daß ausreichend Frischwasser während des Fluges vorhanden ist. Eine maximale Füllung der Tanks vor dem Flug hat eine relative Frischwasserreserve $k_{res} = 1 - k_{nutz}$ zur Folge.

Abbildung 4.2: Spezifischer frischwasserverbrauch nach Daten aufgezeichnet von Virgin



Atlantic bei Flügen mit dem Airbus A340

Massen des Wassersystems

Tabelle 4.3 zeigt die Massen des Wassersystem (in den nach Abschnitt 1 definierten Systemgrenzen) des Megaliners im Vergleich zur A340. Dabei wurde - als **Referenzrechnung** - gewählt:

- Nutzungsgrad $k_{nutz} = 0.5$, relative Frischwasserreserve $k_{res} = 0.5$.

Die Frischwassertanks sind also vor dem Flug vollständig gefüllt.

Um die Auswirkungen von verschiedenen Nutzungsgraden und Frischwasserreserven auf die Betriebskosten studieren zu können, sind im **Anhang** weitere Massen und Massenströme berechnet für:

- $k_{nutz} = 1.0$, $k_{res} = 0.0$, Frischwassertank vor dem Flug vollständig gefüllt,
- $k_{nutz} = 0.1$, $k_{res} = 0.9$, Frischwassertank vor dem Flug vollständig gefüllt,
- $k_{nutz} = 0.1$, $k_{res} = 0.05$, Frischwassertank vor dem Flug zu 15 % gefüllt.

Die variablen Massen, $m_{variabel}$ wurden dabei berechnet nach Gleichung(4.7), der Massenstrom nach Gleichung (4.8) und die fixen Massen nach (4.12).

Schlußbericht

Tabelle 4.3: Massen des Wassersystems: Megaliner und A340 im Vergleich. m_{komp} und m_{tank} nach [THUDT 97]. Für Referenzrechnung: Nutzungsgrad $k_{nutz} = 0.5$, relative Frischwasserreserve $k_{res} = 0.5$, Frischwassertanks vor dem Flug vollständig gefüllt

| Variante | Variable | Megaliner | A340-200 |
|----------|---|-----------|-----------|
| A | Masse der Komponenten, m_{komp} [kg] | 416 | 212 |
| | max. Wassermasse im Tank, m_{tank} [kg] | 2000 | 1050 |
| | Gesamtmasse, $m_{komp} + m_{tank}$ [kg] | 2416 | 1262 |
| | Variable Masse, $m_{variabel}$ [kg] | 667 | 350 |
| | Massenstrom, $\dot{m}_{variabel}$ [kg/s] | 0.026455 | 0.013889 |
| | fixe Masse, m_{fix} [kg] | 1749 | 912 |
| B | Masse der Komponenten, m_{komp} [kg] | 462 | 238 |
| | max. Wassermasse im Tank, m_{tank} [kg] | 2000 | 1050 |
| | Gesamtmasse, $m_{komp} + m_{tank}$ [kg] | 2462 | 1288 |
| | Variable Masse, $m_{variabel}$ [kg] | 0 | 0 |
| | Massenstrom, $\dot{m}_{variabel}$ [kg/s] | 0 | 0 |
| | fixe Masse, m_{fix} [kg] | 2462 | 1288 |
| C | Masse der Komponenten, m_{komp} [kg] | 428 | 214 |
| | max. Wassermasse im Tank, m_{tank} [kg] | 1350 | 710 |
| | Gesamtmasse, $m_{komp} + m_{tank}$ [kg] | 1778 | 924 |
| | Variable Masse, $m_{variabel}$ [kg] | 337.5 | 177.5 |
| | Massenstrom, $\dot{m}_{variabel}$ [kg/s] | 0.013393 | 0.0070437 |
| | fixe Masse, m_{fix} [kg] | 1440.5 | 746.5 |
| D | Masse der Komponenten, m_{komp} [kg] | 424 | 212 |
| | max. Wassermasse im Tank, m_{tank} [kg] | 1350 | 710 |
| | Gesamtmasse, $m_{komp} + m_{tank}$ [kg] | 1774 | 922 |
| | Variable Masse, $m_{variabel}$ [kg] | 0 | 0 |
| | Massenstrom, $\dot{m}_{variabel}$ [kg/s] | 0 | 0 |
| | fixe Masse, m_{fix} [kg] | 1774 | 922 |

Schlußbericht

5 SYSTEMPREIS UND ABSCHREIBUNGSMODELL

In Tabelle 5.1 sind angegeben: Der Systempreis des jeweiligen Wassersystems, *Price*, in den in Abschnitt 1 angegebenen Systemgrenzen. Die Preise verstehen sich als Erstbezugspreis - im Unterschied zum Ersatzteilpreis. Berücksichtigt sind die vier Varianten eingebaut in die beiden untersuchten Flugzeuge „Megaliner“ und „A340“.

Tabelle 5.1: Preise des Wassersystems angegeben in US\$ [THUDT 97]

| Variante | Megaliner | A340-200 |
|----------|-----------|----------|
| A | 136450 | 79000 |
| B | 163600 | 97600 |
| C | 156450 | 89000 |
| D | 159600 | 95600 |

Tabelle 5.2: Vergleich von Abschreibungsmodellen bei Flugzeug-DOC-Methoden

| Organisation | N [Jahre] | Residual / Price | Quelle | Anmerkung |
|--------------------------------------|-----------|------------------|----------------|---------------------------------------|
| Fokker | 15 | 10 % | [RHEE 93] | |
| Association of European Airlines | 14 | 10 % | [AEA 89a] | für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge |
| Association of European Airlines | 16 | 10 % | [AEA 89b] | für Langstreckenflugzeuge |
| Airbus Industrie | 15 | 10 % | [AIRBUS 88] | |
| DLH | 14 | 0 % | [LUFTHANSA 82] | |
| NASA / American Airline | 14 - 16 | 10 - 15 % | [NASA 77] | |
| Air Transport Association of America | 12 | 0 % | [ATA 67] | |

Für eine zeitlich bedingte lineare Abschreibung von Flugzeugsystemen über *N* Jahre gilt nach Abschnitt 2:

$$Depr_{sys} = \frac{Price - Residual}{N} = \frac{Price \left(1 - \frac{Residual}{Price} \right)}{N} \quad (5.1)$$

Bei Flugzeug-DOC-Methoden werden verschiedene Werte für den Abschreibungszeitraum *N* und den Term *Residual / Price* angenommen. Einen Vergleich der Literaturangaben enthält Tabelle 5.1. Als gebräuchliche Werte können ausgewählt werden:

- *Residual / Price* = 10 % ,
- Abschreibungszeitraum, *N* = 15 Jahre.



Schlußbericht

6 KRAFTSTOFFPREIS

Zusammensetzung des Kraftstoffpreises

Die Preise für Turbinenkraftstoff (Kerosin) werden täglich an den Warenbörsen ermittelt. Für Nordwest Europa ist z.B. Rotterdam ein wichtiger Handelsplatz. Die Preise, die in Rotterdam ausgehandelt werden, werden als Spot-Markt-Preise bezeichnet. Sie werden angegeben als „Free On Board“, abgekürzt als FOB. FOB bedeutet, daß der Preis die Verladung zum Weitertransport einschließt [STATISTICS 96]. Der Weitertransport erfolgt von Rotterdam aus nach Deutschland per Binnenschiff. FOB bedeutet hier also „Preis einschließlich der Verladung auf das Binnenschiff“. Die Luftverkehrsgesellschaften bezahlen einen Preis, der sich zusammensetzt aus dem Preis FOB plus dem sogenannten „Into-Plane-Differential“. Das „Into-Plane-Differential“ wird dabei mit den Ölkonzernen individuell ausgehandelt und gibt die Differenz zwischen Spot-Markt-Preis und Abnahme Preis an. Das „Into Plane Differential“ wird nicht öffentlich gemacht, beträgt jedoch bei einer großen Luftverkehrsgesellschaft ca. 0.16 US\$/Usgallon bzw. 0.0422 US\$/l.

Kraftstoffpreis und Betriebskostenberechnung

Der Kraftstoffpreis unterliegt beträchtlichen Schwankungen. Um das Verhältnis der Betriebskostenelemente „Abschreibung“ und „Kraftstoffkosten“ (hier: Kraftstoffkosten durch den Transport von Massen) richtig berechnen zu können, ist eine sorgfältige Recherche des Kraftstoffpreises (Spot-Markt-Preis) notwendig. Von Interesse ist dabei nicht nur der gegenwärtige Kraftstoffpreis, sondern der Kraftstoffpreis zu dem Datum (in der Zukunft) zu dem das projektierte Flugzeug betrieben werden soll. Da dieser Kraftstoffpreis unbekannt ist, hilft nur eine Parametervariation des Kraftstoffpreises. Bei der Festlegung der Bandbreite in der der Parameter „Kraftstoffpreis“ variiert werden soll, kann ein Blick auf die Preisentwicklung hilfreich sein.

Preisentwicklung von Kerosin

In **Bild 1** ist die Preisentwicklung von Kerosin in den Jahren von 1986 bis 1996 angegeben. Im **Anhang** sind die genauen Zahlenwerte zu Bild 6.1 aufgelistet. Es werden die Kerosinpreise aus verschiedenen Quellen verglichen: [STATISTICS 96] und die Angaben der Lufthansa geben den Kerosinpreis „Free On Board“ an. [AIRBUS 88] enthält den Kerosinpreis wie er für die DOC-Rechnung von Airbus Industrie genutzt wird. Der Grenzübergangswert wird vom Statistischen Bundesamt veröffentlicht und gibt den Wert von Kerosin an beim Import an der deutschen Grenze. Der Grenzübergangswert enthält also schon einen Teil der Transportkosten. (Der Grenzübergangswert wurde mit einem Kurs 1 US\$ = 1.715 DM (Stand: 08.04.1997) von DM in US\$ umgerechnet). Der Durchschnittswert aus den Angaben der Lufthansa und aus [STATISTICS 96] beträgt:

| | |
|--|----------------------|
| Kerosinpreis, FOB, Durchschnitt '86-'96 | 0.1486 US\$/l |
| Into-Plane-Differential | <u>0.0422 US\$/l</u> |
| Summe | 0.1909 US\$/l |

Der durchschnittliche Abnahmepreis für Kerosin der Jahre '86-'97 gebildet aus den Angaben der Lufthansa und [STATISTICS 96] schwankte zwischen 0.1684 US\$/l und 0.2441 US\$/l.

Die Lufthansa gibt an:

| | |
|---|----------------------|
| Kerosinpreis, FOB, Rotterdam, 1997 | 0.1676 US\$/l |
| Into-Plane-Differential | <u>0.0422 US\$/l</u> |
| Summe | 0.2099 US\$/l |

Als **Referenzwert des Kraftstoffpreises** für die Berechnung der Betriebskosten wurde daher

Schlußbericht

gewählt **0.2 US\$/l**. Für eine Parametervariation können zusätzlich gewählt werden: 0.15 US\$/l und 0.3 US\$/l.

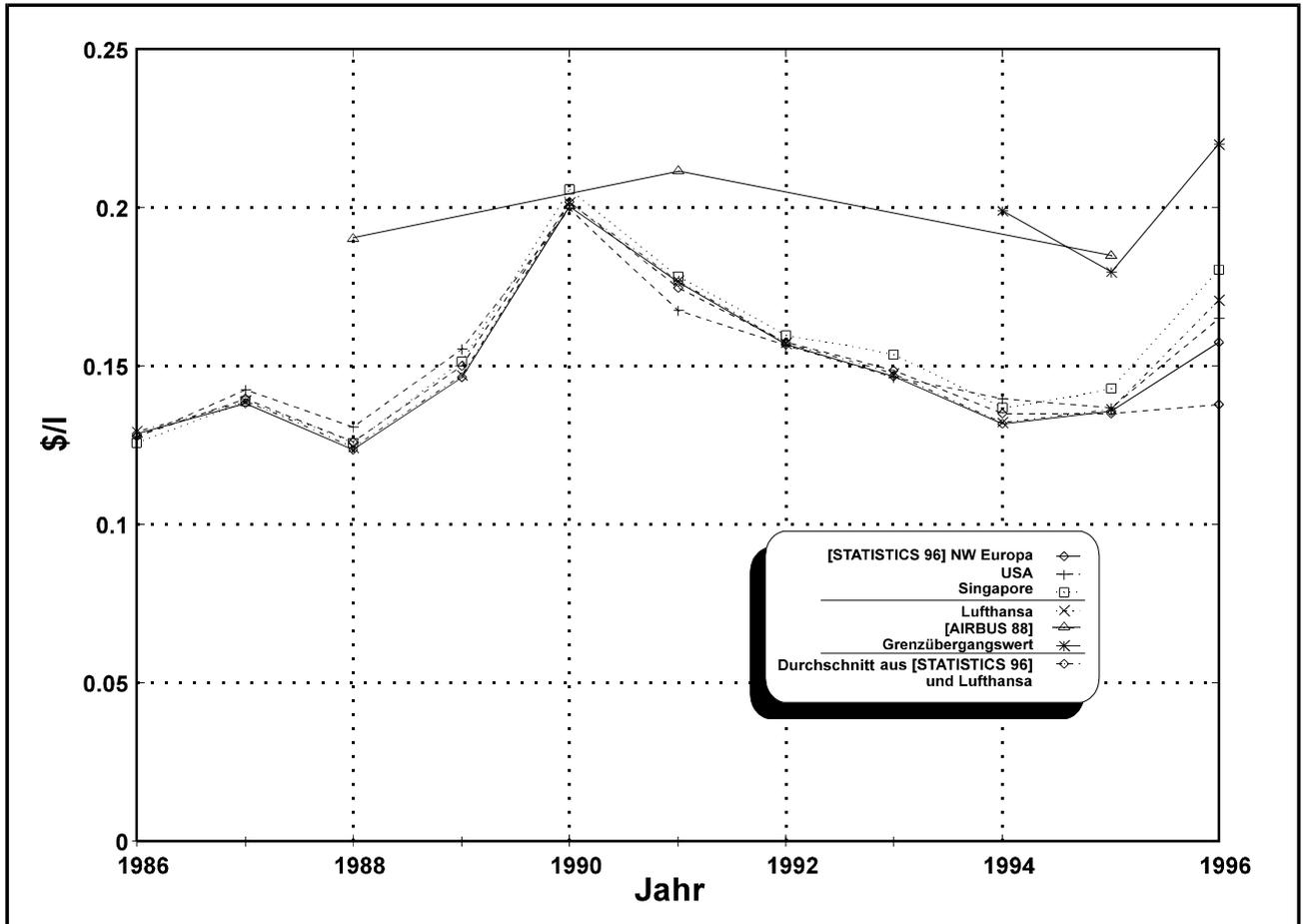


Abbildung 6.1: Preisentwicklung von Turbinenkraftstoff (Kerosin). Im Vergleich :Der Kraftstoffpreis entnommen aus Angaben verschiedener Quellen. Angaben aus [Statistics 96] und von Lufthansa sind Preise „Free on Board“

7 DURCHSCHNITTLICHE FLUGZEIT UND FLUGZEUGNUTZUNG

Die durchschnittliche Flugzeit, *FT*, und die Flugzeugnutzung, angegeben als die Anzahl der Flüge, die ein Flugzeug in einem Jahr durchführt, *NFY* (Number of Flights per Year), beeinflussen das Verhältnis zwischen den festen und den variablen Kosten. In dem hier vorliegenden Fall wird also das Verhältnis zwischen der Abschreibung und den Kraftstoffkosten für den Transport der Massen beeinflusst.

Die durchschnittliche Flugzeit der A340-Flotte wird in [AIRBUS 96] mit 6.83 h angegeben. Die tägliche Flugzeugnutzung beträgt im Durchschnitt 12.33 h. Das entspricht 659 Flügen im Jahr (*NFY*). Als Referenzwert für die Betriebskostenrechnung wurden verabredungsgemäß **7 Stunden** als **Flugzeit** angesetzt. Nach der ermittelten Abhängigkeit zwischen Flugzeit und Flugzeugnutzung (**Bild 1** und **Anhang**) ergibt dies eine **Flugzeugnutzung von 12.37 h pro Tag** oder **645 Flügen pro Jahr (*NFY*)**.

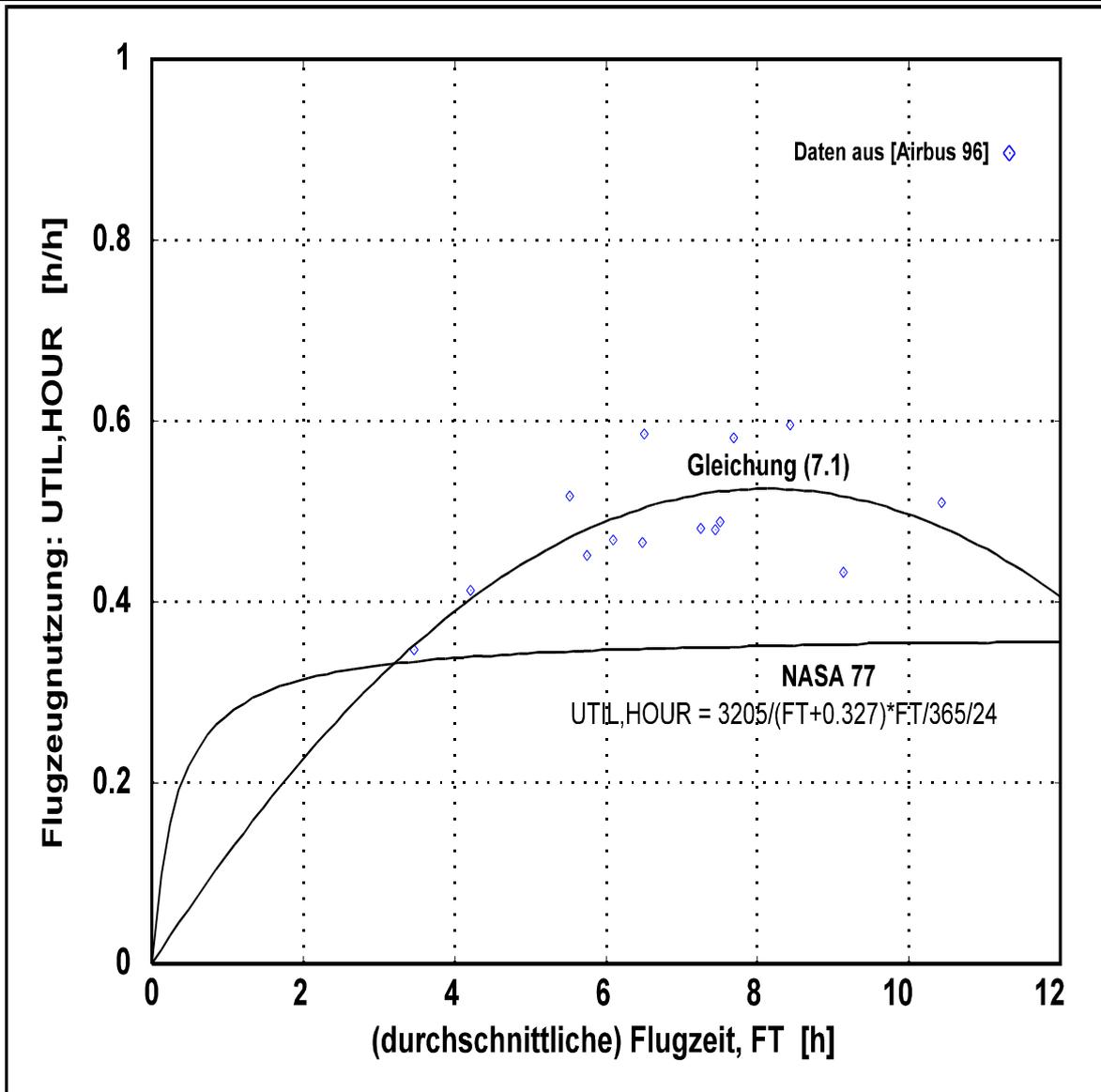


Abbildung 7.1: Abhängigkeit der Flugzeitnutzung von der Flugzeit. Vergleich von Daten der A340-Flotte mit zwei mathematischen Ansätzen

Bild 1 zeigt die **Flugzeugnutzung** - angegeben durch die Anzahl der Flugstunden pro Stunde, *UTIL, HOUR* (Utilization per Hour) mit Daten aus [AIRBUS 96] - **als Funktion der** (durchschnittlichen) **Flugzeit**. Verglichen werden die Daten aus [AIRBUS 96] im Vergleich mit einer Berechnung nach Gleichung (7.1) und einer Literaturangabe [NASA 77] (stellvertretend für ähnliche Ansätze wie z.B. aus [ATA 67]).

$$UTIL, HOUR = a \cdot (FT - b)^2 + c \quad (7.1)$$

mit

| | | | |
|---|---|------------|------------------|
| a | = | - 0.007960 | 1/h ² |
| b | = | 8.124370 | h |
| c | = | 0.525433 | . |

8 FLUGTECHNISCHE DATEN

Die Gleitzahl L/D

Die Gleitzahl gibt das Verhältnis Auftrieb / Widerstand an. Die Gleitzahl gehört zu den Daten des Flugzeugherstellers, die vertraulich behandelt wird. Die Betriebskostenberechnung wurde mit den vom Flugzeughersteller angegebenen Gleitzahlen durchgeführt. Die Gleitzahl könnte ohne genaue Kenntnis jedoch auch näherungsweise mit den Methoden des Flugzeugentwurfs berechnet werden. Nach [RAYMER 89] (Fig. 3.6) kann für Strahlverkehrsflugzeuge abgeleitet werden

$$L / D_{max} = 7.5 \cdot \frac{A}{(S_{wet} / S_{ref})} + 8 \quad (8.1)$$

In Gleichung (8.1) ist A die Flügelstreckung, S_{wet} ist die Fläche der benetzten Oberfläche des Flugzeugs und S_{ref} die Referenzfläche des Flügels. Damit kann die maximale Gleitzahl abgeschätzt werden wie in Tabelle 8.1 gezeigt. Die Gleitzahl ist im Reiseflug etwas geringer als die maximale Gleitzahl, die Gleitzahl im Steig- und Sinkflug ist noch einmal geringer als die Gleitzahl im Reiseflug.

Tabelle 8.1: Abschätzung der maximalen Gleitzahlen nach Gleichung (1)

| | Megaliner (A3XX-200) | A340-200 |
|---------------------------------|----------------------|----------|
| $\frac{A}{(S_{wet} / S_{ref})}$ | 1.63 | 1.68 |
| L / D_{max} | 20.2 | 20.6 |

Der spezifische Kraftstoffverbrauch der Triebwerke SFC

Der schubspezifische Kraftstoffverbrauch, SFC (Specific Fuel Consumption) der Triebwerke gibt an wieviel Kraftstoff ein Triebwerk benötigt, um einen bestimmten Schub eine bestimmte Zeit zu erzeugen. Für neue Triebwerke ist der SFC -Wert vertraulich. Für ältere Triebwerke wird in der Regel nur der SFC -Wert beim Start angegeben, der deutlich geringer ist als der SFC im Reiseflug. Der SFC -Wert im Steigflug ist etwas geringer als im Reiseflug. Der SFC -Wert moderner Triebwerke nimmt im Flug einen Wert zwischen 15 ... 17 mg/N/s an. Die Betriebskostenrechnung wurde mit SFC -Werten durchgeführt, wie sie vom Flugzeughersteller genannt wurden.

Die Flugmission

Die Flugmission beschreibt das Flugprofil mit allen relevanten Daten vom Start bis zur Landung. Da SFC und Gleitzahl sich in den einzelnen Flugphasen unterscheiden ist es wichtig zu wissen, wie lange sich das untersuchte Flugzeug in den einzelnen Flugphasen aufhält. Auch der benötigte Schub hängt ab von der Flugmission u.a. durch die geforderte Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit (vergleiche Abschnitt 2). Bei Langstreckenflügen wird zunächst bis zur Initial Cruise Altitude (ICA) gestiegen. Während des Reisefluges wird dann in Sprüngen die Flughöhe weiter gesteigert. Hier wurde vereinfachend angenommen, daß der Steigflug bis zum Erreichen der ICA dauert. Der Sinkflug wurde beginnend ab der Final Cruise Altitude (FCA) bis hin zur



Schlußbericht

Landung als eine Flugphase angenommen. Die Fluggeschwindigkeit im Reiseflug wurde aus der Machzahl des Reisefluges (unter Berücksichtigung einer mittleren Flughöhe im Reiseflug) umgerechnet. Aus diesem Vorgehen ergaben sich dann als Eingabewerte in das Programm zur Betriebskostenberechnung die Daten nach **Tabelle 2**.

Tabelle 8.2 Charakteristische Daten berechnet aus der Flugmission

| | Megaliner (A3XX-200) | A340-200 und A340-600 |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|
| TAS* im Steigflug | 220 m/s | 213 m/s |
| TAS im Reiseflug | 251 m/s | 242 m/s |
| TAS im Sinkflug | 194 m/s | 188 m/s |
| Rate Of Climb, <i>ROC</i> | 5.99 m/s | 6.47 m/s |
| Rate Of Descent, <i>ROD</i> | 8.61 m/s | 8.61 m/s |

- TAS = True Airspeed (wahre Fluggeschwindigkeit gegenüber der umgebenden Luft)

Schlußbericht

9 BERECHNUNGSERGEBNISSE

Mit Hilfe der in den Abschnitten 2 bis 8 beschriebenen Methoden und Eingabedaten (Referenzwerte) wurden die Betriebskosten des Wassersystems berechnet. Die Grenzen des Wassersystems wurden in Abschnitt 1 definiert. Ein Ausdruck der in das Berechnungsprogramm eingegebenen Daten ist im **Anhang** angegeben. Das gleiche gilt für den Ausdruck der Ergebnisse und Zwischenergebnisse, der für einige Rechnungen vollständig - für andere verkürzt - im **Anhang** angegeben ist.

Tabelle 9.1 stellt die Ergebnisse in absoluten Werten zusammen. Aufgrund von nur begrenzter Genauigkeit der vorhandenen flugzeugspezifischen Daten sind nur zwei Stellen der Ergebnisse signifikant. Tabelle 9.2 verdeutlicht den relativen Vergleich der Varianten. Dabei wurde Variante A zu 100% gesetzt

Tabelle 9.1: Betriebskosten (DOC_{SYS}) der Wassersysteme berechnet hier aus Beschreibung sowie Kraftstoffkosten für variable und fixe Massen. Angaben in US\$ pro Flugzeug und Jahr

| Variante: | A | B | C | D |
|-----------|----------|----------|----------|----------|
| A340-200 | 40099 \$ | 47485 \$ | 32450 \$ | 35535 \$ |
| A340-600 | 37857 \$ | 44828 \$ | 30728 \$ | 33634 \$ |
| Megaliner | 70060 \$ | 82515 \$ | 57095 \$ | 61960 \$ |

Tabelle 9.2: Betriebskosten (DOC_{SYS}) der Wassersysteme berechnet hier aus Beschreibung sowie Kraftstoffkosten für variable und fixe Massen. Relativer Vergleich mit Variante A = 100%

| Variante: | A | B | C | D |
|-----------|-------|---------|--------|--------|
| A340-200 | 100 % | 118.4 % | 80.9 % | 88.6 % |
| A340-600 | 100 % | 118.4 % | 81.2 % | 88.8 % |
| Megaliner | 100 % | 117.8 % | 81.5 % | 88.4 % |

Tabelle 9.3 zeigt für den Megaliner, welcher Systempreis (maximaler Preis) der Varianten C und D zu den gleichen DOC_{SYS} führen würde wie für die Variante A berechnet wurde. Tabelle 9.4 zeigt das Ergebnis einer entsprechenden Rechnung für die Summe der Masse der Komponenten im System m_{komp} . Bei der Berechnung nach Tabelle 4 wurden die fixen Massen so lange erhöht bis gleiche DOC zu Variante A erzielt wurden, anschließend wurde dann daraus m_{komp} mit Gleichung (4.12) errechnet.



Schlußbericht

Tabelle 9.3: (Maximaler) Preis für die Varianten C und D beim Megaliner zum Erreichen gleicher DOC_{SYS} wie für Variante A errechnet

| Variante: | A | C | D |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Systempreis | 136450 \$ | 156450 \$ | 159600 \$ |
| max. Preis | ----- | 372600 \$ | 294600 \$ |
| Faktor | 1.00 | 2.38 | 1.85 |

Tabelle 9.4: (Maximale) Masse der Komponenten, m_{komp} , für die Varianten C und D beim Megaliner zum Erreichen gleicher DOC_{SYS} wie für Variante A errechnet

| Variante: | A | C | D |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| Masse der Komponenten | 416 kg | 428 kg | 424 kg |
| max. Masse der Komponenten | ----- | 867 kg | 698 kg |
| Faktor | 1.00 | 2.03 | 1.65 |

Schlußbericht

Tabelle 9.5: Anteil der Kostenelemente Abschreibung sowie Kraftstoffkosten durch fixe und variable Massen an den berechneten Gesamtbetriebskosten

| Variante | Kostenelement | Megaliner | A340-200 |
|----------|--|----------------------|--------------------|
| A | Abschreibung, $Depr_{sys}$ | 11.69 % | 11.82 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von fixen Massen, m_{fix} darunter: durch Massen der Komponenten im System, m_{komp} | 88.53 % 17.53 % * | 88.51 % 17.09 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von variablen Massen, $m_{variabel}$ | 14.58 % | 14.67 % |
| B | Abschreibung, $Depr_{sys}$ | 11.90 % | 12.33 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von fixen Massen, m_{fix} darunter: durch Massen der Komponenten im System, m_{komp} | 88.10 % 16.53 % | 88.67 % 16.20 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von variablen Massen, $m_{variabel}$ | 0.00 % | 0.00 % |
| C | Abschreibung, $Depr_{sys}$ | 16.44 % | 16.46 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von fixen Massen, m_{fix} darunter: durch Massen der Komponenten im System, m_{komp} | 88.50 % 22.14 % | 88.35 % 21.31 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von variablen Massen, $m_{variabel}$ | 9.06 % | 9.19 % |
| D | Abschreibung, $Depr_{sys}$ | 15.46 % | 16.14 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von fixen Massen, m_{fix} darunter: durch Massen der Komponenten im System, m_{komp} | 88.54 % 20.21 % | 88.86 % 19.28 % |
| | Kraftstoffkosten $Fuel_{sys}$ durch Transport von variablen Massen, $m_{variabel}$ | 0.00 % | 0.00 % |

- Der Anteil der Kraftstoffkosten durch den Transport von Massen der Komponenten im System wurde bezogen auf die berechneten Gesamtbetriebskosten.

Das Verhältnis der Kostenelemente

- Abschreibung,
- Kraftstoffkosten durch den Transport von fixen Massen (darunter fallend: Kraftstoffkosten durch den Transport der Masse der Komponenten)
- Kraftstoffkosten durch den Transport von variablen Massen

wird in Tabelle 9.6 für zwei Flugzeuge und die vier Varianten zusammengestellt. Es zeigt sich,

Schlußbericht

daß die Hälfte bis ein Drittel der Betriebskosten durch den Transport des Wassers verursacht wird. Der Transport der Massen der Komponenten im System verursacht etwas höhere Kosten als durch Abschreibung anfallen.

Tabelle 9.6: „Trade-Off“ zwischen Systempreis fixen und variablen Massen

| Berechnungsgröße | Einheit | Megaliner | A340-200 |
|--|-----------|-----------|----------|
| $Depr_{SYS} / Price$ | - | 0.06 | 0.06 |
| $Fuel_{SYS} (m_{fix}) / m_{fix}$ | US\$ / kg | 29.53 | 32.32 |
| $Fuel_{SYS} (m_{variabel}) / m_{variabel}$ | US\$ / kg | 15.32 | 16.81 |
| $Price / m_{fix}$ | US\$ / kg | 492 | 539 |
| $Price / m_{variable}$ | US\$ / kg | 255 | 280 |

Tabelle 9.5 enthält einige „Trade-Off“ Ergebnisse. Die vollständige Berechnung ist als Tabelle im **Anhang** enthalten. Danach verhalten sich alle Systemvarianten an einem Flugzeug hinsichtlich des Trade-Offs gleich. Bedingt durch die Abschreibungsformel ergibt sich bei 90% Abschreibung in 15 Jahren pro Jahr eine Abschreibung von 6%. Für den Transport von jedem kg fixe Masse müssen beim Megaliner pro Jahr 29.53 US\$ ausgegeben werden. Variable Massen lassen sich bereits für 15.32 US\$/kg transportieren. Wenn man durch ein aufwendigeres (und teureres) System Gewicht sparen kann, so darf das System beim Megaliner bis 492 US\$ für jedes gesparte kg fixe Masse (bzw. Bis zu 255 US\$ für jedes gesparte kg variable Masse) teurer sein, wenn man die Summe der Betriebskosten nach dem ersten Jahr in Service gegenüber der Referenzlösung nicht überschreiten will. Wird mehr als der angegebene Satz zur Gewichtseinsparung ausgegeben, dann verlängert sich die Amortisation im Betrieb des Flugzeugs entsprechend über ein Jahr hinaus.

10 SENSITIVITÄTEN

Um die Auswirkung der Variation von Parametern auf die Betriebskosten des Wassersystems zu untersuchen wurden variiert:

- der Nutzungsgrad k_{nutz} (und damit die während des Fluges verbrauchte Frischwassermenge),
- die relative Frischwasserreserve k_{res} (und damit die verbleibende Frischwassermenge nach der Landung in den Frischwassertanks),
- der Kraftstoffpreis $FuelPrice$.

Betrachtet wurde bei der Parametervariation nur der Megaliner, weil sich die betrachteten Flugzeuge bei den relativen Werten (Tabelle 2 (2.6.9) nur sehr wenig unterscheiden. Zu beachten ist lediglich, daß der Megaliner bei den Kraftstoffkosten relativ zu der A340 geringfügig niedrigere Werte aufweist. Die Ursache ist in den günstigeren flugtechnischen Daten zu suchen. Tabelle 10.1 zeigt die absoluten Werte der DOC_{SYS} bei variierten Parametern.

Schlußbericht

Tabelle 10.1: Auswirkung von Parametervariationen auf die Betriebskosten (DOC_{SYS}) der Wassersysteme berechnet hier aus Abschreibung sowie Kraftstoffkosten für variable und fixe Massen des Megaliners. Angaben in US\$ pro Flugzeug und Jahr

| Parametervariation | A | B | C | D |
|---|-----------|-----------|----------|----------|
| Referenz: $k_{nutz} = 0.5$; $k_{res} = 0.5$; $FuelPrice = 0.2$ US\$/l | 70060 \$ | 82515 \$ | 57095 \$ | 61960 \$ |
| $k_{nutz} = 1$; $k_{res} = 0$ | 60601 \$ | 82515 \$ | 52302 \$ | 61960 \$ |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.9$ | 77644 \$ | 82515 \$ | 60930 \$ | 61960 \$ |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.05$ | 27445 \$ | 32316 \$ | 27046 \$ | 28090 \$ |
| $Fuel Price = 0.15$ US\$/l (75% von Ref.-Wert) | 54591 \$ | 64340 \$ | 45168 \$ | 48864 \$ |
| $Fuel Price = 0.30$ US\$/l (150% von Ref.-Wert) | 100996 \$ | 118865 \$ | 80950 \$ | 88152 \$ |

Ein Vergleich ist leichter möglich bei einer relativen Betrachtung wie in Tabelle 10.2 und Tabelle 10.3. Tabelle 10.2 vergleicht die Auswirkungen der Parametervariation relativ zum Parameter-Referenzsatz und liefert folgende Aussagen:

- Die DOC_{SYS} hängen bei einem geschlossenen System nur vom Füllungsgrad $k_{nutz} + k_{res}$ ab. Unerheblich ist, wieviel verbraucht wird.
- Bei offenen Systemen nehmen die DOC_{SYS} ab wenn viel Frischwasser verbraucht wird (k_{nutz} steigt), weil damit auch ein großer Anteil Grauwasser über Bord entsorgt werden kann und das Flugzeug leichter wird.
- Da nach Tabelle 5 (2.6.5) die DOC_{SYS} primär von den Kraftstoffkosten abhängen nehmen sie fast proportional mit dem Kraftstoffpreis ($FuelPrice$) ab (bzw. Zu).
- Die DOC_{SYS} nehmen bei geringem Füllungsgrad der Tanks (hier 15% bei Abflug) nicht proportional mit diesem ab (bzw. Zu), weil die Abschreibung bei geringen Füllungsgraden zunehmend die DOC_{SYS} beeinflusst.

Schlußbericht

Tabelle 10.2: Auswirkung von Parametervariationen auf die Betriebskosten (DOC_{SYS}) der Wassersysteme berechnet hier aus Abschreibung sowie Kraftstoffkosten für variable und fixe Massen des Megaliners. Angaben in % bezogen auf den Parametersatz mit den Referenzwerten

| Parametervariation | A | B | C | D |
|---|----------|----------|----------|----------|
| Referenz: $k_{nutz} = 0.5$; $k_{res} = 0.5$; $FuelPrice = 0.2$ US\$/l | 100,00 % | 100,00 % | 100,00 % | 100,00 % |
| $k_{nutz} = 1$; $k_{res} = 0$ | 86,50 % | 100,00 % | 91,61 % | 100,00 % |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.9$ | 110,83 % | 100,00 % | 106,72 % | 100,00 % |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.05$ | 39,17 % | 39,16 % | 47,37 % | 45,34 % |
| $Fuel Price = 0.15$ US\$/l (75% von Ref.-Wert) | 77,92 % | 77,97 % | 79,11 % | 78,86 % |
| $Fuel Price = 0.30$ US\$/l (150% von Ref.-Wert) | 144,16 % | 144,05 % | 141,78 % | 142,27 % |

Tabelle 10.3 vergleicht die Parametereinflüsse hinsichtlich der Frage, welche der Varianten unter allen Bedingungen als die günstigste abschneidet. Die DOC_{SYS} wurden dazu auf die Referenzkonfiguration (Variante A) bezogen.

Tabelle 10.3: Auswirkung von Parametervariationen auf die Betriebskosten (DOC_{SYS}) der Wassersysteme berechnet hier aus Abschreibung sowie Kraftstoffkosten für variable und fixe Massen des Megaliners. Angaben in % bezogen auf die Variante A

| Parametervariation | A | B | C | D |
|---|----------|---------|---------|----------|
| Referenz: $k_{nutz} = 0.5$; $k_{res} = 0.5$; $FuelPrice = 0.2$ US\$/l | 100,00 % | 17,78 % | 81,49 % | 88,44 % |
| $k_{nutz} = 1$; $k_{res} = 0$ | 100,00 % | 36,16 % | 86,31 % | 102,24 % |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.9$ | 100,00 % | 06,27 % | 78,47 % | 79,80 % |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.05$ | 100,00 % | 17,75 % | 98,55 % | 102,35 % |
| $Fuel Price = 0.15$ US\$/l (75% von Ref.-Wert) | 100,00 % | 17,86 % | 82,74 % | 89,51 % |
| $Fuel Price = 0.30$ US\$/l (150% von Ref.-Wert) | 100,00 % | 17,69 % | 80,15 % | 87,28 % |

Eine Interpretation fällt leichter, wenn die Variante B gleich 100% gesetzt wird, wie dies in **Tabelle 4** dargestellt ist. Denn allgemein gilt:

Gegenüber einem geschlossenen System ohne Grauwasseraufbereitungsanlage (Variante B) können die (dominierenden) Kraftstoffkosten reduziert werden durch

- ein Grauwassersystem und damit durch die Ableitung von Grauwasser über die Drain Masts,
- eine Grauwasseraufbereitungsanlage und damit die Reduzierung der benötigten Frischwassermenge.

Schlußbericht

Tabelle 10.4: Auswirkung von Parametervariationen auf die Betriebskosten (DOC_{SYS}) der Wassersysteme berechnet hier aus Abschreibung sowie Kraftstoffkosten für variable und fixe Massen des Megaliners. Angaben in % bezogen auf die Variante B

| Parametervariation | A | B | C | D |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Referenz: $k_{nutz} = 0.5$; $k_{res} = 0.5$; $FuelPrice = 0.2$ US\$/l | 84,91 % | 00,00 % | 69,19 % | 75,09 % |
| $k_{nutz} = 1$; $k_{res} = 0$ | 73,44 % | 00,00 % | 63,38 % | 75,09 % |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.9$ | 94,10 % | 00,00 % | 73,84 % | 75,09 % |
| $k_{nutz} = 0.1$; $k_{res} = 0.05$ | 84,93 % | 00,00 % | 83,69 % | 86,92 % |
| $Fuel Price = 0.15$ US\$/l (75% von Ref.-Wert) | 84,85 % | 00,00 % | 70,20 % | 75,95 % |
| $Fuel Price = 0.30$ US\$/l (150% von Ref.-Wert) | 84,97 % | 00,00 % | 68,10 % | 74,16 % |

Aus Tabelle 10.4 lassen sich folgende allgemeine Aussagen ableiten:

- Ein System mit Drain Masts verhält sich besonders vorteilhaft gegenüber Vergleichsvarianten, wenn viel Wasser verbraucht wird.
- Die DOC_{SYS} eines geschlossenen Systems sind unabhängig vom Verbrauch.
- Der Kraftstoffpreis hat praktisch keine Auswirkung auf die Wahl einer der Varianten A bis D.

Aus Tabelle 10.4 lassen sich folgende spezielle Aussagen ableiten:

- Die Variante A erreicht bei maximalem Verbrauch (hier: $k_{nutz} = 1$; $k_{res} = 0$) etwas geringere DOC_{SYS} als Variante D.
- Die Variante D erreicht bei normalen bis hohen Frischwasserreserven (hier untersucht: $k_{res} = 0.5$ und $k_{res} = 0.9$) deutlich geringere DOC_{SYS} als Variante A.
- Bei geringer Füllung der Tanks bei Abflug (hier: $k_{nutz} + k_{res} = 0.15$; also 15% Füllstand) sind nicht mehr die Kraftstoffkosten sondern ist die Abschreibung dominierend, so daß in diesem Fall wieder Variante A geringere DOC_{SYS} aufweist. Dieser letzte Fall dürfte jedoch nur für Langstreckenflugzeug interessant sein, die (untypisch) auf Kurzstrecke eingesetzt sind.

11 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurden die Betriebskosten für vier Varianten von Wassersystemen berechnet. Berücksichtigt wurden dabei zunächst quantitativ nur die Kostenelemente „Abschreibung“ und „Kraftstoffkosten durch den Transport von fixen und variablen Massen“. Gemäß diesem Vorgehen betragen die **Betriebskosten** der Wassersysteme in den gewählten Grenzen (Abschnitt 1) je nach Konzept und Flugzeug **zwischen 3000 US\$ und 8000 US\$ je Flugzeug beim Betrieb über ein Jahr**. Da 1.) das gesamte Wasser/Abwassersystem (ATA 38) noch mehr Komponenten umfaßt als hier berücksichtigt und 2.) nicht alle Kostenelemente erfaßt wurden, sind die tatsächlich entstehenden Kosten noch höher. Aus diesen Zahlen wird deutlich, daß es sich auch in den finanziellen Dimensionen einer Luftverkehrsgesellschaft durchaus lohnt, über eine Reduzierung der Betriebskosten von Wassersystemen nachzudenken.



Schlußbericht

Etwa **2/3 der Betriebskosten² fallen an, weil Wasser transportiert werden muß**. Aus diesem Grund liegt es nahe, Techniken wie die Grauwasseraufbereitung einzusetzen, um Wasser und damit Kraftstoff einzusparen.

Variante C (Einsparung von Wassers durch eine Grauwasseranlage und zusätzlich durch Drain Masts) erreicht bei der hier durchgeführten Berechnung die geringsten Betriebskosten¹. Ob nun Drain Masts allein oder eine Grauwasseranlage allein die geringeren Betriebskosten¹ liefert, ist nicht eindeutig zu beantworten. Dieser Vergleich hängt vom Einsatzspektrum des Flugzeugs und damit von der Befüllung des Wassersystems ab. **Eine abschließende Aussage zur Auswahl der besten Variante kann erst getroffen werden, wenn alle Kostenelemente - auch die, die in Abschnitt 3 nur qualitativ behandelt wurden - quantitativ ermittelt sind.**

Quasi als Ausblick auf diese Aufgabe und um die Betrachtung in diesem Bericht abzurunden, wird hier der Versuch unternommen, die qualitativen Ergebnisse aus Abschnitt 3 und die quantitativen Ergebnisse aus Abschnitt 9 zusammenzufassen (siehe dazu Hinweise am Ende von Abschnitt 3). Das Ergebnis enthält Tabelle 11.1 und besagt: **Es gibt ein neues technisches Konzept, daß gegenüber der bisherigen Technik (Variante A: mit Drain Mast, ohne Grauwasseraufbereitung) insgesamt Kostenvorteile besitzt.**

Tabelle 11.1: Versuch einer groben Gesamtbeurteilung der vier Varianten A, B, C und D unter Einbeziehung aller Kostenelemente

| | Wichtung | A | B | C | D |
|--|----------|-------|----------|---------|---------|
| Ergebnis aus Abschnitt 3 | 0.375 | 100 % | 0 | 20 % | 10 % |
| Ergebnis aus Abschnitt 9 (Megaliner) | 0.625 | 100 % | 117.78 % | 81.49 % | 88.44 % |
| geschätzte Gesamtbetriebskosten relativ zu A | --- | 100 % | 74 % | 126 % | 93 % |

² bei einer Betrachtung nur der Kostenelemente "Abschreibung" und "Kraftstoffkosten durch den Transport von fixen und variablen Massen"



12 LITERATURVERZEICHNIS

- [AEA 89a] ASSOCIATION OF EUROPEAN AIRLINES: *Short-Medium Range Aircraft AEA Requirements*, Brüssel : AEA, 1989 (G(T)5656)
- [AEA 89b] ASSOCIATION OF EUROPEAN AIRLINES: *Long Range Aircraft AEA Requirements*, Brüssel : AEA, 1989 (G(T)5655)
- [AIR 1168] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS: *Aerospace Information Report 1168/8: Aircraft Fuel Weight Penalty Due to Air Conditioning*, Warrendale : SAE, 1989
- [AIRBUS 88] AIRBUS INDUSTRIE: *Airbus Project D.O.C. Method*, Toulouse, 1988 (AI/TA - P812.076/88 ISS.1). - Firmenschrift
- [AIRBUS 96] AIRBUS INDUSTRIE: *A340 Quarterly Service Report, December 1996*, Toulouse, 1986 (Customer Service Directorate, Tel. 0033-5-61-93-29-41). - Firmenschrift
- [ATA 67] AIR TRANSPORT ASSOCIATION OF AMERICA: *Standard Method of Estimating Comparative Direct Operating Costs of Turbine Powered Transport Airplanes*, Washington D.C. : ATA, 1967.
- [ATA 94] AIR TRANSPORT ASSOCIATION OF AMERICA: *Specification for Manufacturers' Technical Data, ATA Specification 100*, Washington D.C. : ATA, 1981
- [BODERGRAVEN 90] VAN BODERGRAVEN, G.W.: *Commercial Aircraft DOC Methods*, (AIAA / AHS / ASEE Aircraft Design, Systems and Operations Conference, Dayton, 17.-19. September 1990), American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1990 (Paper AIAA-90-3224-CP)
- [LUFTHANSA 82] LUFTHANSA: *DLH Method 1982 for Definition of the Performance and Direct Operating Costs of Commercial Fixed Wing Aircraft*, Lufthansa, Hamburg, 1982. - Firmenschrift
- [NASA 77] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (Hrsg.): *A New Method for Estimating Current and Future Transport Aircraft Operating Economics / American Airlines*, New York. Washington D.C. : NASA, 1977 (NASA CR-145190)
- [RAYMER 89] RAYMER, D. P.: *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, AIAA Education Series, Washington D.C. : AIAA, 1989
- [RHEE 93] VAN RHEE, G.: *DOC Groundrules 1993 for the Economic Evaluation of Fokker New Aircraft*, Fokker Aircraft B.V., Amsterdam, 1993 (RP-93-523). - Firmenschrift
- [ROSKAM 90] ROSKAM, J.: *Airplane Design*, Bd. 1-8, Ottawa, Kansas, 1990. - Vertrieb: Analysis and Research Corporation, 120 East Ninth Street, Suite 2, Lawrence, Kansas, 66044, USA.
- [SCHOLZ 95] SCHOLZ, D.: Betriebskostenschätzung von Flugzeugsystemen als Beitrag zur Entwurfsoptimierung, (Deutscher Luft- und Raumfahrtkongreß, Bonn, 26. - 29. September 1995). In: BÜRGENER, G. (Hrsg.): *Jahrbuch 1995 I*, Bonn : Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, 1995, S. 50 - 61
- [STATISTICS 96] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Energy Prices and Taxes, First Quarter 1996*, Paris : Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1996

AP 6 Fortschrittliches Wassersystem
AP 6.3 Grauwasseraufbereitung

Schlußbericht



[THUDT 97] THUDT, K.: [Daten zum] Angebot: Großraumflugzeuge mit Grauwasser-
aufbereitung, Betriebskosten: Fax. 1997-03-03, Karlsfeld : MAN
Technologie AG