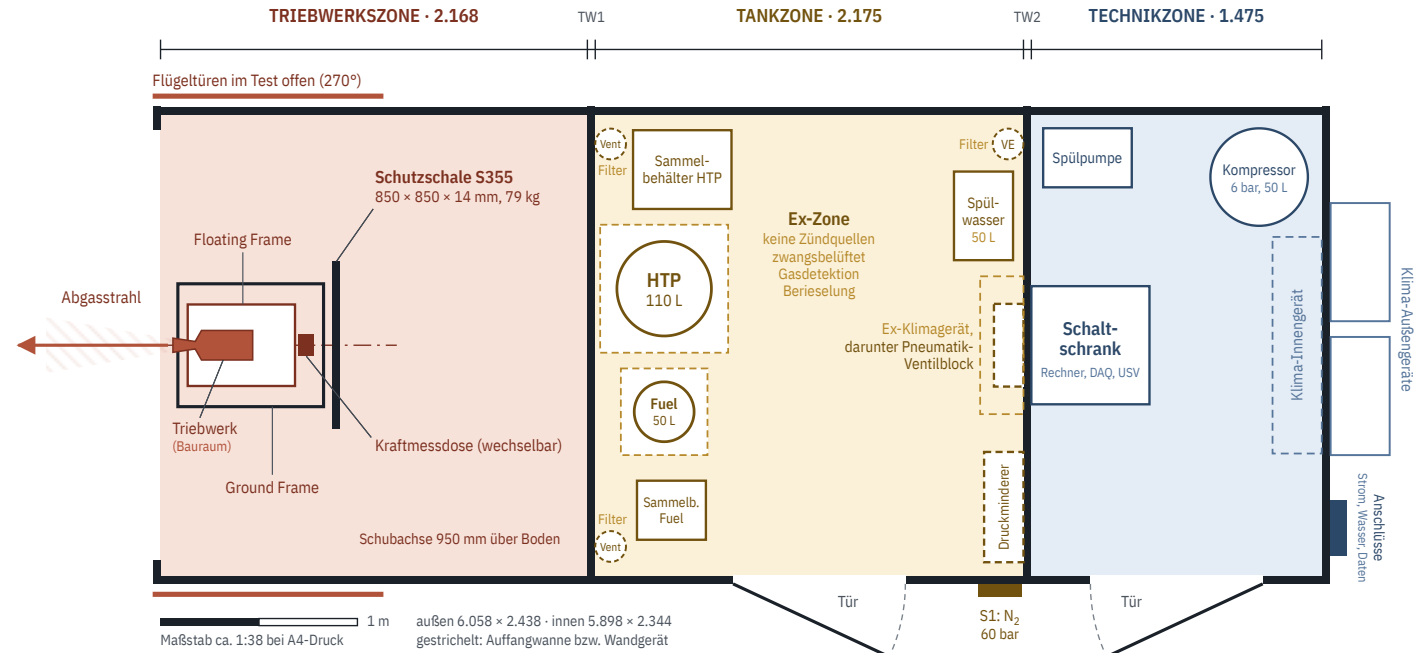


TERRA ist das Konzept eines mobilen Heißtest-Prüfstands für druckgeförderte Zweistoff-Raketentriebwerke mit HTP (hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid) als Oxidator. Der Prüfstand ist fest in einen 20-ft-Container eingebaut, fährt auf einem PKW-Anhänger (Klasse BE) zum Einsatzort, wird dort abgesetzt und aus einem separaten Kontrollstand bedient. Konzeptstand, keine gebaute Anlage.

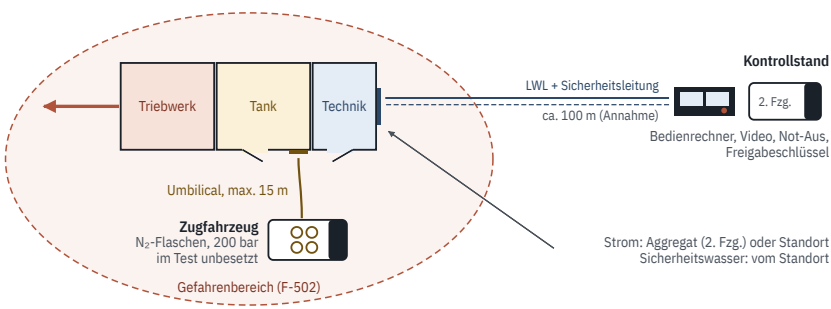
1 / 5 kN Nennschub / Envelope-Schub	30 bar Brennkammerdruck	60 s Auslegungsbrenndauer	110 + 50 L Tank HTP + Tank Treibstoff	39 bar Tankdruck, Aufdruck mit N ₂	3.243,6 kg Anhänger gesamt, zulässig 3.500 kg
---	-----------------------------------	-------------------------------------	---	---	---

01 CONTAINER-LAYOUT Draufsicht, Heck links, Bug rechts, Türseite unten · Zonenlängen maßstäblich, Lage der Komponenten schematisch · Maße in mm



Triebwerkszone · Heck Triebwerk horizontal im Floating Frame, Schub über Kraftmessdose in den verschraubten Ground Frame. Schutzhülle schirmt TW1 ab.	Tankzone · Mitte · Ex-Zone Tanks mittig in Auffangwannen, Sammelbehälter außen. An TW2 Spülwasser, Ventilblock, Ex-Klimagerät, Druckminderer. Alle Ventile pneumatisch.	Technikzone · Bug Schaltschrank an TW2 mit Steuerung, Datenerfassung, USV. Anschlüsse Strom, Wasser, Daten an der Bugwand.
---	---	--

02 AUFSTELLUNG AM EINSATZORT schematisch, nicht maßstäblich



03 BETRIEBSZUSTÄNDE

Zustand	Tanks · Druck	Personen
Idle	leer · drucklos	unbegrenzt
Access	betanken · drucklos	1 bis 2
Pre-Test	befüllt · wird aufgedrückt	niemand
Test	Zündung · unter Aufdruck	niemand
Post-Test	abgeblasen · drucklos	niemand

Danach **Pre-Test** (Serie) oder **Access** (nachtanken). Pre-Test nur mit Freigabeschlüssel am Kontrollstand. **Hold** und **Safe** bei Störung, manuell quittiert.

Triebwerk und Messung	
Triebwerke	druckgefördert, Zweistoff, als Black Box
Auslegung	Fluid, Struktur 5 kN · Messkette 1 kN
Brenndauer	63,8 s je Tankfüllung bei 5 kN
Schub	Kraftmessdose, 1/5 kN per Distanzstück
Massenstrom	Coriolis, für HTP und Treibstoff
Sensorik	Druck, Temperatur, Füllstand, Video
Steuerung und Sicherheit	
Ebenen	Steuerrechner plus Sicherheitskette
Im Container	Datenerfassung, Speicherung, Logik
Kontrollstand	nur Bedienung, Anzeige, Not-Aus
Ex-Schutz	eigensicher, Gas: UEG und O ₂
Brand	Flammenmelder, Berieselung (Wasser)
Personen	Notdusche außen, Not-Aus in jeder Zone

Medien und Fluidsystem	
Oxidator	HTP 90 % (Rechnung), 100 % (Werkstoff)
Treibstoffe	Kerosin, Ethanol, Propan
Tanks	1.4404, einwandig, PN 40, Auffangwanne
Leitungen	DN 15 HTP, DN 10 Treibstoff
HTP-Pfad	TIV → Filter → Coriolis → MRV
Ventile	pneumatisch, stromlos geschlossen
Transport und Masse	
Container	CONTAINEX LC 20 ft, leer 1.270 kg
Anhänger	Containeranhänger, rund 560 kg
Gesamt	3.243,6 kg (92,7 %), Reserve 256,4 kg
Margen	5 / 10 / 20 % nach Herkunft
Maße beladen	B 2.438 · H 3.271 · L 7.500 mm
Zugfahrzeug	zGG max. 3.500 kg, z. B. VW Crafter 35

Druckgas und Pneumatik	
Stufe 0	N ₂ 200 bar, 4 × 50 L auf Zugfahrzeug
Stufe 1	60 bar, Umbilical DN 12, max. 15 m
Stufe 2a	39 bar Aufdruck der Tanks
Stufe 2b	10 bis 20 bar Spülung Treibstoffpfad
Reichweite	rund 5 Tankfüllungen, max. 6 Flaschen
Druckluft	eigener Kompressor, 6 bar, 50-L-Kessel
Aufbau und Betrieb	
Absetzen	4 Hubpfosten, alternativ Kran, Stapler
Aufstellung	Antirutschmatten, $\mu = 0,6$
Strom	6,8 bis 7,7 kW, CEE 16 A
Autark	Strom, Druckgas, Spülwasser
Vom Standort	Sicherheitswasser, Nachlieferung Medien
Umgebung	0 bis 35 °C, Aufbauziel 2 Arbeitstage



Fakultät 5 — Natur und Technik

Abteilung Maschinenbau

Studiengang Aerospace Technologies M. Sc.

Master-Thesis

TERRA Concept

Konzeptioneller Entwurf eines mobilen Teststands
für Raketentriebwerke bis 5 kN Schub

Thesis-Nr. M.26.01

Vorgelegt von Henry Kröger

Matrikelnummer 

Erstprüfer Prof. Dr. Antonio Francisco García Marín

Zweitprüfer Henrik Kranich

Abgabedatum 2. September 2026

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, sind als solche kenntlich gemacht. Dies gilt ebenso für beigefügte Zeichnungen, Skizzen, Grafiken und bildliche Darstellungen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ich versichere ferner, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt, und erkläre mich damit einverstanden, dass die Arbeit mit Hilfe eines Plagiatserkennungsdienstes auf Plagiate überprüft wird.

Erklärung zur Verwendung KI-gestützter Werkzeuge

Bei der Erstellung dieser Arbeit wurden KI-gestützte Werkzeuge eingesetzt. Verwendet wurde Claude der Firma Anthropic im Bearbeitungszeitraum von April bis September 2026. Die Verwendung wurde mit den Prüfern abgestimmt. Es gilt Option 2 der KI-Eigenständigkeitserklärung der Hochschule Bremen, also die Nutzung mit Kennzeichnungspflicht.

Eingesetzt wurden die Werkzeuge für die Gliederung und Strukturierung des Berichts, für die Prüfung auf begriffliche und inhaltliche Konsistenz zwischen Kapiteln, Tabellen und Anhang, für den Aufbau der Rechendateien, für die Korrektur von Rechtschreibung, Grammatik und Zeichensetzung sowie für die Projekt- und Zeitplanung.

Nicht eingesetzt wurden die Werkzeuge für das Verfassen des Fließtextes, für technische Entscheidungen und deren Begründung, für die Erzeugung von Zahlenwerten sowie für die Auswahl und Erzeugung von Quellen. Die inhaltliche Verantwortung für alle Aussagen, Rechnungen und Entscheidungen dieser Arbeit liegt vollständig bei mir.

Ort, Datum

Henry Kröger

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung	2
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Motivation und Hintergrund	10
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung	11
1.3 Aufbau der Arbeit	13
2 Stand der Technik	14
2.1 Übersicht mobiler Raketentriebwerksprüfstände	14
2.2 HTP als Oxidator — Eigenschaften und Handhabung	16
2.3 Relevante Normen und Richtlinien	18
3 Methodik	22
3.1 Vorgehensmodell	22
3.2 Informationsbasis und Werkzeuge	23
3.3 Anforderungsmanagement	25
3.4 Entscheidungs- und Bewertungsmethodik	25
3.5 Detaillierungsgrundsatz	26
3.6 Umgang mit Annahmen und Margen	27
4 Anforderungsanalyse	29
4.1 Triebwerks-Rahmenparameter	29
4.2 Aufbau und Umfang des Anforderungskatalogs	32
4.3 Auslegungsbestimmende Anforderungen	33

5	Gesamtkonzept des Prüfstands	36
5.1	Systemarchitektur und Modulstruktur	36
5.2	Zonenkonzept und Begründung	40
5.3	Container-Layout, CAD-Modell und physisches Modell	42
5.4	Mechanische Integration	48
5.5	Gewichtsbudget und Mobilitätsanforderungen	49
5.6	Klimatisierung	52
6	Fluid- und Mediensysteme	54
6.1	Oxidatorsystem (HTP)	54
6.2	Treibstoffsystem (Mehrstofffähigkeit)	59
6.3	Druckgasversorgung und Regelung	60
6.3.1	Funktion und Abgrenzung	61
6.3.2	Wahl des Druckgases	62
6.3.3	Aufdruck- und Blowdown-Verfahren	62
6.3.4	Aufbau der Druckkaskade	63
6.3.5	Auslegung	67
6.3.6	Sicherheits- und Überwachungskonzept	72
6.4	Spül-, Befüll- und Entleerkonzepte	74
6.5	Druckluftsystem	76
7	Mess-, Überwachungs- und Steuerungssysteme	78
7.1	Messequipment und Sensorik	78
7.2	Datenerfassung und Signalverarbeitung	82
7.3	Steuerungsarchitektur	84
7.4	Betriebszustände und Zustandsautomat	86
7.5	Verriegelungen, Störungsreaktion und Notabschaltung	91
8	Betriebskonzept	96
8.1	Autarker Betrieb	96
8.2	Betrieb mit Standortversorgung	99
8.3	Betriebsablauf einer Testkampagne	106
9	Transport- und Aufbaukonzept	110
9.1	Transport auf der Straße	110
9.2	Zugfahrzeug und mitgeführte Ausrüstung	113

9.3	Aufbau und Rangieren am Einsatzort	116
10	Kontrollstand	120
10.1	Prüfung der Integration im Zugfahrzeug	120
10.2	Mitgeführter Kontrollstand	122
10.3	Schnittstellen zum Prüfstand	123
11	Sicherheits- und Brandschutzkonzept	127
11.1	Gefährdungsanalyse	128
11.2	Passive Schutzmaßnahmen	134
11.3	Aktive Schutzmaßnahmen	137
11.4	Normkonformität und Nachweisführung	140
12	Bewertung und Zusammenfassung	142
12.1	Technische Bewertung des Gesamtkonzepts	142
12.2	Risiken und offene Punkte	145
12.3	Zusammenfassung und Empfehlungen für die Realisierung	149
	Literaturverzeichnis	151
A	Anhang	153
A.14	Aufgabenstellung	169
A.15	Anforderungsdokument	174
A.16	Standort-Checkliste nach B-162	210
A.17	R&I-Fließbilder	215
A.18	Zustandsdiagramm	221
A.19	Datenblätter	223
A.20	Schriftverkehr	237

Abbildungsverzeichnis

5.1	Isometrische Ansicht des CAD-Modells	47
-----	--	----

Tabellenverzeichnis

1.1	Kernfragen der Arbeit und ihre Behandlung	12
2.1	Vergleich der betrachteten Referenzprüfstände	16
2.2	Regelungsbereiche und bindende Regelwerke	19
4.1	Triebwerks-Rahmenparameter im 5-kN-Envelope	31
5.1	Schnittstellen des Prüfstands nach außen	39
5.2	Vergleich der betrachteten Plattformvarianten	43
5.3	Randbedingungen des gewählten Containers	45
5.4	Heiz- und Kühllast je Zone und gewählte Klimageräte	53
6.1	Druckstufen des Gasdruckstrangs	64
6.2	Druckverluste für Schlauchleitungen verschiedener Innendurchmesser	71
7.1	Messstellen des Konzepts	80
7.2	Zustände des Zustandsautomaten	88
7.3	Störungen, Abstufung und Reaktion	93
8.1	Standortversorgung in Trauen und zugehörige Schnittstellen	102
8.2	Vergleich von autarkem Betrieb und Betrieb mit Standortversorgung .	105
9.1	Außenmaße des beladenen Anhängers gegen die Grenzen der StVZO	111
9.2	Reibwerte, Haltekräfte und Sicherheiten gegen Wegrutschen	118
10.1	Schnittstellen zwischen Prüfstand und Kontrollstand	124
11.1	Bewertungsskalen der Risikoeinstufung	129
11.2	Gefährdungen mit Einstufung vor und nach der Maßnahme	132
12.1	Kenndaten des Konzepts	143
12.2	Offene Punkte nach Klassen	146
A.1	Rechenweg der Triebwerks-Rahmenparameter	153

A.2	Druckstufen der Pressurant-Kaskade	154
A.3	Stickstoffvolumen für den Aufdruck der Tanks	155
A.4	Stickstoffbudget und Flaschenanzahl	156
A.5	Spitzendurchfluss, Druckverlust im Umbilical und Druckmarge	157
A.6	Erforderlicher Kv-Wert der ersten Regelstufe über dem Flaschendruck	158
A.7	Massenbilanz des Prüfstands	159
A.8	Herkunftsbilanz und Nachweis gegen die Grenze von 3.500 kg	162
A.9	Offene Entscheidungen mit Massenwirkung	163
A.10	Mitgeführtes Equipment und Nachweis gegen die Nutzlast	164
A.11	Anforderungen an das Zugfahrzeug und Kennwerte des Beispielfahrzeugs	166
A.12	Elektrische Leistungsbilanz nach F-620	167
A.13	Schutzschale: Schattengeometrie, Wandstärke und Masse	168

Abkürzungsverzeichnis

ADR	Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road, Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
ATEX	Atmosphères explosibles, explosionsfähige Atmosphären
CAD	Computer-Aided Design, rechnergestützte Konstruktion
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FFF	Fused Filament Fabrication, Schmelzschichtung (3D-Druckverfahren)
ft	Foot, Fuß (Längeneinheit, 1 ft = 0,3048 m)
GSE	Ground Support Equipment, Bodenausrüstung
HTP	High Test Peroxide, hochkonzentriertes Wasserstoffperoxid
IBC	Intermediate Bulk Container, Großpackmittel
ICD	Interface Control Document, Schnittstellendokument
ISO	International Organization for Standardization, Internationale Organisation für Normung
LOTO	Lockout-Tagout, Sperren und Kennzeichnen
MRV	Main Run Valve, Hauptventil
R&I	Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TIV	Tankisoliationsventil
TW1/TW2	Trennwand 1 / Trennwand 2

1 Einleitung

Das in dieser Arbeit beschriebene Konzept eines mobilen Prüfstands für Raketen-triebwerkstests mit hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid (High Test Peroxide, HTP) als Oxidator unterscheidet sich von üblichen Prüfständen, die ortsfest und an die Infrastruktur ihres Standorts gebunden sind. Der Prüfstand TERRA erhält seine Mobilität durch einen 20-ft-Container als Basis und lässt sich auf einem PKW-Anhänger an wechselnde Standorte bringen. Das vorliegende Kapitel ordnet das Projekt in seinen fachlichen und förderpolitischen Rahmen ein und beschreibt Ziel und Abgrenzung der Arbeit. Auch der Aufbau des Berichts wird umrissen.

1.1 Motivation und Hintergrund

Die in diesem Projekt vorgesehene Kombination aus HTP und einem Kohlenwasserstoff als Treibstoff ist im Vergleich zu den in der Raumfahrt etablierten lagerfähigen Kombinationen aus Hydrazinen und Stickstoffoxiden wesentlich weniger gesundheitsschädlich [1, 2].

Dies ist der wesentliche Beweggrund für das Vorhaben BreSpaceTech 2025+, das im Rahmen des EFRE-Programms des Landes Bremen 2021–2026 gefördert wird. Der Senat der Freien Hansestadt Bremen hat das Vorhaben am 7. Januar 2025 beschlossen und dafür 3,83 Mio. Euro für den Zeitraum 2026 bis 2029 bereitgestellt [3]. Umgesetzt wird es vom Institute for Aerospace Technologies (IAT) der Hochschule Bremen. Gefördert werden Einrichtungen, die genau diese Kombination aus HTP als Oxidator und Kohlenwasserstoff als Treibstoff nutzen.

Als Oxidator wurde im Programm HTP gewählt. Es ist bei Umgebungstemperatur lagerfähig, weder giftig noch karzinogen, und zersetzt sich ausschließlich zu Wasser und Sauerstoff. Gegenüber Distickstofftetroxid (N_2O_4) und kryogenem Sauerstoff sind dies erhebliche Vorteile. Die Stoffeigenschaften und die daraus folgenden Handhabungsanforderungen sind Gegenstand von Abschnitt 2.2.

Auch der in dieser Arbeit behandelte Prüfstand ist Teil dieses Förderprogramms. Er findet sich in der Senatsvorlage unter der Position „Teststand für Heißtests von Zweistofftriebwerken“[3]. Die Bezeichnung TERRA ist ein hochschulinterner Projektnamen und erscheint dort nicht.

Da sich die Programminfrastruktur noch im Aufbau befindet und die Mittel für die Baumaßnahmen laut Senatsvorlage bis 2028 eingeplant sind, wird der Prüfstand gebraucht, bevor ein dauerhafter Standort zur Verfügung steht. Die Mobilität ist damit keine zusätzliche Eigenschaft, sondern Voraussetzung für den Betrieb. Der Prüfstand kann an Orten eingesetzt werden, an denen Sicherheitsabstände und Genehmigungen Heißläufe mit HTP zulassen.

Welche Standorte konkret zur Verfügung stehen, ist zum jetzigen Zeitpunkt offen und wird sich über die Laufzeit des Programms ändern. In Betracht kommen bestehende Einrichtungen wie der Standort Trauen des DLR (Abschnitt 8.2). Was die einzelnen Orte bereitstellen, unterscheidet sich und ist teilweise ebenfalls offen. Daraus folgt, dass der Betrieb auch ohne ortsseitige Versorgung gelingen muss.

Der Prüfstand wird für wechselnde Projekte ausgelegt und nicht als Einzellösung für ein bestimmtes Triebwerk. Dieselbe Überlegung trägt die Fähigkeit, mehrere verschiedene Treibstoffe zu verwenden.

Daraus ergibt sich die konkrete Aufgabenstellung dieser Arbeit.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein vollständiges, konsistentes und technisch fundiertes Konzept als Grundlage für die spätere Detailkonstruktion zu entwickeln. Dazu entstehen dieser Bericht, ein Anforderungsdokument mit den zugehörigen Begleitdokumenten, ein CAD-Modell sowie ein physisches Modell. Die vollständige Auflistung der Arbeitsergebnisse findet sich in Abschnitt 12.3.

Tabelle 1.1 stellt die vier Kernfragen dieser Arbeit zusammen und gibt an, in welchem Kapitel sie behandelt werden. Beantwortet werden sie in Abschnitt 12.3.

Tabelle 1.1: Kernfragen der Arbeit und ihre Behandlung.

Nr.	Kernfrage	Behandelt in
1	Wie lässt sich ein bipropellanter Prüfstand so in einen 20-ft-Container integrieren, dass die Gewichts- und Platzgrenzen eines PKW-Anhängers eingehalten werden?	Abschnitte 5.3, 5.5 und 9.1
2	Wie ist das Fluidsystem aufzubauen, damit ein Wechsel des Treibstoffs möglich ist?	Abschnitte 4.1 und 6.2
3	Welche sicherheits- und brandschutztechnischen Maßnahmen sind erforderlich, und wie werden sie normkonform nachgewiesen?	Abschnitt 2.3 und Kapitel 11
4	Unter welchen Bedingungen ist ein autarker Betrieb möglich, und wo ist eine Ground-Support-Infrastruktur erforderlich?	Abschnitte 8.1 und 8.2

Um den Rahmen der Bearbeitung zu setzen, wurden die folgenden Abgrenzungen vorgenommen.

Der in der Aufgabenstellung genannte Treibstoff Nitromethan wird für die Auslegung nicht weiter betrachtet. Die in Abschnitt 4.1 durchgeführte Parameterrechnung zeigt, dass die Kennwerte deutlich von denen der drei übrigen Treibstoffe abweichen. Eine Auslegung, die Nitromethan über die geforderte Brenndauer trägt, würde eine abweichende Tankkonfiguration erfordern und den Prüfstand damit auf einen Sonderfall ausrichten. In Abstimmung mit den Betreuern wurde stattdessen entschieden, die Brenndauer für Nitromethan zu begrenzen und die Auslegung auf die drei übrigen Treibstoffe zu stützen.

Ebenfalls nicht betrachtet werden pumpengeförderte Triebwerke sowie Brennkammerdrücke über 30 bar. Bei druckgeforderten Systemen muss der Tankdruck stets oberhalb des Brennkammerdrucks liegen. Mit steigendem Kammerdruck wachsen daher Tankdruck, Wandstärke und Masse, ohne dass dem ein Nutzen für den Prüfbetrieb gegenübersteht. Oberhalb dieses Bereichs kommen Pumpen zum Einsatz. Die Grenze ist eine Abgrenzung des Konzepts und keine physikalische Schwelle. Die elektrische Pumpenförderung ist zwar erklärtes Ziel des Förderprogramms, jedoch erst Gegenstand einer späteren Ausbaustufe [3].

Das Triebwerk wird als Black Box behandelt, es geht also allein um sein Verhalten an den Schnittstellen und nicht um seinen inneren Aufbau. Für mögliche Triebwerke wird hierzu eine überschlägige Parameterrechnung durchgeführt (siehe Abschnitt 4.1).

Die Arbeit hat konzeptionellen Charakter. Es wird kein Prototyp aufgebaut und keine experimentelle Validierung durchgeführt. Eine Steuerungssoftware wird nicht implementiert, sondern lediglich konzeptionell beschrieben.

Die Kombination aus der festen Umhausung durch den Container, HTP als Oxidator und der Durchführung von Heißtests an der Anlage selbst findet sich in dieser Form in keinem der in Abschnitt 2.1 betrachteten Referenzprüfstände. Sie bindet damit den wesentlichen Teil der Bearbeitung. Um den Umfang der Arbeit nicht zu sprengen, wurde der Rahmen an den zuvor genannten Stellen beschränkt und zusätzlich die Bearbeitungstiefe festgelegt. Die Erläuterung hierzu findet sich in Abschnitt 3.5.

1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 legt die Grundlagen für das vorliegende Konzept. Behandelt werden Referenzprüfstände, der Oxidator HTP sowie die relevanten Normen und Richtlinien. Kapitel 3 legt die Methodik und die Bearbeitungsregeln dar, die für die folgenden Kapitel gelten. Kapitel 4 bildet die Eingangsseite der Ableitungskette: Dort werden die Triebwerks-Rahmenparameter hergeleitet, Aufbau und Umfang des Anforderungskatalogs erläutert und die auslegungsbestimmenden Anforderungen dargestellt. Anschließend folgt in den Kapiteln 5 bis 11 der Hauptteil des Konzepts, dessen Ausarbeitung von globalen zu lokalen Eigenschaften fortschreitet. Den Abschluss bildet Kapitel 12 mit einer Bewertung, den offenen Punkten und Empfehlungen für die weitere Bearbeitung des Projekts. Dort werden auch die vier Fragen beantwortet, die in Abschnitt 1.2 gestellt werden.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die drei Grundlagen dargelegt, auf denen die Fachkapitel 4 bis 11 aufsetzen. Behandelt werden Referenzprüfstände, die einen ähnlichen Aufbau oder ähnliche Betriebsmittel verwenden wie das vorliegende Prüfstandskonzept, die Stoffdaten des Oxidators HTP sowie die relevanten Normen und Richtlinien.

Aufgenommen wurden ausschließlich Referenzen, die im weiteren Verlauf der Konzeptentwicklung tatsächlich eine Aussage tragen. Auswahlkriterium ist der Detaillierungsgrundsatz nach Abschnitt 3.5. Für die Referenzprojekte gilt dabei die in Abschnitt 3.2 festgelegte Regel: Sie dienen als Vergleichsmaßstab und Plausibilitätscheck, liefern für sich genommen jedoch keinen Nachweis.

2.1 Übersicht mobiler Raketentriebwerksprüfstände

Im Folgenden werden vier Systeme betrachtet. Es handelt sich um mobile Einrichtungen für flüssige Treibstoffe bis rund 25 kN Schub. Ortsfeste und große Prüfstände sind nicht Gegenstand dieser Übersicht. Der Standort Trauen erscheint in Abschnitt 8.2 als vorgesehener Einsatzort und nicht als Referenzprüfstand. Von den vier herangezogenen Systemen sind drei Teststände und eines eine Versorgungsinfrastruktur.

Bei Project Atlas handelt es sich um einen anhängerbasierten, offenen Aufbau, der universell für Hybrid-, Mono- und Bipropellant-Triebwerke bis 22 kN Schub ausgelegt ist [4]. Herangezogen wurde das Projekt vor allem als Referenz für die Schutzschale (Blast Shield) aus 19,05 mm Edelstahl, sowie für die Modularität gegenüber wechselnden Triebwerken. Die Veröffentlichung enthält jedoch keine Auslegung der Schutzschale. Die angegebene Dicke entspricht einer Katalogstärke, ihre Herleitung ist nicht nachvollziehbar. Aus diesem Grund werden in Abschnitt 11.2 zwei voneinander unabhängige Rechenwege verfolgt.

Bei MRETS handelt es sich ebenfalls um einen anhängerbasierten Prüfstand, ausgelegt bis 22,24 kN [5]. Die Schutzschale ist dort über eine ballistische Normklasse spezifiziert

und besteht aus Panzerblech, Kevlar und einem Rückblech. Eine Auslegung gegen einen gerechneten Fragmentlastfall liegt somit auch hier nicht vor. Ebenfalls zum Einsatz kommt eine wechselbare Montageplatte für die Kraftmessdose, die als Präzedenzfall für die Anforderung F-301 dient. Anforderungen werden im Folgenden mit ihrer Nummer aus dem Anforderungsdokument benannt, der vollständige Katalog liegt in Anhang A.15. Als dritter Rechenweg für die Schutzschale wurde MRETS in Abschnitt 11.2 herangezogen, aufgrund der Abweichung jedoch verworfen.

Der naheliegendste Vergleich ist der bei Ringas beschriebene Prüfstand der UCT [6]. Es handelt sich um einen mobilen, ferngesteuerten und modularen Prüfstand, der auf einen Schubbereich von 1 kN ausgelegt ist. Auch dort wird druckgefördert, mit Stickstoff aus einer Flaschenbatterie über Druckminderer, und auch dort fällt die Wahl auf das Aufdruck- und nicht auf das Blowdown-Verfahren (siehe Abschnitt 6.3.3). Damit liegt eine externe Bestätigung für die in Abschnitt 6.3 getroffenen Entscheidungen vor. Dieselbe Ausgangsanforderung eines 20-ft-Containers findet sich ebenfalls bei dieser Referenz, wurde dort jedoch zugunsten eines Flachbettanhängers verworfen. Begründet wird dies allein mit der Transportierbarkeit. Im vorliegenden Konzept wird der Container nicht allein wegen der Transportfähigkeit gewählt, sondern wegen der durch ihn erst möglichen Zonentrennung und wegen der HTP-Handhabung, die eine Umhausung verlangt. Die Ausführung dazu erfolgt in Abschnitt 5.2.

Als viertes wurde das Projekt MoHyPer des DLR herangezogen [1]. Hierbei handelt es sich nicht um einen Prüfstand, sondern um einen mobilen Versorgungscontainer, der Raketenstufen und Nutzlasten mit HTP versorgt und den Stoff für Transport, Lagerung und Betankung bereithält. Ausgeführt ist er als 20-ft-High-Cube-Container nach ISO 668, zertifiziert für den Straßen-, Schienen- und Seetransport. Transportiert werden können bis zu 1.100 Liter HTP, verteilt auf fünf Tanks zu je 220 Liter. Eine Reinstwasserbereitstellung, eine Inertgasversorgung sowie eine Notdusche und eine Notfallflutung sind ebenfalls Bestandteil der Einrichtung. Über die Dreiteilung in Lager-, Druckversorgungs- und Betankungseinheit lassen sich strukturelle Parallelen zu dem in dieser Arbeit gewählten Zonenkonzept erkennen. Für TERRA ist das MoHyPer damit der Beleg, dass die Handhabung von HTP in einem 20-ft-Container beherrschbar ist, und zugleich die Auslegungsreferenz für die Notdusche in Abschnitt 11.3. Anzumerken ist jedoch, dass das MoHyPer eine Versorgung bereitstellt, während TERRA den Test selbst durchführt. Ein mögliches Risiko durch Triebwerksversagen existiert dort somit nicht.

Tabelle 2.1: Vergleich der betrachteten Referenzprüfstände. Zusammenstellung nach den in Abschnitt 2.1 genannten Veröffentlichungen

Prüfstand	Träger	Schubklasse	Medien	Abschirmung	Umhausung
Project Atlas [4]	offener Anhänger	bis 22,2 kN	Hybrid, Mono und Bipropellant, kryogen und nicht kryogen, kein HTP	19,05 mm Edelstahl, Schattenwurfprinzip, ohne Auslegungsrechnung	keine
MRETS [5]	offener Anhänger	bis 22,2 kN	LOX und flüssiges Methan, kryogen, kein HTP	Panzerblech und Kevlar nach NIJ IIIA, ohne Fragmentlastfall	keine
UCT-Prüfstand [6]	offener Flachbettanhänger, Container verworfen	bis 1 kN	LOX und Ethanol, druckgefördert mit Stickstoff, kein HTP	keine feste Schale, behelfsmäßig vor Ort aus Sandsäcken oder Wasserbehältern	keine
MoHyPer [1]	20-ft-High-Cube-Container	entfällt, kein Triebwerksbetrieb	HTP, bis 1.100 l in fünf Tanks zu je 220 l	entfällt, kein Lastfall Triebwerksversagen	geschlossener Container

Tabelle 2.1 schlüsselt die genannten Projekte auf und stellt sie nebeneinander. Die mobilen Teststände sind durchgehend offene Anhängerlösungen und arbeiten sämtlich ohne den Oxidator HTP. Die einzige containerbasierte HTP-Anlage ist eine Versorgungseinheit, in der keine Triebwerkstests stattfinden. TERRA besetzt damit die Kombination aus beidem. Daraus folgen drei Anforderungen, die kein einzelner Referenzstand vorwegnimmt: die Zonentrennung innerhalb eines geschlossenen Raums, die Aufstellung der Schutzschale im Innenraum und die Handhabung von HTP unter der Gewichtsbeschränkung der Fahrerlaubnisklasse BE. Sie sind zugleich der technische Grund für die in Abschnitt 1.2 gesetzte Abgrenzung der Arbeit.

2.2 HTP als Oxidator — Eigenschaften und Handhabung

Der bei diesem Projekt für die Triebwerkstests verwendete Oxidator ist HTP. In diesem Abschnitt werden die Stoffeigenschaften dieses Mediums beschrieben, aus denen im weiteren Verlauf die Werkstoff- und Reinheitsentscheidungen, mehrere Anforderungen sowie die Gefährdungen nach Abschnitt 11.1 folgen. Nicht behandelt werden die Herstellung, die Stabilisatorchemie und die Auslegung des Katalysators. Das Triebwerk bleibt

eine Black Box. Für den Betriebspunkt wird eine Konzentration von 90 % angesetzt, während für Werkstoff, Reinigung und Sicherheit eine Konzentration von 100 % als einhüllender Wert gilt (F-200).

HTP macht den mobilen Betrieb eines Prüfstands erst möglich, da es bei Umgebungstemperatur lagerfähig ist. Im Gegensatz etwa zu flüssigem Sauerstoff ist es nicht kryogen, es entfallen damit sowohl die Abdampfverluste als auch das Isolationsregime. Hinzu kommt, dass HTP weder giftig noch karzinogen ist und bei seiner Zersetzung ausschließlich Wasser und Sauerstoff entstehen. Daraus folgt die Handhabbarkeit außerhalb stationärer Infrastruktur, und damit ist die Stoffwahl die stoffliche Voraussetzung des gesamten Konzepts. Mit einem kryogenen Oxidator wäre es in dieser Form nicht darstellbar.

Das größte Risiko, das von HTP ausgeht, ist die exotherme Zersetzung zu Wasser und Sauerstoff. Sie ist zu beherrschen, und aus ihr folgen die maßgeblichen Entscheidungen, die das Konzept tragen. Von der Zersetzung gehen zwei Wirkungen aus: ein Druckaufbau in geschlossenen Räumen und eine Anreicherung der Atmosphäre mit Sauerstoff. Ausgelöst wird sie durch Verunreinigungen, die als Katalysator wirken, namentlich Partikel, Metalle, Chloride, Öl und Feuchtigkeit. Für Wasser, das mit HTP in Kontakt kommt, ist der Chloridgehalt zu begrenzen. Die Leitlinie der Hersteller nennt für das Spülwasser nach dem Beizen höchstens 25 mg/l [7], während die Trinkwasserverordnung bis zu 250 mg/l zulässt. Der für den Betrieb maßgebliche Wert ist beim HTP-Lieferanten zu erfragen und in Abschnitt 12.2 als offener Punkt geführt. Am HTP-Tank wird die Temperatur deshalb überwacht und auf 30 °C begrenzt. Diese Grenze ist eine Festlegung des Projekts. Belegt ist der Mechanismus: Die Zersetzungsrate steigt mit der Temperatur exponentiell [8], und die Leitlinie der Hersteller setzt die Alarmschwellen relativ zur normalen Betriebstemperatur sowie zusätzlich auf die Temperaturänderungsrate [7]. Hieraus folgen die Auswahl der Filter in Abschnitt 6.1, die Anforderung an die Wasserqualität in Abschnitt 6.4, die Temperaturüberwachung in Abschnitt 7.1 sowie der Ausschluss von Druckluft als Druckgas in Abschnitt 6.3.

Austenitische Edelstähle sind im passivierten Zustand mit HTP verträglich. Belegt ist dies für 90 Prozent im HTP-Handbuch und bis 70 Prozent in der Leitlinie der Hersteller [7, 9]. Daraus folgt die Werkstoffwahl des Edelstahls 1.4404 in Abschnitt 6.1. Reinigung und Passivierung sind dabei keine Fertigungsnebensache, sondern Betriebsvoraussetzung (F-206). Unverträglich sind demgegenüber organische und zellulosehaltige Materialien,

Öle und Schmierstoffe sowie ein Teil der Kunststoffe und der Buntmetalle. Ihr Kontakt mit HTP ist zu vermeiden. Stickstoff verhält sich gegenüber HTP wie gegenüber allen vorgesehenen Treibstoffen inert und trägt damit die Entscheidung in Abschnitt 6.3.

HTP ist nicht brennbar, sondern ein Oxidator. Damit kehrt sich die übliche Brandschutzlogik um. Der Stoff liefert nicht den Brennstoff, sondern den Sauerstoff, mit dem andere Stoffe reagieren. Die Konsequenzen daraus sind Gegenstand von Kapitel 11. Zu benennen ist an dieser Stelle die Selbstentzündung an organischem Material ohne jede weitere Zündquelle. Hinzu kommt, dass Hautkontakt zu einer sofortigen Schädigung führt und das Spülen mit Wasser die einzige wirksame Erstmaßnahme darstellt. Hierfür kommt die in Abschnitt 11.3 beschriebene Notdusche zum Einsatz. Die Sauerstoffanreicherung ist als eigenständige Gefahr zu betrachten, die vom Explosionsschutzrecht nicht abgedeckt wird (Abschnitt 11.1).

Eine tabellierte TNT-Äquivalenz für HTP existiert nicht, und der in der Literatur verfügbare Wert bezieht sich auf eine andere Konzentration [10]. Der auslegende Lastfall in Abschnitt 11.1 wird daher nicht über eine TNT-Äquivalenz geführt, sondern über die Deflagration mit Kammerbersten.

2.3 Relevante Normen und Richtlinien

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht der Regelwerke gegeben, die das Konzept binden, gegliedert nach Regelungsbereichen. Aufgenommen ist dabei, was im Konzept tatsächlich bindet, und nicht, was allgemein einschlägig wäre. Die vollständige Zuordnung zu den einzelnen Funktionen ist dem Anforderungsdokument zu entnehmen (Anhang A.15).

In der Gesamtheit sind es rund 30 Regelwerke und Normen aus voneinander unabhängigen Rechtsbereichen. Sie sind entweder für ortsfeste Anlagen oder für in Verkehr gebrachte Produkte geschrieben. Ein zusammenhängendes Regelwerk für mobile Anlagen existiert nicht. Es ist die Mobilität des Prüfstands, die diese Vielzahl erzwingt. Das Explosionsschutzdokument setzt einen Aufstellort voraus, die Betreiberpflichten setzen einen festen Betreiberkontext voraus, und das Transportrecht greift überhaupt nur, weil die Anlage bewegt wird. Es entsteht damit ein breites Feld aus Richtlinien und

Normen, weil sich das Konzept keinem einzelnen Regelungsbereich eindeutig zuordnen lässt. Ein Teil der Nachweise ist folglich nicht konzept-, sondern standortgebunden.

Tabelle 2.2 führt die herangezogenen Richtlinien und Normen gegliedert nach Regelungsbereich auf und stellt dar, wie sie konkret auf das Konzept greifen.

Tabelle 2.2: Regelungsbereiche, die zugehörigen Regelwerke und ihre Wirkung auf das Konzept. Zusammenstellung nach dem Anforderungsdokument (siehe Anhang A.15)

Regelungsbereich	Nr.	Regelwerk	Bindung
Druckgeräte und überwachungsbe- dürftige Anlagen	S-100	Druckgeräte Richtlinie 2014/68/EU	Bindet Tanks, Armaturen und Leitungen des Aufdruckpfads über die Druckstufe und bestimmt damit Wandstärken und Komponentenauswahl
	S-101	Betriebssicherheitsverordnung	Bindet den Betreiber zu Prüfung und Betrieb der Druckanlage
	S-102	TPED 2010/35/EU	Bindet die mitgeführten Druckgasflaschen als ortsbewegliche Druckgeräte
Gefahrstoffe	S-110	Gefahrstoffverordnung	Bindet Handhabung, Lagerung und Kennzeichnung von HTP und Treibstoff
	S-111	Technische Regeln für Gefahrstoffe	Konkretisiert die Schutzmaßnahmen und damit die Ausstattung der Tankzone
	S-112	HTP-Grade-Spezifikation	Bindet die Reinheit des Oxidators und damit Filter, Reinigung und Werkstoffwahl
Explosionsschutz	S-120	ATEX 1999/92/EG	Bindet den Betreiber zum Explosionsschutzdokument, das einen Aufstellort voraussetzt
	S-121	ATEX 2014/34/EU	Bindet die Geräteauswahl in der Tankzone auf zugelassene Ausführungen
	S-122	TRBS 2152 und 2153	Bindet Zoneneinteilung und Ableitung statischer Elektrizität
Elektrotechnik	S-130	DIN VDE 0100-540	Bindet Erdung und Potentialausgleich am Aufstellort

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 2.2

Regelungsbereich	Nr.	Regelwerk	Bindung
	S-131	DIN EN 60073	Bindet die Kennzeichnung von Bedien- und Anzeigeelementen
	S-132	EMV-Richtlinie 2014/30/EU	Bindet die Störfestigkeit der Messkette gegenüber dem Stromaggregat
Funktionale Sicherheit	S-140	DIN EN ISO 13849-1	Bindet die Sicherheitskette und begründet das Ruhestromprinzip
	S-141	IEC 61511	Informativ herangezogen als Leitfaden für sicherheitsgerichtete Systeme
Brandschutz und Erste Hilfe	S-150	Anerkannte Regeln der Technik	Bindet Löschmittel, Brandabschnitte und die Zonentrennung
	S-151	DIN EN 15154	Bindet die Auslegung der Notdusche einschließlich Wassermenge
Umweltschutz	S-160	WHG und AwSV	Bindet Auffangwannen und Rückhaltung wassergefährdender Stoffe
	S-161	Abwasserverordnung	Bindet den Umgang mit Spülwasser und Spülgemischen
	S-162	AVV und KrWG	Bindet den Entsorgungsweg der Sammelbehälter
	S-163	BImSchG und TA Lärm	Bindet die Schallemission am Aufstellort
Transport	S-170	ADR	Bindet Verpackung, Kennzeichnung, Ausrüstung und Fahrerqualifikation beim Transport der Betriebsmedien
	S-171	ISO 668 und ISO 1496	Bindet die Containermaße und die Eckbeschläge als Lastpfad
	S-172	StVZO	Bindet Außenmaße, zulässige Gesamtmasse und Stützlast des Gespanns
	S-173	EN 12195	Bindet die Ladungssicherung und liefert die Beschleunigungsbeiwerte für die Befestigung der Einbauten
Arbeitsschutz	S-180	Arbeitsstättenverordnung	Bindet Verkehrswege, Fluchtwege und Beleuchtung im Container

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 2.2

Regelungsbereich	Nr.	Regelwerk	Bindung
	S-181	PSA-Verordnung (EU) 2016/425	Bindet die persönliche Schutzausrüstung beim Umgang mit HTP
	S-182	DGUV-Regeln und -Informationen	Bindet Unterweisung und Betriebsanweisungen als Betreiberpflicht

Gesondert zu nennen ist die Maschinenverordnung, da sie sich keinem einzelnen Regelungsbereich zuordnen lässt. Griffe sie, so würde sie nicht ein Teilsystem, sondern das Gesamtsystem binden und damit den Nachweisaufwand insgesamt bestimmen. Die Einordnung ist offen. Sie wird gemeinsam mit der Bewertung des Nachweisstands in Abschnitt 11.4 geführt. Unabhängig von ihrem Ausgang ist die Risikobeurteilung in Kapitel 11 nach EN ISO 12100 aufgebaut.

3 Methodik

In diesem Kapitel werden die Methoden und Arbeitsweisen erläutert, nach denen das Prüfstandskonzept TERRA Concept erarbeitet wurde. Beschrieben werden das grundsätzliche Vorgehen, die verwendete Informationsbasis, der Umgang mit Anforderungen sowie die Regeln, nach denen Entscheidungen getroffen, Bearbeitungstiefen festgelegt und Unsicherheiten abgebildet wurden.

Die hier festgelegten Regeln gelten für alle folgenden Kapitel. Sie werden dort angewendet und nicht erneut begründet. Das betrifft insbesondere den Detaillierungsgrundsatz nach Abschnitt 3.5, der die unterschiedlichen Bearbeitungstiefen der einzelnen Kapitel erklärt.

3.1 Vorgehensmodell

Bei dieser Arbeit handelt es sich um einen Konzeptentwurf. Die Detaillierungstiefe der einzelnen Betrachtungen ist dabei nicht einheitlich, sondern folgt dem in Abschnitt 3.5 dargelegten Grundsatz. Ausgangspunkt sind die Triebwerks-Rahmenparameter und die harten Randbedingungen der Aufgabenstellung. Daraus ergibt sich die Ableitungskette der Arbeit: Aus den Rahmenparametern folgen die Anforderungen, aus den Anforderungen die Systemarchitektur und das Zonenkonzept, daraus wiederum die Subsysteme und die Komponentenauswahl. Die Komponentenauswahl erfolgt überschlägig und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Verfolgt wird ein Ansatz vom Ganzen zum Einzelnen. Aus den bindenden Randbedingungen wird das System zunächst global ausgelegt, anschließend wird diese globale Auslegung schrittweise bis auf die Ebene der Komponenten verfeinert. Dieses Vorgehen folgt aus der Natur der bindenden Randbedingungen: Bauraum, Gesamtmasse und Zonentrennung wirken global. Die Architektur entscheidet damit über die Zulässigkeit einer Komponente, nicht umgekehrt. Eine zuerst ausgelegte Komponente müsste verworfen werden, sobald die globale Bilanz nicht aufgeht.

Ergänzend kommen Iterationsschleifen zum Einsatz. Ansätze werden mehrfach aufgenommen und, wo erforderlich, wieder verworfen, bis ein schlüssiges Gesamtkonzept vorliegt. Ein Beispiel ist der HTP-Tank, der zunächst doppelwandig vorgesehen war und nach Auswertung der Gewichtsbalanz durch einen einwandigen Tank mit Auffangwanne ersetzt wurde.

Die Arbeitspakete überlappen sich bewusst. Sie werden nicht sequenziell, sondern teilweise parallel bearbeitet, um Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen abzubilden. Der Zeitplan bildet dies ab. Die Arbeit durchläuft ausschließlich den absteigenden Ast von den Anforderungen bis zur Auslegung. Realisierung und Verifikation am realen Objekt entfallen. Die Verifikationsarten der Anforderungen beschränken sich daher auf Analyse und Inspektion, nicht auf Test oder Demonstration.

3.2 Informationsbasis und Werkzeuge

Die Informationsbasis der Arbeit setzt sich aus vier Quellenarten zusammen, die unterschiedlich gewichtet werden.

Normen und Regelwerke werden als verbindlich und nicht verhandelbar betrachtet. Sie bilden die Nachweisgrundlage des Konzepts und sind im Anforderungsdokument als eigene Anforderungsklasse (S-xxx) geführt. Einschlägig sind unter anderem die Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU, die ATEX-Richtlinien 1999/92/EG und 2014/34/EU einschließlich der zugehörigen TRBS, die Betriebssicherheits- und die Gefahrstoffverordnung, DIN EN ISO 13849-1 für die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung sowie ADR und StVZO für Transport und Zulassung. Eine geordnete Übersicht gibt Abschnitt 2.3, die vollständige Zuordnung zu den einzelnen Funktionen das Anforderungsdokument im Anhang A.15.

Herstellerdatenblätter sind für die jeweilige Komponente verbindlich, werden jedoch nicht ungeprüft übernommen. Geprüft wird insbesondere, ob die angegebenen Kenngrößen zwischen Herstellern überhaupt vergleichbar sind, da Bezugsbedingungen häufig unterschiedlich gewählt und nicht immer vollständig angegeben werden. So beziehen sich Durchflussangaben zu Druckminderern in Nm^3/h auf den jeweiligen Hinterdruck. Ein Wert bei 10 bar ist mit einem Wert bei 60 bar nicht unmittelbar

vergleichbar, eine belastbare Gegenüberstellung ist erst über den Kv-Wert möglich (siehe Abschnitt 6.3.5).

Referenzprojekte und wissenschaftliche Literatur dienen als Vergleichsmaßstab und Plausibilitätscheck, nicht als Nachweis. Sie zeigen, in welchem Bereich sich vergleichbare Systeme bewegen, ersetzen aber keine eigene Auslegung.

Ergänzend wurden Auskünfte und Erfahrungsberichte von Fachpersonen eingeholt. Für die Infrastruktur des vorgesehenen Einsatzortes sind diese die einzige belastbare Quelle, da entsprechende Angaben nicht öffentlich dokumentiert sind. Die Korrespondenz wurde schriftlich geführt und ist im Anhang A.20 beigelegt.

Nicht in allen Fällen ließen sich belastbare Daten finden. Wo das der Fall ist, wird die Lücke benannt und der gewählte Ersatzweg dokumentiert. Ein Beispiel ist die TNT-Äquivalenz für HTP: Ein tabellierter Wert existiert nicht. Der in der Literatur verfügbare Wert bezieht sich auf eine Konzentration von 98 % [10]. Er liegt damit nahe an der für Sicherheitsbetrachtungen angesetzten Konzentration von 100 % und wirkt für die Gefährdungsbetrachtung konservativ, ist aber nicht unmittelbar auf den Betriebspunkt von 90

Widersprüche in Quellen wurden geprüft und werden offengelegt, statt sie zu übernehmen. So nennt die Veröffentlichung zu Project Atlas die Blechstärke der dortigen Schutzschale als Konstruktionsmerkmal, ohne eine zugehörige Auslegung anzugeben [4]. Eine einzelne externe Zahl wird daher nicht als Nachweis verwendet. Wo möglich, wird ein Ergebnis über zwei voneinander unabhängige Wege geprüft. Bei der Wandstärke der Schutzschale führten die reine Skalierung über den Schub und die Kalibrierung des Rechenmodells an Project Atlas unabhängig voneinander auf denselben Bereich von rund 9 mm (siehe Abschnitt 11.2).

Als Werkzeuge kamen zum Einsatz: Excel für die parametrischen Auslegungsrechnungen, insbesondere Triebwerksparameter, Druckverlust und Gewichtsbudget, Python für die thermodynamischen Rechnungen, Autodesk Fusion 360 für die räumliche Integration und die Ableitung des Maßstabsmodells, draw.io für das R&I-Fließbild (P&ID, Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild) und die Zustandsdiagramme. Das physische Maßstabsmodell entsteht im FFF-Druckverfahren, ergänzt um lasergeschnittene Bauteile. Für die Strukturierung, die Konsistenzprüfung, die Rechendateien, die Grammatikkorrektur und die Projektplanung kamen KI-Werkzeuge zum Einsatz. Für das Verfassen

von Fließtext, für technische Entscheidungen sowie für die Erzeugung von Zahlen und Quellen wurden sie nicht verwendet. Genauer ist dies in der Eigenständigkeitserklärung zu Beginn des Berichts dargelegt (siehe Seite 2).

3.3 Anforderungsmanagement

Um die Aufgabenstellung und die weiteren Vorgaben an das Konzept zu binden, wurden Anforderungen formuliert. Sie stammen aus der Aufgabenstellung, den Triebwerks-Rahmenparametern, Normen und Regelwerken, Referenzprojekten, der Betriebspraxis am vorgesehenen Standort sowie aus Abstimmungen mit der Betreuung.

Jede Anforderung trägt eine eindeutige ID, gegliedert nach F für funktional, S für sicherheitstechnisch und normativ sowie B für betrieblich. Die Nummernkreise sind thematisch geordnet. Jede Anforderung ist nach MUSS, SOLL und KANN klassifiziert und um eine Herkunftsangabe sowie eine Verifikationsart ergänzt. Als Verifikationsarten sind Analyse, Inspektion, Demonstration und Test vorgesehen. In dieser Arbeit überwiegen Analyse und Inspektion, die Begründung dafür ist in Abschnitt 3.1 dargelegt.

Das Anforderungsdokument ist ein lebendes Dokument. Es wurde im Verlauf der Bearbeitung mehrfach fortgeschrieben, weil Erkenntnisse aus der Subsystemauslegung auf die Anforderungsebene zurückwirkten. Die Fortschreibung ist über Versionsstände dokumentiert. Das vollständige Anforderungsdokument liegt im Anhang A.15, Kapitel 4 gibt die Struktur und die auslegungsbestimmenden Anforderungen wieder.

Im Fließtext dieser Arbeit steht die technische Begründung jeweils voran, die Anforderungsnummer folgt als Referenz. Eine Anforderungsnummer ist ein Verweis, kein Argument.

3.4 Entscheidungs- und Bewertungsmethodik

Wann immer eine Lösung aus mehreren Alternativen gewählt werden musste, wurde ein Alternativenfeld aufgespannt und verglichen. Die Bewertungskriterien wurden dabei

aus den Anforderungen abgeleitet, die Alternativen gegeneinander abgewogen und die Entscheidung mit Begründung dokumentiert.

In vielen Fällen ging der Bewertung eine K.-o.-Prüfung voraus. Verletzt eine Alternative eine MUSS-Anforderung, scheidet sie aus, unabhängig von ihren sonstigen Vorzügen.

Die Bewertung erfolgte überwiegend kriterienbasiert und argumentativ, nicht durchgängig als gewichtete Nutzwertanalyse. Bei den meisten Entscheidungen war ein einzelnes Kriterium klar ausschlaggebend. Eine Nutzwertanalyse lässt jedoch Kompensation zwischen den Kriterien zu, ein schlechter Wert in einer Kategorie kann durch gute Werte in anderen ausgeglichen werden. Wo ein Kriterium eine harte Grenze darstellt, ist diese Kompensation nicht zulässig. Ein Beispiel ist die Gesamtmasse gegenüber der BE-Grenze von 3.500 kg. Eine Überschreitung ist nicht durch Vorteile an anderer Stelle aufzuwiegen, da sie die Fahrerlaubnisklasse und damit eine Grundvoraussetzung des Konzepts berührt. Eine Nutzwertanalyse hätte hier ein formal bestbewertetes, aber unzulässiges Ergebnis liefern können.

Verworfen Alternativen werden ebenfalls dokumentiert. Nachvollziehbar wird eine Entscheidung erst dadurch, dass erkennbar ist, was nicht gewählt wurde und aus welchem Grund.

3.5 Detaillierungsgrundsatz

Der Detaillierungsgrad richtet sich danach, ob ein genaueres Ergebnis eine Aussage auf Ebene des Gesamtkonzepts verändern kann. Detaillierte Auslegungen wurden nur dort vorgenommen, wo dies der Fall ist. So wurden im Gewichtsbudget gezielt jene Positionen gerechnet und mit konkreten Komponenten hinterlegt, die einen wesentlichen Anteil an der Gesamtmasse ausmachen, während untergeordnete Positionen abgeschätzt und als Abschätzung gekennzeichnet wurden.

Eine detailliertere Auslegung wurde vorgenommen, wenn mindestens eines der folgenden vier Kriterien zutrifft: Erstens, das Ergebnis wirkt auf eine global bindende Grenze wie Gesamtmasse oder Bauraum. Zweitens, es bestimmt die Zulässigkeit einer Sicherheitsfunktion. Drittens, es entscheidet zwischen Architekturalternativen. Viertens, es definiert eine Schnittstelle nach außen zu Triebwerk, Standort oder Kontrollstand.

Bewusst flach gehalten wurden Auslegungen, die das Gesamtkonzept nicht verändern, etwa Ground Frame und Floating Frame. Ebenso standortabhängige Größen, die ohne verbindliche Zusage des Betreibers nicht festlegbar sind und daher als Platzhalter mit dokumentierter Randbedingung geführt werden. Ihre Festlegung setzt eine konkrete Abstimmung mit dem jeweiligen Standort voraus.

Bei Zukaufteilen wurde zwischen zwei Fällen unterschieden. Komponenten, deren Auswahl das Gesamtkonzept bestimmt, wurden anhand von Kriterien und Alternativen ausgewählt und mit Datenblatt belegt. Komponenten ohne Rückwirkung auf das Konzept wurden dagegen exemplarisch mit einem marktüblichen Vertreter belegt, um eine belastbare Masse- und Bauraumangabe zu erhalten. Eine abschließende Beschaffungsempfehlung ist damit in beiden Fällen nicht verbunden.

Zeigte sich im Verlauf, dass eine zunächst grob abgeschätzte Größe doch systemrelevant ist, wurde nachträglich vertieft. Ein Beispiel ist die Klimatisierung, deren Auswirkung auf das Gewichtsbudget erst im weiteren Verlauf in vollem Umfang erkennbar wurde und die daraufhin detaillierter ausgearbeitet werden musste.

Aus diesem Grundsatz ergeben sich unterschiedliche Bearbeitungstiefen zwischen den Kapiteln dieser Arbeit. Diese Unterschiede sind Ergebnis des beschriebenen Vorgehens und nicht Ausdruck unterschiedlicher Sorgfalt. Wo eine Vertiefung nach diesem Grundsatz erforderlich gewesen wäre, aufgrund fehlender Daten aber nicht möglich war, wird dies als offener Punkt geführt und in Abschnitt 12.2 zusammengefasst, statt die Lücke unbenannt zu lassen.

3.6 Umgang mit Annahmen und Margen

Jede Annahme ist als solche gekennzeichnet und mit einer Herkunftsangabe versehen. Kenntlich gemacht wird dabei, ob ein Wert gerechnet, einem Datenblatt entnommen oder nach fachlicher Einschätzung geschätzt wurde.

Im Gewichtsbudget wird diese Herkunftsklassifikation in Margen überführt (siehe Tabelle A.7 im Anhang), die die jeweilige Unsicherheit abbilden. Die Margensätze sind abgestuft: 5 % auf Datenblattwerte, 10 % auf gerechnete Werte und 20 % auf Annahmen. Die Abstufung folgt dem Grad der Belegbarkeit: Ein Datenblattwert ist herstellerseitig

zugesichert, ein gerechneter Wert hängt von Geometrie- und Werkstoffannahmen ab, ein angenommener Wert ist ein Klassenwert ohne Produktauswahl.

Die Marge wird je Position genau einmal angesetzt. Eine Stapelung von Sicherheiten findet nicht statt. Andernfalls ergäbe eine bereits konservativ geschätzte Einzelposition zusammen mit einer globalen Zuschlagsmarge eine effektive Reserve, deren Höhe sich nicht mehr beziffern ließe. Wo bewusst konservativ angesetzt wurde, wird dies an der betreffenden Stelle offengelegt und nicht in einer Marge verborgen.

Ergänzend wird zu jeder Rechnung ihr Zweck und damit ihre Aussagegrenze angegeben. Die Wandstärkenrechnung der Schutzschale etwa liefert eine Massenabschätzung für das Gewichtsbudget. Sie ist ausdrücklich keine Schutzauslegung und begründet keine Fertigungsfreigabe.

4 Anforderungsanalyse

Die formulierten Anforderungen sind der Übergang von der Aufgabenstellung zum Konzept. Hierbei werden die Vorgaben und Eingaben an prüfbare Sätze gebunden. Dadurch entsteht die Ableitungskette, die bereits in Abschnitt 3.1 dargelegt wurde. Die Rahmenparameter führen zu den Anforderungen und die Anforderungen zur Systemarchitektur und zu den Entwurfsentscheidungen des Konzepts. Die Anforderungen aus diesem Kapitel bilden die Eingangsseite dieser Kette.

Der vollständige Katalog der Anforderungen ist im Anhang A.15 zu finden. Dieses Kapitel führt den Katalog nicht vollständig auf. Systematik, Klassifizierung und Verifikationsarten sind in Abschnitt 3.3 beschrieben und werden hier vorausgesetzt. In diesem Kapitel folgen die quantitative Basis, der Zuschnitt des Katalogs und eine Auswahl der Anforderungen, die das Konzept tatsächlich bestimmen.

Zuerst werden die Triebwerks-Rahmenparameter dargelegt, da sie der einzige nicht verhandelbare Input sind. Anschließend werden Aufbau und Umfang des Anforderungskatalogs beschrieben. Abschließend werden die auslegungsbestimmenden Anforderungen erläutert und nach ihrer Wirkung gebündelt.

4.1 Triebwerks-Rahmenparameter

Die im Folgenden dargelegten Parameter der möglichen zum Einsatz kommenden Triebwerke bestimmen maßgeblich die Kennzahlen und die Dimensionierung des Prüfstands. Tankgrößen, Leitungsquerschnitte, Druckgasbedarf und Bauraum werden aus diesen Parametern abgeleitet. Teilweise sind die Parameter gesetzt, teilweise wurden sie gewählt.

Zu den gesetzten Parametern gehören die der Aufgabenstellung. Diese belaufen sich auf einen Nennpunkt von 1 kN, einen Envelope (maximaler Auslegungspunkt) von 5 kN und eine Brenndauer von 60 s (F-100). Aus der Abgrenzung ergeben sich 30 bar als

Obergrenze für den druckgeförderten Betrieb (siehe Abschnitt 1.2), HTP als Oxidator und die drei betrachteten Treibstoffe.

Dabei ist zu erwähnen, dass Fluidsystem, Struktur und Sicherheit nach dem Envelope-Wert von 5 kN ausgelegt wurden. Die Messkette wurde dagegen nach dem Nennpunkt von 1 kN ausgelegt. Die zum Einsatz kommende Hardware ist schwer nachrüstbar. Deswegen wurde hier der Envelope-Wert für die Auslegung gewählt. Messbereiche lassen sich dagegen durch den Tausch der Kraftmessdose anpassen.

Zu den gewählten Parametern gehört eine HTP-Konzentration von 90 % als Rechenpunkt. Dies ist der einhüllende Fall für Volumen und Massenstrom, da eine höhere Konzentration den spezifischen Impuls und die Dichte anhebt und damit beide Größen senkt (F-200). Außerdem wurde ein seehöhenoptimiertes Expansionsverhältnis von 3,5 für bodengebundene Tests angenommen. Hinzu kommt eine angenommene Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s in den Leitungen, wobei diese typischerweise in einem Bereich von 3 bis 10 m/s liegt [11]. Diese drei Werte sind Annahmen und keine Vorgaben. Deswegen sind sie als solche gekennzeichnet (Abschnitt 3.6).

Eine Gleichgewichtsrechnung mit RocketCEA beim Brennkammerdruck und dem Expansionsverhältnis ist erfolgt, um daraus das Mischungsverhältnis, den spezifischen Impuls, die charakteristische Geschwindigkeit und die Brennkammertemperatur zu erhalten. Daraus wurden die Massenströme über den spezifischen Impuls, die Volumina über Dichte und Brenndauer und die Geometrie über den Schubkoeffizienten ermittelt [12]. Angesetzt wurden außerdem Margen von 10 % für das Ullage-Volumen und 20 % Reserve. Der vollständige Rechenweg ist Tabelle A.1 im Anhang zu entnehmen, eine Auswahl der Ergebnisse zeigt Tabelle 4.1.

In den Spalten sind die verschiedenen Treibstoffe zu erkennen. Dazu zählen Kerosin, Ethanol, Propan und Nitromethan. In den Zeilen stehen die dazu berechneten Parameter und Kennzahlen. Alle Werte sind am Envelope-Wert von 5 kN orientiert, der dimensionierend ist.

Auffallend ist dabei, dass die Düsengeometrie bei allen vier Treibstoffen sehr nah beieinanderliegt. Der Bauraum für das Triebwerk ist damit treibstoffunabhängig. Daraus folgt, dass sich die Modularität gegenüber verschiedenen Triebwerken lediglich auf die Schnittstelle auswirkt und nicht auf die Geometrie oder den Bauraum, der zur Verfügung stehen muss.

Tabelle 4.1: Triebwerks-Rahmenparameter im 5-kN-Envelope. Quelle: Berechnung mit RocketCEA, TERRA_Parameters_V2.xlsx

Parameter	Einheit	Kerosin	Ethanol	Propan	Nitromethan ^a
Mischungsverhältnis O/F	–	7,11	4,50	7,61	0,67
Spezifischer Impuls, Meereshöhe	s	241,9	237,4	243,5	243,1
Spezifischer Impuls, Vakuum	s	261,3	256,5	263,0	262,5
Charakteristische Geschwindigkeit c^*	m/s	1612	1584	1624	1617
Brennkammertemperatur T_c	K	2748	2644	2723	2932
Massenstrom gesamt	g/s	2108,1	2147,7	2094,1	2097,7
Massenstrom HTP	g/s	1848,1	1757,0	1851,0	841,4
Massenstrom Treibstoff	g/s	260,0	390,7	243,2	1256,2
Erforderliches HTP-Volumen ^b	L	103,3	98,2	103,5	47,0
Erforderliches Treibstoffvolumen ^b	L	25,0	38,6	38,3	86,2
Düsenhalsdurchmesser	mm	38,0	38,0	38,0	37,9
Düsenaustrittsdurchmesser	mm	71,1	71,1	71,1	71,0
Leitungsdurchmesser HTP ^c	mm	18,4	17,9	18,4	12,4
Leitungsdurchmesser Treibstoff ^c	mm	9,0	11,2	11,2	16,8

Auslegungspunkt: $F_{\text{env}} = 5 \text{ kN}$, $t_b = 60 \text{ s}$, $p_c = 30 \text{ bar}$, $\varepsilon = 3,5$, HTP 90 %.

^a Nitromethan liegt außerhalb des Untersuchungsumfangs (siehe Abschnitt 4.1) und wird nur zum Vergleich mitgeführt. Bei der Bildung des maßgeblichen Falls bleibt die Spalte außer Betracht.

^b Einschließlich 10 % Ullage und 20 % Reserve.

^c Rechnerisch ideale Durchmesser bei 5 m/s Strömungsgeschwindigkeit, keine Normnennweiten.

Bei allen drei betrachteten Treibstoffen ist HTP der begrenzende Faktor. Das Volumen des Treibstofftanks hat dagegen einen Puffer. Für die Auslegung des HTP-Tankvolumens wurde Propan mit 103,5 L als maßgeblicher Fall herangezogen. Gewählt wurde eine Tankgröße von 110 L. Auf der Treibstoffseite wurde Ethanol mit 38,6 L als treibender Fall herangezogen und ein Tank von 50 L für das Konzept übernommen. Aus dieser Tankkonfiguration ergibt sich eine Brenndauer von 63,8 s, die über den geforderten 60 s liegt. Die Bedingung ist somit eingehalten (F-203, F-222). Dabei ist zu sagen, dass im Nominalfall wesentlich höhere Brenndauern zu erwarten sind, da hier ein geringerer Schub und dadurch ein geringerer Verbrauch von Oxidator und Treibstoff pro Sekunde vorliegt.

Nitromethan wurde nach Abschnitt 1.2 außerhalb des Betrachtungsumfangs gezogen, aber trotzdem mitgerechnet. Der Grund dafür ist, dass die Werte sehr weit von denen der drei übrigen Treibstoffe abweichen. Das Mischungsverhältnis von 0,67 kehrt das Verhältnis von Oxidator und Treibstoff um. Der Bedarf auf der Treibstoffseite steigt dadurch auf 86,2 L und der Treibstofftank wird zum begrenzenden Faktor. Im 5-kN-Envelope ist damit nur noch eine Brenndauer von 34,8 s zu erwarten. Die gewählte Tankkonfiguration deckt Nitromethan also nicht über die geforderte Brenndauer ab. Eine spätere Aufnahme würde damit nicht nur eine Werkstoffprüfung erfordern, sondern eine andere Tankkonfiguration.

Es folgen Leitungsquerschnitte für HTP von 18,4 mm und für Treibstoff von 11,2 mm. Diese dienen als Startwert für die Auslegung in den Abschnitten 6.1 und 6.1. Der Tankdruck von 39 bar folgt aus dem Auslegungsfenster in Abschnitt 6.3.

4.2 Aufbau und Umfang des Anforderungskatalogs

Die Anforderungen stammen aus der Aufgabenstellung, den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Rahmenparametern, Normen, Referenzprojekten, der Betriebspraxis am vorgesehenen Standort und der Abstimmung mit den Betreuern. Dies ist an der jeweiligen Anforderung vermerkt.

Die Anforderungen sind in drei Klassen unterteilt. F steht für funktionale Anforderungen und beschreibt, was der Prüfstand leisten muss. S benennt eine sicherheitstechnische

Anforderung, die eine Norm als Nachweisgrundlage hat. B beschreibt betriebliche Anforderungen. Diese sind Bedingungen für Transport, Aufbau und Betrieb des Prüfstands.

Der Katalog umfasst 182 gültige Anforderungen mit 125 funktionalen Anforderungen, 27 Sicherheitsanforderungen und 30 betrieblichen Anforderungen. Die funktionalen Anforderungen sind zusätzlich in sechs Cluster gegliedert. Diese sind Testdurchführung mit 7, Fluidhandhabung mit 36, Messen und Erfassen mit 18, Steuern und Überwachen mit 18, Sicherheit und Umweltschutz mit 32 und Schnittstellen mit 14 Anforderungen.

Die Verteilung der funktionalen Anforderungen auf die Cluster gibt ein klares Bild über die Schwerpunkte des Katalogs. Fluidhandhabung und Sicherheit stellen zusammen mehr als die Hälfte der funktionalen Anforderungen. Darin bilden sich die kritischen Eigenschaften der Medien ab. Ein Rückschluss auf die Bearbeitungstiefe der einzelnen Anforderungen ist daraus nicht zu ziehen.

Mit 166 von 182 Anforderungen als MUSS weist auch die Priorisierung auf die Herkunft hin, da viele Anforderungen aus Normen und aus Sicherheitsfunktionen stammen, die keine Abwägung zulassen.

Das Anforderungsdokument hat über die Bearbeitung des Konzepts fünf Versionsstände durchlaufen, wobei Version 5 der Abgabestand ist. Die jeweiligen Änderungen sind zu Beginn des Dokuments gekennzeichnet und dort begründet. Die Anforderungen sind im Anforderungsdokument in Anhang A.15 vollständig geführt. Im Folgenden werden sie allein mit ihrer Kennung zitiert, etwa F-206 für eine funktionale, S-173 für eine sicherheitsbezogene und B-125 für eine betriebliche Anforderung. Außerdem ist zu vermerken, dass es zu Lücken in der ID-Vergabe kommt. Dies ist kein Hinweis auf fehlende Inhalte.

4.3 Auslegungsbestimmende Anforderungen

Der Anforderungskatalog umfasst 182 Anforderungen, von denen nicht jede das Konzept maßgeblich beeinflusst hat. In diesem Abschnitt folgt eine Auswahl der Anforderungen, die das Konzept bestimmt haben. Auswahlkriterium ist der in Abschnitt 3.5 beschriebene Detaillierungsgrundsatz. Auslegungsbestimmend ist eine Anforderung dann, wenn sie eine global bindende Grenze vorschreibt, die Zulässigkeit einer Sicherheitsfunktion

bestimmt, zwischen Architekturalternativen entscheidet oder eine Schnittstelle nach außen definiert. Nach diesen vier Wirkungen ist der folgende Abschnitt gegliedert. Wie konkret eine Anforderung das Konzept beeinflusst hat, steht bei der Beschreibung des Konzepts im jeweiligen Kapitel und nicht hier.

Eine global bindende Grenze rufen beispielhaft die folgenden Anforderungen hervor. Die Anforderung B-102 beschreibt die zulässige Gesamtmasse von 3.500 kg für den Anhänger, der mit der Fahrerlaubnisklasse BE zu führen ist. Dabei ist anzumerken, dass B-102 als SOLL-Anforderung klassifiziert ist, im Konzept aber bindend wirkt. Der Grund dafür ist, dass zu Beginn der Konzepterstellung nicht eindeutig klar war, ob die Grenze von 3.500 kg einzuhalten ist. Mit fortschreitendem Bearbeitungsstand wurde das Konzept auf diese Grenze hin optimiert. Eine Überschreitung ist damit nicht mehr durch Vorteile an anderer Stelle aufzuwiegen. Die Klassifizierung bleibt dennoch SOLL, da die nächsthöhere Klasse C1E als dokumentierte Rückfallebene erhalten bleibt (B-104). Auch die Anforderungen B-100 und B-101 binden das globale Konzept mit der Baulänge von 20 Fuß und dem Transport auf einem Anhänger. B-113 begrenzt die Öffnungen in der Containerhülle auf das herstellerseitig zulässige Maß und bindet damit die Erschließung der Zonen. Die Grenzen der oben genannten Anforderungen entscheiden über die Zulässigkeit der Komponenten. Nachgewiesen wird dies in Abschnitt 5.5.

Außerdem bestimmen einige Anforderungen maßgeblich die Sicherheitsfunktionen des Prüfstands. Eine Auswahl dieser Anforderungen wird im Folgenden beispielhaft beschrieben. Die Anforderung F-500 verlangt die Abwesenheit von Personal im Gefahrenbereich während des Tests sowie davor und danach. Daraus folgt zwingend die Anforderung F-430 mit der vollständigen Fernbedienbarkeit. Die Anforderungen F-520 bis F-523 binden die Aktorik, da in der Tankzone keine elektrische Zündquelle zulässig ist. Die Anforderung F-403 legt fest, in welchen Zustand der Prüfstand fällt, wenn ein Ausfall oder eine Störung des Systems auftritt. Die Anforderung F-555 fordert den zweistufigen Abbruch. Trennkriterium ist dabei, ob der Prüfstand selbst noch sicher ist, und nicht die Schwere des auslösenden Ereignisses. Mit der Anforderung F-542 wird der Lastfall der Schutzschale festgelegt. Gefordert sind der Rückhalt von Fragmenten und die Abschirmung der Thermostrahlung. Ein Rückhalt der Druckwelle wird ausdrücklich nicht gefordert. Gemeinsame Eigenschaft dieser Gruppe ist, dass sie keine Abwägung zulassen und damit als K.-o.-Kriterium bei der Auswahl des Konzepts wirken.

Auch bei den Architekturentscheidungen des Konzepts spielten Anforderungen eine Rolle, die im Folgenden beispielhaft beschrieben werden. B-111 entscheidet mit der Zonenaufteilung über die räumliche Grundstruktur des Prüfstands. F-402 und F-264 machen die Pneumatik zu einem eigenen Versorgungsstrang mit eigenem Kompressor und eigenem Druckniveau. Die Anforderung F-242 entscheidet, dass kein Druckgasvorrat im Container vorhanden sein darf und die Flaschenbatterie extern als Ground Support Equipment (GSE, Bodenausrüstung) zu führen ist. Die betriebliche Anforderung B-161 gibt zwei zu prüfende Kontrollstandvarianten vor und erzwingt damit eine Variantenentscheidung. Die gemeinsame Eigenschaft dieser Anforderungen ist, dass sie keine Werte festlegen, sondern Lösungsräume ausschließen. Die Entscheidung selbst ist im zugehörigen Kapitel zu finden.

Abschließend ist zu erwähnen, dass gewisse Anforderungen über die Schnittstellen nach außen Auskunft geben. Beispielhaft werden im Folgenden diese Anforderungen genannt. Die Anforderungen F-600, F-601 und F-602 definieren die mechanische, fluidische und signalische Schnittstelle zum Triebwerk. Da das Triebwerk außerhalb des Rahmens dieses Konzepts liegt, gilt es, diese Schnittstellen sauber zu definieren. Die Anforderung F-241 ist eine konkrete Schnittstellenangabe. Mit 39 bar Tankdruck ergeben sich 35,2 bar am Injektoreingang und damit rund 17 Prozent Injektordruckabfall. Zu dokumentieren ist dies im Interface Control Document (ICD) nach F-601. In der Anforderung F-624 werden die Anschlüsse für Strom, Wasser, Daten und Druckgas definiert. Die Anforderungen F-610 bis F-613 definieren die Schnittstellen zum Kontrollstand. Diese Anforderungen geben somit Auskunft über die Schnittstellen, die das Konzept zu den umliegenden Systemen hat, und nicht über die konkrete innere Ausführung.

Die hier nicht genannten Anforderungen sind gegenüber den genannten nicht nachrangig. Sie bestimmen das Konzept jedoch nicht maßgeblich und werden dort geführt, wo sie tatsächlich wirken.

5 Gesamtkonzept des Prüfstands

In diesem Kapitel werden die gesetzten Anforderungen aus Kapitel 4 zu einem Konzept zusammengesetzt, das den Anforderungen entspricht und genügt. Zu Beginn werden die Systemgrenzen dargelegt, anschließend werden die Zonenaufteilung und das Layout beschrieben, gefolgt von einer beispielhaften mechanischen Integration sowie dem Massennachweis. Hierbei engt der folgende Abschnitt den vorherigen schrittweise thematisch ein.

Die Grenze für die maximal zulässige Gesamtmasse eines Anhängers mit der Fahrerlaubnisklasse BE zieht sich als durchgehende Randbedingung durch, auf sie hin wurden die meisten Optimierungen und Entscheidungen getroffen. Der Nachweis für die Einhaltung der Gewichtsgrenze erfolgt in Abschnitt 5.5.

Anzumerken ist, dass nach dem in Abschnitt 3.5 beschriebenen Prinzip gearbeitet wurde, das heißt die Bearbeitungstiefe wurde sinnvoll beschränkt.

5.1 Systemarchitektur und Modulstruktur

Das in diesem Abschnitt beschriebene System ist der Prüfstand, also der Container samt Inhalt, der am Ende die Infrastruktur für einen Triebwerkstest bereitstellt. Nicht beschrieben werden das Triebwerk und alle zugehörigen Komponenten sowie der Kontrollstand, das Zugfahrzeug und das GSE. Zum GSE gehören die mit Stickstoff gefüllte Druckgasflaschenbatterie einschließlich Gestell, erstem Druckminderer und Umbilical, also der Versorgungsleitung zwischen Flaschenbatterie und Container, die Stützbeine des Containers, das Stromaggregat, die Datenleitung zum Kontrollstand und die Feuerlöscher, also alles, was nicht fest in oder am Container verbaut ist und separat transportiert wird. Es zählt somit nicht zur Gesamtmasse des Anhängers und fällt damit nicht in dessen Gewichtsbudget rein.

Die im Prüfstand beschriebene Technikzone ist während des Tests nicht mit Personal besetzt. Die Technikzone des Prüfstands ist nicht zu verwechseln mit dem Kontrollstand,

der in Kapitel 10 beschrieben wird. Am Kontrollstand hält sich das Personal während des Tests auf, dort findet die Steuerung und Überwachung des Prüfstands statt.

Die Komponenten des Prüfstands sind grundsätzlich auf zwei verschiedenen Ebenen zu ordnen: der funktionalen Ebene und der räumlichen Ebene. Die funktionelle Trennung erfolgt so: Oxidator, Treibstoff, Druckgas, Spülung und Entsorgung, Messen und Steuern, Struktur und Schubpfad, Sicherheit, Energie und Klima. Auf räumlicher Ebene wird die Trennung dagegen nach den Zonen eingeleitet: Technik, Tank und Triebwerk.

Die Aufteilung der verschiedenen Ebenen ist nicht deckungsgleich, das heißt die funktionale Ebene ist nicht nur eine weiterführende Aufteilung der räumlichen Ebene. Die Subsysteme überspannen teilweise mehrere Zonen. Die Grenze zwischen den Zonen erfordert dabei besondere Maßnahmen, wie eine gasdichte Durchführung an den Trennwänden.

Ein Beispiel dafür ist das Druckluftsystem. Der Kompressor steht in der Technikzone, ebenso die Pilotventile. Durch die Trennwand zwischen Technikzone und Tankzone verläuft nur der Schlauch, mit dem die pneumatischen Ventile in der Tankzone betätigt werden. Damit steht kein elektrisches Gerät des Druckluftsystems in der Tankzone.

Das Triebwerk ist als deklarierter Bauraum zu betrachten, in dem verschiedene Triebwerke eingesetzt werden können. Es wurde für verschiedene Zwecke mit verschiedenen Triebwerksgrößen und -kräften gerechnet, um den Bedingungen 1 kN nominal und 5 kN Envelope zu entsprechen. So wurde bei der räumlichen Integration zum Beispiel ein Triebwerk mit größtmöglichen äußeren Dimensionen herangezogen, während bei der Auslegung der Messkette ein 1-kN-Triebwerk referenziert wurde. Bei der Berechnung von Kräften und mechanischer Belastung wurde ebenfalls mit einer maximalen Kraft von 5 kN gerechnet, die das Triebwerk erzeugt.

An bestimmten Stellen ist das Konzept des Containers modular beziehungsweise vielseitig. Hier kann der Prüfstand auf verschiedene Weisen betrieben werden, zum Beispiel können verschiedene Arten von Treibstoff benutzt werden. Die Treibstoffversorgung inklusive Tank ist so ausgelegt, dass dies möglich ist. Auch möglich sind standortabhängig verschiedene Arten der Versorgung, die in Anspruch genommen werden. So kann etwa das Druckgas von der Flaschenbatterie auf dem Zugfahrzeug herangezogen werden oder eine mögliche externe Versorgung anderer Art. Dies ist auch der Fall bei der Stromversorgung, die entweder über einen auf dem zweiten Fahrzeug

mitgeführten Stromgenerator erzeugt wird oder durch eine externe Versorgung bereit gestellt wird.

Auch die Kraftmessung erfordert eine Modularität. Durch die verschiedenen Größen und Nennschubkräfte der Triebwerke muss die Kraftmessung abhängig von der Nennkraft mit verschiedenen Kraftmessdosen erfolgen. Diese können an der entsprechenden Stelle vor dem Test eingesetzt werden, um eine präzise Messung in dem jeweiligen Messbereich zu ermöglichen.

Die Schnittstellen des Prüfstands nach außen sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Hierbei sind die verschiedenen Schnittstellen nach Herkunft beziehungsweise Ziel klassifiziert.

Tabelle 5.1: Schnittstellen des Prüfstands nach außen, geordnet nach Herkunft beziehungsweise Ziel.

Schnittstelle	Herkunft bzw. Ziel	Anmerkung
Druckgas Stickstoff	Flaschenbatterie auf dem Zugfahrzeug oder Standortversorgung	Gemeinsame Schnittstelle S1 auf Zwischendruckniveau, Quelle austauschbar (Abschnitt 6.3)
Elektrische Energie	Stromaggregat auf dem zweiten Fahrzeug oder Standortnetz	Getrennt von der Versorgung des Kontrollstands (Abschnitt 8.1)
Mess-, Steuer- und Videodaten	Kontrollstand	Lichtwellenleiter, Ausführung siehe Abschnitt 10.3
Sicherheitsverbindung	Kontrollstand	Hartverdrahtet, Ruhestromprinzip, Abschnitt 10.3
Betriebsmedien HTP und Treibstoff	Externe Bereitstellung, Gebinde auf dem zweiten Fahrzeug	Befüllung je Kampagne, Nachlieferung möglich (Abschnitt 8.1)
Wasser	Interne Reserve nach F-261, sicherheitstechnisches Wasser vom Standort	Löschwasser und Notdusche sind nicht mitführbar (Abschnitte 8.1 und 8.2)
Entlüftung und Abluft	Umgebung	Vent-Pfade und Zonenbelüftung, Führung siehe Abschnitt 6.1
Erdung und Potentialausgleich	Untergrund am Aufstellort	Nach F-522, im mitgeführten Equipment als Position 1.12 geführt
Triebwerk	Deklarierte Bauraum in der Triebwerkszone	Als Black Box behandelt, betrachtet werden nur die Schnittstellen (Abschnitt 3.5)

5.2 Zonenkonzept und Begründung

Um eine adäquate Trennung der Komponenten zu erreichen und einen störungsfreien und sicheren Betrieb zu ermöglichen, wurde der Innenraum in drei Zonen gegliedert (Anforderung B-111). Die drei Zonen tragen die Titel Triebwerkszone, Tankzone und Technikzone. Es folgt die Begründung, warum nach diesem Schema getrennt wurde, und eine Erläuterung, welche Komponentengruppen sich in welcher Zone befinden. Außerdem werden die Schutzmaßnahmen erklärt, die den sicheren Betrieb ermöglichen. Eine detaillierte Auflistung der Komponenten und Bestückung samt Maßen erfolgt in dem Abschnitt 5.3.

Der maßgebliche Treiber für die Abtrennung der Tankzone und der darin befindlichen Komponenten ist der Explosionsschutz (Ex-Schutz). Eventuell auftretende Treibstoffdämpfe sowie von dem HTP freigesetzter Sauerstoff dürfen keiner Zündquelle ausgesetzt sein, weswegen in der Tankzone keine Komponenten verbaut sein dürfen, von denen eine Zündquelle ausgehen kann (F-523). Komponenten, von denen eine potentielle Zündquelle ausgehen kann, sind in der Triebwerkszone und Technikzone zu finden, wie zum Beispiel die Zündvorrichtung des Triebwerks oder der Schaltschrank mit der Technik und Elektronik.

Zusätzlich wirkt die Trennung als Brandabschnitt und begrenzt die Ausbreitung von Gasen zwischen den Zonen. Ein Brand oder austretendes Gas in einer Zone soll nicht auf die übrigen Zonen übergreifen. Auch die Temperierung wird durch das Abtrennen in Zonen erreicht. Die von dem Triebwerk ausgehende Hitze wird außerhalb von Tankzone und Technikzone in der Triebwerkszone durch die geöffneten Flügeltüren des Containers an die Umwelt abgeleitet.

Jede Zone ist durch eine separate Tür nach außen zu erreichen, die Triebwerkszone durch die Flügeltüren am Heck des Containers, Technik- und Tankzone durch Personentüren an der Seite des Containers. Die Triebwerkszone befindet sich im Heck, damit die Flammen und die Hitze durch die große Öffnung der Doppelflügeltüren ins Freie gelangen können. In der Mitte folgt die Tankzone, um kurze Druckleitungen von den Tanks zu dem Triebwerk hin zu ermöglichen und somit einen geringen Leistungsverlust. Und im Bug befindet sich die Technikzone mit dem Anschlusspanel für die Versorgung mit Strom, Wasser und Daten durch externe Geräte und Leitungen. Ein

zweites Anschlusspanel für die Druckgasversorgung befindet sich an der Bordwand der Tankzone.

Das Triebwerk wird nicht an der Außenseite des Containers angebracht, obwohl dies auch Vorteile mitbringen würde. Die Außenwand wäre automatisch eine Trennwand gegenüber dem Rest des Systems, und die Kräfte könnten direkt auf die äußere Struktur des Containers eingeleitet werden. Es würde auch mehr Platz in dem Container für die restlichen Komponenten zur Verfügung stehen. Verworfen wurde diese Variante, da hierbei kein Witterungsschutz für das Triebwerk und die restlichen Komponenten der Zone besteht und der Auf- und Abbau beziehungsweise der Transport wesentlich komplizierter verlaufen würde. Entweder müsste das Triebwerk samt Befestigungsrahmen bei jeder Kampagne auf- und abgebaut werden, oder die Druckleitungen des HTP und der Treibstoffe sowie die zum Messen benötigten Kabel müssten einen Anschluss an der Außenwand des Containers besitzen.

Die Trennwände sind gasdichte Abtrennungen der Zonen aus einem 1,2 mm starken Stahlblech, das ähnlich wie die Außenwände des Containers profiliert ist, um strukturelle Integrität zu erlangen. Die Trennwand zwischen Tankzone und Triebwerkszone wird im Folgenden als Trennwand 1 (TW1) bezeichnet, die Trennwand zwischen Technikzone und Tankzone als Trennwand 2 (TW2). Die Masse dieser Trennwände ist in der Massenbilanz in Tabelle A.7 ausgewiesen.

Die Trennung der Zonen durch Trennwände erfordert eine gasdichte Durchführung für alle Leitungen und Kabel, die die Trennwände durchdringen. Auch eine separate Klimatisierung mit zwei getrennten Geräten für Technik- und Tankzone wird durch die Trennung erforderlich. Die Tankzone ist zusätzlich zwangsbelüftet, um potentielle Treibstoffdämpfe sowie aus dem HTP entstandenen Sauerstoff abzuführen. In den Trennwänden befinden sich keine Türen, weshalb jede Zone über eine eigene Öffnung nach außen erschlossen werden muss.

Gegen Fragmente, die bei einer Explosion des Triebwerks entstehen können, bietet TW1 dagegen keinen Schutz. Hierfür kommt eine Schutzschale zum Einsatz, welche möglichst nah am Triebwerk sitzt, um die Fragmente abzufangen und die Komponenten des Prüfstands zu schützen. Die Größe der Schutzschale wurde nach dem Schattenwurfprinzip ermittelt, wobei ausgehend vom Triebwerk die Schutzschale TW1 gegen Fragmente abschatten soll. Damit kann die Schutzschale um ein Vielfaches kleiner ausfallen als TW1, was wiederum Gewicht und Material spart. Die nicht verschattete

Außenhaut und das Dach der Triebwerkszone sind bewusst Opferbereiche, da mögliche Schäden in diesen Bereichen nicht den Aufwand des Abschirmens lohnen. Die genaue Auslegung und Berechnung der Schutzschale erfolgt in Abschnitt 11.2, die Rechnung für die Größe der Schutzschale nach dem Schattenwurfprinzip befindet sich in Anhang in der Tabelle A.13.

5.3 Container-Layout, CAD-Modell und physisches Modell

Das in Abschnitt 5.2 beschriebene Konzept des Zonenlayouts wird in diesem Abschnitt konkretisiert und auf bestimmte ausgewählte Komponenten und Bauteile angewandt. Zuerst wird die Wahl der Containerart getroffen und ein bestimmter Container ausgewählt, mit den darauffolgenden Randbedingungen des Herstellers. Anschließend werden die Öffnungen im Container beschrieben, dann die Größen der Zonen und die Bestückung. Am Ende dieses Abschnittes wird eine Abgrenzung vorgenommen, die dieses Modell betrifft.

Die grundsätzliche Wahl der Plattform wurde bereits von der Aufgabenstellung zu dieser Arbeit getroffen. Die Plattform besteht grundsätzlich aus einem 20-ft-Container. Hierbei gibt es viele verschiedene Arten, wie ein solcher Container beschaffen ist. Die Auswahl bei diesem Projekt erfolgt insbesondere anhand eines Kriteriums, dem Leergewicht. Die verschiedenen Containerarten unterscheiden sich vorrangig anhand der strukturellen Integrität des Aufbaus des Containers, sprich wie stabil der Container gebaut ist. Der Standard-Seecontainer ist vergleichsweise robust gebaut, um eine hohe Stapelbarkeit zu ermöglichen sowie eine hohe mögliche Zuladung. Diese Stapelbarkeit und hohe mögliche Zuladung sind im Falle des Prüfstands nicht ausschlaggebend, da hier nicht vorgesehen ist, eine Stapelung mehrerer Container vorzunehmen, und der Container mit rund 1,2 Tonnen beladen wird. Der Unterschied in der Leermasse der verschiedenen Container ist beachtlich. Dies kann Tabelle 5.2 entnommen werden, in der verschiedene Containervarianten und andere Arten der Plattform verglichen werden.

Gewählt wurde ein Lagercontainer, da dieser mit 1.270 kg nach Herstellerangabe (siehe Anhang A.19) das niedrigste Leergewicht aller betrachteten Varianten aufweist und trotzdem die Flexibilität eines Standardcontainers beim Transport mit sich bringt.

Tabelle 5.2: Vergleich der betrachteten Plattformvarianten nach dem Leergewicht. Quelle: eigene Zusammenstellung nach Herstellerangaben

Variante	Leergewicht 20 ft	Bewertung
CONTAINEX Lagercontainer LC 20 ft	1.270 kg	Gewählt. Niedrigstes Leergewicht aller betrachteten Varianten bei ISO-Außenmaßen, ISO-Eckbeschlägen und Typenzertifikat
Standard-Seecontainer ISO 668	2.250 kg	Verworfen. 24 t Nutzlast und neunfache Stapelbarkeit liegen weit über dem Bedarf
Shelter in Aluminium-Sandwichbauweise	2.800 kg	Verworfen. Bei dieser Tragfähigkeitsspezifikation ist Aluminium schwerer als Stahl
Bürocontainer 20 ft	2.900 kg	Verworfen. Ausgelegt auf Gebäudelasten, mit Dämmung und Innenausbau
Open-Side-Container 20 ft	3.050–3.180 kg	Verworfen. Die Seitenöffnung kostet 800 bis 900 kg, weil die Längswand als Schubfeld entfällt
Wechselbrücke 7,45 m	2.860–3.800 kg	Verworfen. Für 16 t Zuladung ausgelegt, zusätzlich Überlänge
Sonderbau in Aluminium-Sandwichbauweise	1.115–2.416 kg	Verworfen. Die Spanne überspringt die Gewichtsgrenze in beide Richtungen, bei rund 23 % Unsicherheit ist kein belastbares Ergebnis erreichbar

Ein Sonderbau in Aluminium-Sandwichbauweise wurde ebenfalls in Betracht gezogen. Die überschlägige Rechnung ergab eine Spanne von 1.115 bis 2.416 kg bei einer Unsicherheit von rund 23 Prozent. Diese Spanne überspringt die Gewichtsgrenze in beide Richtungen, ein belastbares Ergebnis wäre erst mit einer Auslegung durch den Hersteller zu erreichen. Der Sonderbau wurde daher verworfen, weil er kein nachweisbares Ergebnis liefert, nicht weil er sicher schwerer wäre. Der gewählte Container ist für 10 Tonnen zugelassen (siehe Tabelle 5.3), benötigt wird also etwa ein Achtel der verfügbaren Tragfähigkeit (siehe Tabelle A.7 im Anhang).

Eine kürzere Baulänge des Containers wurde ebenfalls in Betracht gezogen, jedoch verworfen. Zum einen benennt die Aufgabenstellung ausdrücklich einen 20-ft-Container als Plattform. Zum anderen würde bei einer kürzeren Baulänge nicht ausreichend Platz für alle Komponenten im Innenraum zur Verfügung stehen, insbesondere für die drei Zonen mit den jeweiligen Quergängen.

In Tabelle 5.3 werden die wichtigen Randbedingungen des gewählten Containers von dem Hersteller CONTAINEX beschrieben.

Die Voraussetzung, dass lediglich zwei Öffnungen pro Längsseite an dem Container vorgenommen werden dürfen, wird in dem Prüfstandskonzept eingehalten, da nur zwei Personentüren an der einen Seitenwand des Containers eingesetzt werden. Kleine Öffnungen wie Kabel- und Schlauchdurchführungen zählen nicht als eine solche Öffnung. Die am Heck sitzende Doppelflügeltür ist serienmäßig an dem Container verbaut (siehe Anhang A.19).

Die Zonen erstrecken sich jeweils über die volle Innenbreite des Containers, unterscheiden sich also nur in ihrer Länge. Die Technikzone im Bug misst 1.475 mm, die mittig gelegene Tankzone 2.175 mm und die Triebwerkszone im Heck 2.168 mm. Die Länge der Triebwerkszone ergibt sich dabei als Rest aus der Innenlänge des Containers abzüglich der beiden anderen Zonen und der Trennwände (siehe Tabelle 5.3).

In der Technikzone befinden sich der Schaltschrank mit der Steuerungs-, Mess- und Netzwerktechnik, der Druckluftkompressor, die Wasserpumpe und das Innengerät der Klimatisierung. Die Tankzone nimmt den HTP-Tank und den Treibstofftank mit den zugehörigen Auffangwannen auf, dazu die Sammelbehälter beider Medien, den Spülwassertank mit der Wasseraufbereitung, das Druckminderer-Panel und den Pneumatik-Ventilblock. In der Triebwerkszone stehen der Ground Frame als feststehender Grund-

Tabelle 5.3: Randbedingungen des gewählten Containers CONTAINEX Lagercontainer LC 20 ft.
Quelle: Technische Beschreibung Lagercontainer (siehe Anhang A.19)

Größe	Wert	Anmerkung
Außenmaße	$6.058 \times 2.438 \times 2.591$ mm	ISO-Außenmaße, Eckbeschläge nach ISO 1161
Leergewicht	1.270 kg	Ausführung mit Holzboden
Maximale Nutzlast	10.000 kg	Nach statischer Berechnung und Typenzertifikat
Maximale Hebenutzlast	6.500 kg	Bei 1,5 g, deutlich über der Containermasse von 2.683,6 kg
Kranbetrieb	Seilwinkel mindestens 60°	Gegen die Horizontale
Staplertaschen	355×105 mm, Mittenabstand 2.050 mm	Erfordert mindestens 2 m Gabellänge
Öffnungen je Längsseite	höchstens zwei	Kabel- und Schlauchdurchführungen zählen nicht mit
Hecköffnung	Doppelflügeltür, Öffnungsradius ca. 270°	Serienmäßig verbaut
Stapelung	nicht vorgesehen	Für das Konzept ohne Bedeutung

Der Container ist für 10 t zugelassen, benötigt wird bei rund 1,2 t Zuladung etwa ein Achtel der verfügbaren Tragfähigkeit. Die Beschränkung auf zwei Öffnungen je Längsseite ist eingehalten, da nur zwei Personentüren an einer Seitenwand vorgesehen sind.

rahmen mit dem darin geführten Floating Frame als beweglichem Schubrahmen, das Triebwerk selbst und die Schutzschale.

Die Maße der Zonen und die räumliche Aufteilung der Komponenten sind dem CAD-Modell zu entnehmen. Abbildung 5.1 zeigt eine isometrische Ansicht mit transparent dargestellten Seitenwänden. Darin werden die Lage der drei Zonen, die Positionen der Komponenten und die Quergänge deutlich. Das CAD-Modell dient lediglich zur räumlichen Integration der verschiedenen Komponenten, aus diesem Grund wurde dieses nur als Blockgeometrie angedeutet und nicht detailliert gezeichnet. Dies begünstigt zusätzlich die Übersichtlichkeit des Modells. In einigen Fällen wurden die Komponenten mit einem Übermaß als Blockgeometrie dargestellt, um als Platzhalter für verschiedene mögliche Varianten ausreichend Platz frei zu halten. Die detaillierte Auswahl dieser Komponenten ist nicht Teil dieser Arbeit. Die genannten und ausgewählten Produkte sind lediglich beispielhaft für die Maßhaltung ausgewählt und dienen nicht als Beschaffungsliste. Kleinere Bauteile wie Ventile, Sensoren, Leitungen und Kabel sind nicht modelliert. Dies dient der Übersichtlichkeit und entspricht dem Detaillierungsgrundsatz dieser Arbeit (Abschnitt 3.5).

Aus dem CAD-Modell wird zusätzlich ein physisches Modell im Maßstab 1:10 abgeleitet. Es entsteht im FFF-Verfahren (Fused Filament Fabrication, Schmelzschichtung), ergänzt um Bauteile aus Acrylglas (Polymethylmethacrylat, PMMA), die im Laserschnitt gefertigt werden.

Das physische Modell dient der anschaulichen Darstellung des Gesamtkonzepts sowie der Unterstützung von Besprechungen und Präsentationen. Es ist damit ein Kommunikationsmittel zur besseren Verständlichkeit des Projekts. Die räumliche Integration ist bereits im CAD-Modell geprüft, das physische Modell verfolgt darüber hinaus keinen weiteren Zweck als die Veranschaulichung.

Die Blockgeometrie der Komponenten wird aus dem CAD-Modell unverändert übernommen. Dadurch werden die Anordnung, die Einteilung in die drei Zonen des Prüfstands sowie die Größenverhältnisse deutlich. Ergänzt wurden lediglich fertigungsbedingte Merkmale, die das Modell selbst benötigt, etwa Aufnahmen am gedruckten Grundkörper, in die die Wände aus Acrylglas eingesetzt werden. Diese Merkmale sind am realen Container nicht vorhanden.

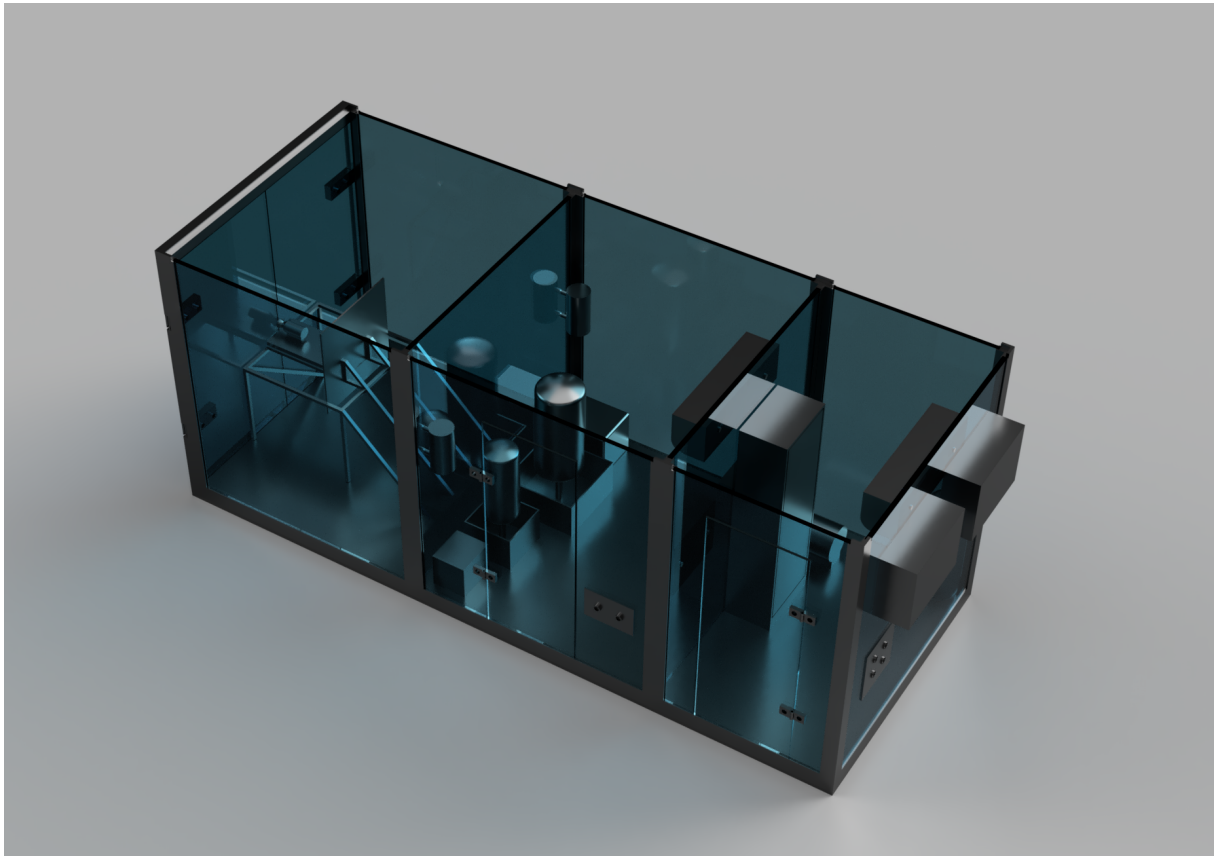


Abbildung 5.1: Isometrische Ansicht des CAD-Modells mit transparent dargestellten Seitenwänden. Erkennbar sind die drei Zonen, die Anordnung der Komponenten als Blockgeometrie und die Quergänge.

Bis auf die Seitenwände und die Decke werden alle Bestandteile des Modells im FFF-Verfahren gefertigt. Bei diesen flächigen Bauteilen ist die Herstellung aus Acrylglas sinnvoller als der 3D-Druck. Hinzu kommt, dass der transparente Werkstoff den Blick auf die innen liegenden Komponenten freigibt. Die Decke sowie Teile der Seitenwand lassen sich abnehmen, um die Einsicht in das Innere weiter zu verbessern. Die Türen des Modells lassen sich über Scharniere öffnen und schließen. Die Scharniere sind nicht maßstabsgetreu ausgeführt, da sie am Modell funktionsfähig sein müssen, sie sind in dieser Form auch im CAD-Modell hinterlegt.

Bewusst nicht dargestellt werden Details der Bauteile und Komponenten, Kleinteile sowie Kabel und Rohrleitungen. Dies hält das Modell übersichtlich und entspricht zugleich den Auflösungsgrenzen der eingesetzten Fertigungsverfahren: Im Maßstab 1:10 ergäbe sich für eine Leitung der Nennweite DN 10 ein Außendurchmesser von etwa einem Millimeter, für Kabel entsprechend weniger. Solche Abmessungen liegen unterhalb dessen, was im FFF-Verfahren sinnvoll darstellbar ist.

5.4 Mechanische Integration

In diesem Abschnitt wird die Plausibilität der mechanischen Integration erläutert. Es wird kein Konstruktionsnachweis erhoben und keine Detailkonstruktion erstellt. Die Plausibilität wird über drei Nachweise gezeigt, die Belastung durch den Schub des Triebwerks, die Stabilität des Containerbodens gegenüber der statischen Belastung und die Belastung bei dem Transport.

Das Triebwerk sitzt in dem Floating Frame, der sich entlang der Schubachse bewegen kann [13]. Der Schub des Triebwerks erzeugt eine Kraft, die durch die Kraftmessdose gemessen und dann an den Ground Frame weitergegeben wird. Der Ground Frame ist am Containerboden verschraubt, hier wird die Kraft an den Untergrund weitergegeben, auf dem der Container steht. Die Verankerung am Untergrund wird in Abschnitt 9.2 beschrieben.

Der Ground Frame und der Floating Frame sind in dem CAD-Modell nur beispielhaft als Platzhalter konstruiert und wurden nicht detailliert ausgelegt (Abschnitt 3.5).

Das Kippmoment, das durch die Versetzung der Schubachse 950 mm über dem Containerboden entsteht, wird durch die Verschraubung des Ground Frame an dem Containerboden aufgenommen. Hierbei ist zu prüfen, ob der Containerboden dieser Belastung standhält und selbst gegen Abheben gesichert ist. Dies konnte nicht aus dem Datenblatt oder anderen Herstellerinformationen entnommen werden und ist als offener Punkt in Abschnitt 12.2 aufgeführt.

Bei allen Komponenten wurde eine Prüfung der Bodenlast vorgenommen. Die Gesamtmasse aller Komponenten liegt weit unter der zulässigen Zuladung des ausgewählten Containers (siehe Abschnitt 5.5). Kritisch ist somit nicht die Gesamtmasse, sondern die Flächenlast einzelner Komponenten, und diese liegt nur bei einer Komponente in einem kritischen Bereich. Der HTP-Tank überschreitet die maximal zulässige Bodenlast von 750 kg/m^2 , wenn die Last allein über die Zarge des Tanks eingeleitet wird. Durch eine Verteilung der Last auf eine größere Fläche des Bodens wird der zulässige Wert eingehalten. Dies kann beispielsweise über die ohnehin vorhandene Auffangwanne erfolgen, die den Tank aufnimmt und die Last auf ihre Grundfläche verteilt.

Alle im Prüfstand befindlichen Komponenten sind fest verschraubt und dauerhaft installiert, für den Transport wird keine Komponente aus dem Inneren demontiert. Beim Transport befinden sich keine Medien in den Tanks des Prüfstands. Eventuell müssen bei einigen Komponenten, die an der Wand montiert sind, bestimmte Maßnahmen getroffen werden, um eine sichere Befestigung auch während des Transports zu gewährleisten. Dies könnte eine Befestigung an den Rahmenprofilträgern des Containers sein und nicht auf dem Wandblech. Auch Konsolen zur Lastverteilung könnten zum Beispiel bei der Montage der Klimageräte zum Einsatz kommen. Dies ist ebenfalls bei der Detailkonstruktion des Prüfstands zu prüfen.

Diese Ergebnisse sind ausdrücklich nur ein Nachweis der Machbarkeit. Es wurden keine detaillierten Festigkeitsberechnungen und keine Schweißnahtauslegungen durchgeführt, damit handelt es sich hierbei auch nicht um eine Fertigungsfreigabe.

5.5 Gewichtsbudget und Mobilitätsanforderungen

Es folgt nun der Beweis, dass die Gewichtsgrenze der zulässigen Gesamtmasse eines mit einer Fahrerlaubnisklasse BE zu fahrenden Anhängers eingehalten werden kann.

Der Abschnitt ist wie folgt aufgebaut: Zuerst wird der entsprechende Grenzwert und dessen Herkunft erläutert, gefolgt von der eingesetzten Methodik für den Beweis, der sich aus Bilanz, Sensitivität und Betriebsregeln zusammensetzt.

Der Anhänger, der aus dem Prüfstand samt Basis aus Container und den im Container befindlichen Komponenten besteht, darf eine Gesamtmasse von 3.500 kg nicht überschreiten. Dies ergibt sich aus den Gesetzen für das Führen eines Anhängers mit der Fahrerlaubnisklasse BE in Deutschland. Dies ist als Auslegungsziel in der Anforderung B-102 formuliert. Alternativ könnten auch höhere Fahrerlaubnisklassen, beispielsweise C1E, für die Auslegung genutzt werden. Dies schränkt jedoch den Personenkreis der Fahrzeugführer und Fahrzeugführerinnen erheblich ein, weswegen diese Alternative verworfen wurde.

Es zählt ausschließlich die Masse des Containers samt Inhalt zusammen mit dem Anhänger, auf dem der Container transportiert wird. Nicht zu der Masse zählen die Komponenten des GSE und die Betriebsmedien, die sich im Transportfall nicht auf dem Anhänger befinden (siehe Abschnitt 5.1). Der Anhänger an sich beläuft sich auf eine Masse von circa 560 kg nach Herstellerangaben, abhängig von etwaigen Anbauten. Aus diesem Grund ist die Zahl in der Tabelle, die die Bilanz berechnet, anpassbar.

Jede Position der Gewichtsbilanz enthält eine Angabe der Herkunft des Zahlenwertes, sprich ob dieser aus einem Datenblatt entnommen, errechnet oder angenommen wurde. Abhängig von der Herkunft wurde die Marge für die jeweiligen Positionen in verschiedenen Größen erhoben. Für Datenblattwerte wurde eine Marge von 5 % erhoben, für errechnete Werte 10 % und für angenommene Werte eine Marge von 20 %. Ein sicherer Herstellerwert aus einem Datenblatt ist genauer als ein angenommener Wert für die Klasse an verbautem Bauteil. Deswegen wurde, wo möglich, ein Bauteil ausgewählt, um einen belastbaren Wert des Herstellers zu erlangen. Dieser wurde dann, um eine spätere Änderung zu berücksichtigen, mit einer Marge von 5 % versehen. Bei errechneten und angenommenen Werten wächst die Unsicherheit des konkreten Zahlenwertes und damit auch die erhobene Marge.

Von einer Marge auf die gesamte errechnete Masse wurde abgesehen, da dies eine Doppelung wäre. Jede Position enthält bereits die Unsicherheit und muss nicht durch eine weitere ergänzt werden (siehe Abschnitt 3.6).

Die Nominalmasse des Containers samt Inhalt beläuft sich laut Berechnungen ohne Marge auf 2.498,4 kg mit einer zusammengerechneten Marge von 185,2 kg. Damit ergibt sich eine zu erwartende Gesamtmasse des Containers von maximal 2.683,6 kg. Durch Ergänzung des Anhängers beläuft sich die Anhängergesamtmasse auf 3.243,6 kg. Dadurch entsteht eine Reserve von 256,4 kg und eine Ausnutzung des zulässigen Gesamtgewichts von 92,7 %. Diese Werte sind der Tabelle A.8 aus dem Anhang zu entnehmen.

Rund zwei Drittel der Masse kommen aus Datenblattwerten, nur knapp sieben Prozent kommen aus angenommenen Werten. Somit besteht die Gewichtsbilanz größtenteils aus belegten Werten, die zusammen mit entsprechenden Margen eine belastbare Aussage treffen lassen.

Die Gewichtsbilanz wird von der Masse des Containers selbst dominiert, dieser macht mit 1.270 kg mehr als die Hälfte der Nominalmasse aus (siehe Tabelle A.7). Danach folgen mit erheblichem Abstand, aber weiterhin erheblichem Anteil der Schaltschrank, die Klimatisierung und die Trennwände als größte Positionen des Innenausbaus. Die Masse der Triebwerksanbindung, sprich Ground Frame und Floating Frame, wurde nur angenommen, da hier eine Detailkonstruktion nicht Teil der Arbeit ist (siehe Abschnitt 3.5).

Es gibt eine Reihe von Sensitivitäten, die die Masse noch beeinflussen könnten. Dies sind Entscheidungen, die noch offen gehalten wurden. Eine Erhöhung der Druckstufe und die damit einhergehenden stabileren Bauteile würden einen Zuwachs von ungefähr 15 kg bedeuten, während beispielsweise das Auslassen einer Montageplatte im Schaltschrank und eine Befestigung nach anderer Art eine Ersparnis von 13 kg bewirken würden. Die einzelnen Sensitivitäten sind der Tabelle A.9 im Anhang zu entnehmen. Hier greift die zur Verfügung stehende Reserve zu dem zulässigen Gesamtgewicht. Auch die massenwirksamste der offenen Entscheidungen liegt deutlich innerhalb dieser Reserve.

Aus der strikten Gewichtsgrenze folgen einige Betriebsregeln, die den Transport und Aufbau sowie die Versorgung mit Betriebsmitteln betreffen. Die Stützbeine für den Container, um diesen von dem Anhänger abzuladen, sowie das Druckgasflaschengestell samt Druckflaschen befinden sich auf dem Zugfahrzeug und zählen somit nicht in die Anhängermasse hinein. Auch andere Komponenten werden auf dem Zugfahrzeug transportiert. Allein das Flaschengestell der Druckgasflaschen samt Inhalt und die

Stützbeine zusammen würden 594 kg zur Masse hinzufügen, was die Gewichtsgrenze sprengen würde. Folglich müssen diese Betriebsbedingungen und Transportregeln im Betrieb des Prüfstands eingehalten und in der Bedienungsanweisung des Prüfstands dokumentiert werden.

Die Gewichtsgrenze der Fahrerlaubnisklasse BE auf den zu führenden Anhänger ist also mit dem vorliegenden Konzept eingehalten. Die Ausarbeitung in diese Richtung kann somit weiterverfolgt werden, ohne zu riskieren, zu einem späteren Zeitpunkt festzustellen, dass das Gewicht nicht einzuhalten ist.

5.6 Klimatisierung

Ein Außentemperaturfenster von 0 bis 35 Grad Celsius wurde für den Betrieb gesetzt, um zu verhindern, dass durch zu extreme Temperaturen der sichere Betrieb des Prüfstands eingeschränkt wird (B-130). Zusätzlich kommt eine aktive Klimatisierung zum Einsatz, um in den sicherheitskritischen Zonen eine möglichst gleichmäßige Temperatur zu gewährleisten, sowohl für die Bauteile und Komponenten des Prüfstands als auch für das am Prüfstand arbeitende Personal während möglicher Wartungs- und Einstellarbeiten. Hinzu kommt, dass HTP gewisse Temperaturen nicht überschreiten darf, denn bei erhöhten Temperaturen zersetzt sich HTP schneller, was wiederum zu einer Erhöhung der Temperatur führt. Dieser Prozess schaukelt sich von selbst auf, deswegen ist die Temperaturgrenze einzuhalten (F-209). Auch die Messtechnik und Elektronik benötigt definierte Temperaturen. Die Berechnungen zur aktiven Klimatisierung befinden sich im Anhang, hier wird lediglich das Ergebnis dargestellt.

Die aktive Klimatisierung erfolgt durch zwei getrennte Geräte, jeweils eins in der Tank- und eins in der Technikzone. Dies ist mit der gasdichten Trennung dieser beiden Räume zu begründen, woraus die Betrachtung als zwei getrennte Luftvolumen abzuleiten ist. Ein Gerät klimatisiert die Technikzone, welches keinen besonderen Anforderungen genügen muss, sondern nur ausreichend Leistung bereitstellen muss, um auch die Abwärme der elektrischen Komponenten der Technikzone abzudecken. In der Tankzone hingegen muss ein Gerät mit Explosionsschutz zum Einsatz kommen, um keine Zündquelle für Treibstoffdämpfe oder Sauerstoff aus der HTP-Zersetzung zu bieten. Hinzu kommt, dass die Tankzone zwangsbelüftet ist und hierdurch ein ständiger Austausch mit der

Außenluft stattfindet. Das Klimagerät muss hierfür ausgelegt sein. Auch das Kältemittel muss den Brandschutzbedingungen des Prüfstands entsprechen und der Klassifizierung nicht brennbar genügen.

Zusätzlich zur aktiven Klimatisierung kommt eine Dämmung des Daches zum Einsatz. Dies verringert die abstrahlende Wärme, die durch das sich durch Sonne aufgeheizte Dachblech entsteht. Die Dämmung des Daches ist ausschlaggebend für die Kühlung der Räume, nicht für das Heizen der Räume. Auf das Gewicht betrachtet bringt die Dämmung des Daches den größten Effekt je Kilogramm. Von einer Dämmung des Bodens oder der Wände wurde abgesehen, da der Effekt nicht das zusätzliche Gewicht rechtfertigt. Die Dämmung muss aus einem nicht brennbaren Material bestehen, um den Sicherheitsanforderungen des Prüfstands in Bezug auf Brandschutz zu genügen.

Die Rechnung der Heiz- und Kühllast je Zone lässt sich in Tabelle 5.4 ablesen. Auch in der Tabelle zu sehen sind die daraus gewählten Klimageräte mit der entsprechenden Leistungsangabe für Kühlung und Heizung. Die Massen der Geräte sind in der Gewichtsbilanz berücksichtigt.

Tabelle 5.4: Heiz- und Kühllast je Zone und gewählte Klimageräte (siehe Anhang A.19).

Zone	Last		Gerät nominal		Gewähltes Gerät
	Heizen kW	Kühlen kW	Heizen kW	Kühlen kW	
Technikzone	1,30	1,45	2,9	2,6	Bosch CL3000i 26 E
Tankzone	2,06–2,51	2,45–2,75	4,0	3,5	Atexxo AIR-EX-FTXM-35
Summe	3,36–3,81	3,90–4,20	6,9	6,1	

Heizfall von 0 auf +15 °C, Kühlfall bei 35 °C Außentemperatur. Die Spanne der Tankzone folgt aus dem Bereich von 5 bis 12 Luftwechseln nach F-521. **Der Kühlfall ist die größere Last und setzt die Gerätegröße**, weil im Kühlfall 800 W Innenlast der Technikzone und der solare Eintrag hinzukommen, die es im Heizfall nicht gibt. Der Heizfall ist gegen die bei 0 °C um 15 bis 25 % abgeminderte Geräteleistung geprüft und gedeckt, es verbleiben 2,2 bis 2,5 kW in der Technikzone und 3,0 bis 3,4 kW in der Tankzone. Die Triebwerkszone wird nicht klimatisiert.

6 Fluid- und Mediensysteme

In diesem Kapitel werden die fünf Medienstränge des Prüfstands erläutert. Dazu zählen der Strang des Oxidators und der des Treibstoffs, der Strang der Druckgasversorgung, die Spülung und Entsorgung der Medien sowie der Druckluftstrang. Die genannte Reihenfolge folgt einer Logik. Zuerst werden die beiden Hauptmedienpfade beschrieben, die den Betriebspunkt des Triebwerks bestimmen, dann die Druckgasversorgung, die diese beiden Pfade aufdrückt, und danach die Hilfsmedien. Letztere haben nur kleine Auswirkungen auf die Parameter des Triebwerks, ohne sie ist der Prüfstand aber nicht zu betreiben.

Die räumliche Zuordnung und die Zonenlogik werden in Kapitel 5 beschrieben, Sensorik und Steuerung in Kapitel 7, die Prozeduren in Kapitel 8 und der Brandschutz in Kapitel 11. All dies ist nicht Teil dieses Kapitels. Hinzu kommt, dass das Triebwerk als Black Box behandelt wird. Die Medienpfade enden an der Schnittstelle zum Triebwerk (F-601). Alle in diesem Kapitel beschriebenen Stränge, Armaturen und Messstellen sind im R&I-Fließbild in Anhang A.17 vollständig dargestellt und dort im Zusammenhang nachvollziehbar.

6.1 Oxidatorsystem (HTP)

In dem folgenden Abschnitt wird der HTP-Strang beschrieben. Er stellt dem Triebwerk das HTP über die gesamte Brenndauer eines Tests zur Verfügung. Der Pfad beginnt am Tank und endet am Ausgang A1, der Schnittstelle zum Triebwerk.

Das Befüllen und Entleeren an E1 und A2 sowie die Wasserspülung an E2 sind Schnittstellen dieses Strangs. Sie werden in Abschnitt 6.4 beschrieben. Der Aufdruck erfolgt über den Eingang E3 und ist in Abschnitt 6.3 beschrieben. Spülung und Entsorgung greifen auf beide Medienpfade zu, deswegen werden sie gesondert und zusammengefasst in Abschnitt 6.4 behandelt.

Dimensionierend für die Auslegung des HTP-Strangs wie auch des Treibstoffstrangs ist der Envelope-Fall mit 5 kN und nicht der Nennpunkt mit 1 kN, da in diesem Fall ein höherer Massenstrom zu erwarten ist. Die Rahmenwerte hierfür kommen aus Abschnitt 4.1 und werden hier nicht erneut hergeleitet.

Die Tankgröße von 110 Litern wird aus Abschnitt 4.1 übernommen. Als Werkstoff kommt der austenitische Edelstahl 1.4404 zum Einsatz. Austenitische Edelstähle sind im passivierten Zustand mit HTP verträglich [7, 9] und damit der Standardwerkstoff für HTP-führende Bauteile (F-206). Die Werkstoffwahl gilt für den gesamten Medienpfad und wird am Ende dieses Abschnitts gemeinsam mit dem geforderten Reinigungszustand behandelt.

Der Auslegungsdruck des Tanks beträgt 40 bar und entspricht damit der Nennstufe PN 40 [11]. Diese Nennstufe bildet die Obergrenze des Auslegungsfensters, aus dem der Betriebsdruck von 39 bar folgt. Hergeleitet wird das Fenster am Ende von Abschnitt 6.2, da dafür die Druckverluste beider Medienpfade vorliegen müssen.

Der HTP-Tank ist einwandig ausgeführt. Um austretendes oder verschüttetes HTP aufzufangen, kommen eine Auffangwanne und eine beständige Bodenauskleidung zum Einsatz (F-561). Die Anforderung nennt damit die Rückhaltung als Mittel und nicht die Wandausführung des Tanks. Beide Tanks sind entsprechend symmetrisch aufgebaut.

Ein zuerst in Betracht gezogener doppelwandiger Aufbau führt dazu, dass sich der bei der HTP-Zersetzung freigesetzte Sauerstoff im Spalt zwischen den Wänden sammelt und dort Druck aufbaut. Hinzu kommt, dass eine HTP-taugliche Reinigung und Passivierung erforderlich ist (F-206), die im Ringspalt nicht möglich wäre.

Aus der beispielhaften Dimensionierung ergibt sich für den einwandigen Tank eine Masse von 77 kg. Gegenüber der doppelwandigen Ausführung entspricht das einer Einsparung von 38 kg.

Auch die Auffangwanne wurde beispielhaft dimensioniert. Sie hat ein größeres Volumen als der Tankinhalt, um im Falle einer Leckage das volle Tankvolumen aufnehmen zu können. Nachweisgrundlage sind die Sicherheitsanforderung S-160 und die AwSV. Zusätzlich kann bei der Detailauslegung darauf zurückgegriffen werden, dass die Wanne die Lasteinleitung in den Containerboden übernimmt (siehe Abschnitt 5.4).

Die Auffangwanne und der Sammelbehälter für das HTP lassen sich nicht zusammenlegen. Die Wanne muss im Normalbetrieb leer sein, um für eventuelle Leckagen einen Puffer zu bilden. Der Sammelbehälter wird über den Betriebsablauf des Prüfstands planmäßig gefüllt.

Die Reihenfolge der angeordneten Komponenten auf dem Medienpfad des HTP ist wie folgt. Direkt nach dem Tank kommt das Tankisolationsventil (TIV), anschließend ein Filter, ein Massenstrommesser und zum Schluss das Hauptventil (Main Run Valve, MRV). Den Abschluss bildet der Ausgang A1 als Schnittstelle zum Triebwerk.

Das TIV sitzt direkt am Tank, damit der Medienpfad gespült und gewartet werden kann, während im Tank noch Inhalt verbleibt. Der Filter liegt vor dem Massenstrommesser und dem Hauptventil, weil Partikel die engen Querschnitte zusetzen und zusätzlich als Zersetzungskatalysator wirken. Das MRV sitzt so nah wie möglich am Injektor, weil das Volumen zwischen Ventil und Brennkammer nach dem Schließen des Ventils noch nachströmt.

Zwei Ventile sind in diesem Strang erforderlich, damit Spülung und Wartung des Medienpfades unabhängig vom Tankinhalt ablaufen können.

In der Tankzone ist keine Zündquelle zulässig, da hier Sauerstoff aus der HTP-Zersetzung oder Dämpfe des Treibstoffs vorhanden sein können. Aus diesem Grund werden alle Ventile in der Tankzone pneumatisch betätigt. Hinzu kommt, dass die Ventile im Medienpfad stromlos geschlossen ausgeführt sind (fail-closed), damit bei Verlust von Strom oder Steuerluft der Fluss zum Triebwerk unterbrochen wird und der Prüfstand in einen sicheren Zustand fällt (F-520 bis F-523 und F-403). Eine HTP-spezifische Bauartforderung kommt hinzu. Es sind Kugelhähne mit entlastetem Kugelraum zu verbauen, damit sich im Hohlraum kein eingeschlossenes HTP sammeln kann. Die Zonenlogik wird in Abschnitt 5.2 erläutert, der Druckluftstrang in Abschnitt 6.5.

Der Massenstrom wird über einen Massenstrommesser erfasst, die Druckmessung erfolgt am Tank und am Injektoreingang, Temperatur- und Füllstandsensoren befinden sich am Tank. Für den Massenstrommesser wird die Coriolis-Bauart empfohlen, da diese den Massenstrom ohne Dichteannahme und damit unabhängig von Temperatur und Konzentration des HTP ermittelt. Diese Bauart erzeugt jedoch einen Druckverlust im Pfad, der in die Auslegung eingeht. Angaben zur Messkette, Genauigkeit und Signalverarbeitung folgen in Abschnitt 7.1.

Für die Auslegung des HTP-Strangs ist nicht der Tankdruck die Zielgröße, sondern der Mindestdruck am Injektoreingang. Dieser ergibt sich aus dem Brennkammerdruck und einer Mindest-Injektorsteifigkeit. Der Druckabfall über dem Injektor entkoppelt die Zuführung von Druckschwankungen in der Brennkammer. Ist dieser Wert zu klein gewählt, koppeln Kammer und Zuführung und die Verbrennung wird instabil. Ist er zu groß, steigen der Tankdruck und damit auch die Wandstärken und die Masse ohne Mehrwert. Als Auslegungsbereich werden 15 bis 25 Prozent des Brennkammerdrucks angesetzt. Die Untergrenze dieses Bereichs wird als Projektfestlegung verwendet. Mit der gewählten Untergrenze von 15 Prozent auf 30 bar Kammerdruck folgen 34,5 bar am Injektoreingang.

Aus den Rechnungen in Abschnitt 4.1 ergibt sich ein idealer Innendurchmesser von 18,37 mm. Dies ist jedoch keine Normgröße. Gewählt wird DN 15 nach EN ISO 1127 mit den Abmessungen $21,3 \times 1,6$ mm und damit 18,1 mm Innendurchmesser. Die Nennweite ist dabei eine Referenzgröße und kein Maß des Rohrdurchmessers [11]. Daraus folgen 5,2 m/s Strömungsgeschwindigkeit, was im üblichen Band von 3 bis 10 m/s liegt. Die Normnennweite liegt dicht am rechnerischen Wert, und der etwas kleinere Durchmesser wirkt konservativ, weil er den Druckverlust leicht anhebt.

Bei der überschlägigen Rechnung des Druckverlustes wurden Rohrreibung mit 0,68 bar, Einzelwiderstände mit 1,11 bar, Komponenten mit 2,00 bar sowie die statische Höhe mit 0,14 bar berücksichtigt. In Summe ergibt das 3,93 bar. Mehr als die Hälfte des angenommenen Druckverlustes entfällt damit auf die Einbauten, allein 1 bar auf den Massenstrommesser. Der Massenstrommesser ist deshalb mit DN 25 eine Nennweite größer als die Leitung ausgeführt. Das ist bei Coriolis-Messern ein übliches Verfahren, um den Druckverlust zu senken, ohne auf die Messgröße zu verzichten. Darüber hinaus muss bei der Detailauslegung eine gründliche Prüfung des Druckverlustes und der Bauart der Komponenten erfolgen.

Es ergibt sich somit ein Mindest-Tankdruck von 38,43 bar. Die angesetzten 3 m Leitungslänge sind eine konservative Annahme, die durch die Anordnung im CAD-Modell bestätigt wurde. Auch die sechs Einzelwiderstände und die Datenblatt-Startwerte für die Komponenten sind konservative Annahmen. Sollte die Leitung vom Tank zum Triebwerk um einen Meter länger werden, steigt der Mindest-Tankdruck um etwa 0,23 bar. Mit den gewählten Komponenten und Längen würden bei einem gewählten Tankdruck von 39

bar 35,1 bar am Injektoreingang anliegen, was mit rund 17 Prozent im Steifigkeitsband eines üblichen Auslegungsfalls liegt.

Der oben genannte Werkstoff für den Tank gilt ebenso für den gesamten Medienpfad, also für alle Bauteile, die das HTP im Betrieb berühren oder berühren könnten. Hinzu kommen nicht metallische Werkstoffe wie PTFE für Dichtungen. Kupfer und Messing sowie die meisten Elastomere wirken als Zersetzungskatalysator und sind im HTP-Pfad unzulässig. Für die Werkstoffauswahl wird eine HTP-Konzentration bis 100 Prozent angenommen, für die fluidische Rechnung dagegen 90 Prozent (siehe Abschnitt 4.1).

Allein der Werkstoff reicht nicht aus, um ein Bauteil als geeignet für das Führen von HTP zu betrachten. Auch der Zustand der Oberfläche ist maßgeblich. Alle Bauteile sind demnach nach dem HTP-Reinigungsstandard vorzubereiten und zu passivieren, da Fettreste und metallischer Abrieb die Zersetzung katalysieren können. Die betriebliche Folge daraus ist, dass jeder Eingriff in den Pfad im Anschluss eine erneute Reinigung erfordert. Deswegen ist die Spülung so aufgebaut, dass sie ohne Öffnen des Medienpfades auskommt.

Der Tank ist über ein Sicherheitsventil gegen Überdruck gesichert. Dieses Ventil öffnet in den HTP-Sammelbehälter, da nichts in den Innenraum freigesetzt werden darf (F-208). Der Sammelbehälter ist drucklos und über einen eigenen Vent-Pfad nach außen entlüftet, er nimmt Gase und Flüssigkeiten gleichermaßen auf (siehe Abschnitt 6.4). Außerdem ist am Eingang E3 eine Rückschlagsicherung verbaut (siehe Abschnitt 6.3.6).

Die Zersetzung von HTP ist eine exotherme Reaktion. Das Medium heizt sich bei der Zersetzung weiter auf und beschleunigt diese damit selbst. Deshalb ist eine strikte Temperaturüberwachung am Tank Voraussetzung für den sicheren Betrieb des Prüfstands. Als Grenzwert werden 30 °C als Projektfestlegung angesetzt [7, 8]. Eine aktive Klimatisierung hält die Temperatur des HTP unter dieser Grenze, beschrieben in Abschnitt 5.6.

6.2 Treibstoffsystem (Mehrstofffähigkeit)

Die Auslegung des Treibstoffsystems erfolgt in ähnlicher Weise wie die des HTP-Systems. Aus diesem Grund werden hier nur die Abweichungen zur Auslegung des HTP-Systems erwähnt.

Die Tankgröße unterscheidet sich, da hier nur ein 50-Liter-Tank zum Einsatz kommt. Als Auslegungsdruck werden ebenfalls 40 bar angesetzt. Dies geschieht trotz der Verwendung von Propan. Propan wird als verflüssigtes Gas verwendet und bringt mit seinem Dampfdruck einen eigenen Lastfall mit. Dieser liegt jedoch unter dem Aufdruck von 39 bar, weswegen nach dem Betriebsdruck dimensioniert wird und nicht nach dem Dampfdruck. Die Auffangwanne des Tanks ist ebenfalls kleiner dimensioniert, erfüllt aber dieselben Anforderungen wie die Auffangwanne des HTP-Tanks. Sie hat ein Volumen von 58 Litern.

Anders als beim HTP-Strang sind beim Treibstoffstrang zwei getrennte Befüll- und Entleerstutzen zu finden. Es handelt sich dabei um einen Flüssigkeitsanschluss für Ethanol und Kerosin sowie einen Druckanschluss für Propan. Außerdem ist ein zusätzlicher Spüleintritt am Tank gegen die Strömungsrichtung vorgesehen, weil beim Treibstoffwechsel nicht nur der Medienpfad, sondern auch der Tank selbst inertisiert werden muss. Auch ein Niedrigpunkt-Drain am Tankboden ist vorzufinden, da Restmengen im Tank sonst mit dem darauffolgenden Treibstoff vermischt würden und dies zu verfälschten Testergebnissen führen würde. Das sind alles Folgen der Fähigkeit, mehrere Treibstoffe verwenden zu können.

Die Werkstoffe, die im Treibstoffstrang zum Einsatz kommen, müssen alle Treibstoffe abdecken, die potenziell verwendet werden. Kritisch sind hierbei Elastomere mit Ethanol und die Permeation bei Propan.

Auch die elektrostatische Ableitung muss bei der Detailauslegung beachtet werden. Beim Befüllen und beim Fließen von Kerosin und Ethanol bauen sich relevante Ladungsmengen auf. Der Pfad ist durchgängig leitfähig auszuführen und zu erden, um Funken in der explosionsgeschützten Umgebung zu vermeiden.

Der ideale Durchmesser des Treibstoffstrangs rechnet sich zu 11,23 mm. Gewählt wurde daraus die Normnennweite DN 10 mit einem Druckabfall von 2,55 bar. Der Mindest-

Tankdruck beläuft sich hierbei auf 37,05 bar. Damit ist der Aufdruck vom HTP-Pfad dimensioniert und nicht vom Treibstoffpfad.

Es ergibt sich ein Fenster für den Tankdruck mit einer Untergrenze von 38,43 bar aus dem HTP-Pfad und einer Obergrenze von 39 bar aus der Nennstufe PN 40. Die Fensterbreite beträgt somit nur 0,57 bar. Gewählt wurde 39 bar am oberen Ende. Dabei ist zu erwähnen, dass sich das Fenster bei rund 5,5 m Leitungslänge schließt und bei längeren Leitungen eine höhere Druckstufe gewählt werden müsste.

Das Fenster ist damit auf Konzeptebene vorhanden, aber schmal. Angesetzt ist dabei ein Ansprechdruck des Sicherheitsventils in Höhe der Nennstufe. In der Ausführung liegt der Betriebsdruck üblicherweise unterhalb des Ansprechdrucks, damit das Ventil im Normalbetrieb nicht anspricht. Ein solcher Abstand ist im vorliegenden Fenster nach unten nicht darstellbar, da die Untergrenze bereits bei 38,43 bar liegt. Die Abstimmung von Ansprech- und Betriebsdruck bleibt daher der Detailauslegung vorbehalten. Führt sie auf einen geringeren zulässigen Betriebsdruck, ist die nächsthöhere Nennstufe zu wählen. Die Folgen wären eine Anpassung der Wandstärken und der Komponentenauswahl im gesamten Aufdruckpfad, nicht jedoch eine Änderung der Architektur. Der Punkt ist in Abschnitt 12.2 als offener Punkt geführt.

6.3 Druckgasversorgung und Regelung

Der Druckgasstrang stellt für den Prüfstand das Gas bereit, mit dem die Tanks aufgedrückt werden und der Treibstoffpfad gespült wird. Dies ist nötig, damit der Prüfstand die nötige Leistung erbringen kann und dabei sicher bleibt. Zuerst wird die Funktion des Stranges erläutert und abgegrenzt, was der Strang nicht leistet. Dann wird die Wahl des Druckgases ausgeführt und anschließend der Aufbau des Stranges beschrieben. Es folgt die rechnerische Auslegung und Dimensionierung des Systems und der Komponenten in dem System. Abschließend wird das Sicherheits- und Überwachungssystem dargestellt.

6.3.1 Funktion und Abgrenzung

Der Druckgasstrang besteht im Kern aus zwei Teilen, die unterschiedliche Funktionen abdecken. Einerseits wird das Druckgassystem verwendet, um den nötigen Aufdruck in den Tanks für HTP und Treibstoff zu erzeugen. Zusätzlich wird das Druckgas verwendet, um die Spülung und Inertisierung des Treibstoffpfads durchzuführen. Die beiden Funktionen erfordern zwei verschiedene Druckstufen. Zum Aufdrücken der Tanks werden 39 bar benötigt (F-241, siehe Tabelle A.2) und zum Spülen 10 bis 20 bar, wobei der Feinwert aus der Spülprozedur folgt (siehe Abschnitt 6.4).

Um diesen Druckunterschied gewährleisten zu können, sind zwei strikt voneinander getrennte Pfade zu benutzen (F-247). Diese Trennung ist nötig, weil die Spülung des Treibstoffpfads und der Aufdruck des HTP-Tanks bei einem gemeinsamen Regelpfad hinter denselben Ventilen liegen. Fällt eines dieser Ventile aus, sind der HTP- und der Treibstoffstrang über den Druckgasstrang verbunden. Dies ist unter allen Umständen auszuschließen (F-207). Deswegen findet die Trennung statt.

Der Strang beginnt an der Schnittstelle S1 an der Containeraußenwand (siehe Tabelle 5.1). Hier wird entweder der Schlauch von der Flaschenbatterie auf dem Zugfahrzeug oder ein Schlauch von einer möglichen anderen Quelle angeschlossen, die von dem Standort kommt, an dem sich der Prüfstand gerade befindet. Der Strang endet mit vier Ausgängen, die die verschiedenen Funktionen des Druckgases erfüllen: Aufdruck HTP-Tank, Aufdruck Treibstofftank, Spülen des Treibstoffhauptpfades und Spülen des Treibstofftanks (siehe Anhang A.17).

Die pneumatische Aktorik wird nicht von diesem Druckgasstrang betätigt. Hierfür ist ein separates Druckluftsystem vorgesehen (siehe Abschnitt 6.5). Auch die Spülung des HTP-Pfads gehört nicht zu dem Druckgasstrang, diese wird über ein separates Spülwassersystem durchgeführt. Dies wird in Abschnitt 6.4 beschrieben.

Die Spülung des Treibstoffstrangs wird hier beschrieben, da sie zu dem Druckgassystem gehört und nicht in den Abschnitt 6.4. Dies ist damit zu begründen, dass für die Bedarfsrechnung der Druckgasmenge alle Verbraucher dieses Druckgases zusammengefasst werden müssen. Eine Aufteilung auf zwei Kapitel würde die Rechnung unübersichtlich machen. Deswegen wird hier alles gesammelt.

6.3.2 Wahl des Druckgases

Für das Druckgassystem kommt gasförmiger Stickstoff zum Einsatz. Zu begründen ist dies mit dem Ausschlussverfahren.

Druckluft ist nicht geeignet, da es durch den Sauerstoffanteil in der Luft beim Treibstoff zu entzündlichen Mischungen kommen könnte. Auch in Bezug auf das HTP bietet Druckluft ungeeignete Eigenschaften, sie bringt Feuchtigkeit, Öl und Verunreinigungen mit sich, die zur Zersetzung von HTP führen würden [9].

Grundsätzlich geeignet wäre auch Helium, es erfüllt alle technischen Voraussetzungen und ist in der Raumfahrttechnik auch weit verbreitet für diese Zwecke [4]. Jedoch unterliegt es Stickstoff in der Verfügbarkeit und den Beschaffungskosten. Helium ist nach eigener Beschaffungsabschätzung teurer und schwieriger zu beschaffen als Stickstoff.

Der Vorteil des geringeren Gewichts von Helium ist in diesem Anwendungsfall hinfällig, weil das Druckgas lediglich in dem Zugfahrzeug in Gasflaschen transportiert wird und es dabei nicht auf den Gewichtsunterschied ankommt.

Stickstoff hingegen ist weit verbreitet verfügbar in Gasflaschen, günstiger als Helium und gefahrlos verträglich mit allen Treibstoffen, die möglicherweise in dem Prüfstand verwendet werden, sowie mit HTP [9].

Bestätigt wird die Wahl von Stickstoff als Druckgas von vergleichbaren Prüfständen, die ebenfalls Stickstoff als Druckgas verwenden [4, 6]. Die Wahl von Stickstoff als Druckgas hat über die spezifische Gaskonstante und die Realgasfaktoren weitreichende Konsequenzen für die Berechnung und Auslegung der Leitungssysteme.

6.3.3 Aufdruck- und Blowdown-Verfahren

Es gibt grundsätzlich zwei Regelungsprinzipien, nach denen Tanksysteme in der Raketentriebwerkstechnik unter Druck gesetzt werden können: Es gibt grundsätzlich zwei Regelungsprinzipien, nach denen Tanksysteme in der Raketentriebwerkstechnik unter Druck gesetzt werden können: das Aufdruckverfahren mit nachgeführtem Druckgas und das Blowdown-Verfahren, bei dem sich ein vorgelegtes Gaspolster über den Test

entspannt. Dabei fällt der Druck der Medien in den Tanks ab. Im Kontrast dazu wird bei dem Aufdruckprinzip bei sinkendem Füllstand dauerhaft mehr Gas in die Tanks gedrückt, sodass der Druck in den Tanks immer gleich bleibt.

Bei diesem Prüfstand wie auch bei vergleichbaren Prüfständen wurde das Aufdruckprinzip gewählt [4, 6]. Das hat den Grund, dass das Blowdown-Verfahren nicht tragbar für Tests ist, bei denen es darauf ankommt, ein Triebwerk zu vermessen und die Eigenschaften dessen herauszufinden. Wenn sich über die Brenndauer wie beim Blowdown-Verfahren der Massenstrom, Schub und das Mischungsverhältnis ändern, können keine unabhängigen Messwerte aufgezeichnet werden. Deswegen ist das Aufdruckprinzip bei Prüfständen dem Blowdown-Verfahren überlegen.

Beim Envelope-Auslegungspunkt von 5 kN Schub des Triebwerks bleiben nur rund 0,7 bar Auslegungsfenster für den Tankdruck (siehe Tabelle A.2), dies könnte kein Blowdown-Verfahren gewährleisten. Das festigt die Entscheidung für das Aufdrucksystem.

Konsequenz aus dieser Entscheidung ist, dass mehr Gas benötigt wird, da es gebraucht wird, um den gleichbleibenden Druck in den leer werdenden Tanks zu gewährleisten. Gas im Volumen von dem verbrauchten Medium wird benötigt. Außerdem wird eine zusätzliche Regelstufe benötigt, die dafür sorgt, dass der Druck in den Tanks während des Tests gleich bleibt.

6.3.4 Aufbau der Druckkaskade

Der Gasdruckstrang ist in drei Druckstufen unterteilt, wobei die letzte wiederum in zwei verschiedene Drücke unterteilt ist. Von hohem Druck zu niedrigem Druck fängt der Strang bei der Stufe 0 an, der Hochdruckstufe. Hierbei handelt es sich um die 200 bar Druck aus den Gasflaschen der Flaschenbatterie. Stufe 1 ist der Zwischendruck von 60 bar hinter dem ersten Druckminderer. Auf dieser Stufe wird der Strang in zwei Stränge aufgeteilt und wiederum auf 39 bar für den Aufdruck und 10 bis 20 bar für die Spülung reduziert. Tabelle 6.1 zeigt die drei Druckstufen mit dem jeweiligen Druckniveau, den zugehörigen Komponenten, der Funktion der Stufe und ihrer Lage im System.

Die Zwischenstufe wird eingesetzt, um für ein gleichmäßiges Druckniveau für den Aufdruck zu sorgen. Durch Entleeren der Gasflaschen reduziert sich der Druck in

Tabelle 6.1: Druckstufen des Gasdruckstrangs mit Komponenten, Funktion und Lage. Quelle: R&I-Fließbild (siehe Anhang A.17)

Stufe	Druck	Komponenten	Funktion	Lage
0	bis 200 bar	Flaschenbatterie, Flaschenventile, Sammelmanifold, erste Druckminderstufe	Vorrat des Druckgases und erste Reduzierung	GSE auf dem Zugfahrzeug
1	60 bar	Umbilical DN 12, Schnittstelle S1, Absperrventile für Flaschenbatterie und Standortversorgung, Zwischendruckverteiler	Gleichmäßiges Druckniveau für die zweite Stufe, Aufteilung in Aufdruck und Spülung, Einspeisepunkt einer Standortversorgung	Umbilical und Tankzone
2a	39 bar	Zweite Druckminderstufe Aufdruck, Aufdruckventile, Rückschlagventile, Sicherheitsventile	Aufdrücken der Tanks auf den Tankdruck	Tankzone
2b	10 bis 20 bar	Zweite Druckminderstufe Spülung, Spülventile	Spülung des Treibstoffstrangs	Tankzone

Kein Bauteil im Container ist für mehr als den Zwischendruck auszulegen. Das Risiko des hohen Drucks bleibt damit auf Flaschenbatterie und erste Druckminderstufe begrenzt, die beide außerhalb des Containers liegen. Der Zwischendruck macht das Konzept zugleich unabhängig davon, mit welchem Druckniveau das Gas bereitgestellt wird.

den Flaschen, dadurch wandert auch der Druck der nachfolgenden Stufe ein wenig. Wird direkt mit dem ersten Druckminderer der Druck für den Aufdruck erzeugt, wandert dieser während des Entleerens der Flasche. Wird jedoch ein Zwischendruck zwischengeschaltet, bekommt der Druckminderer, der den Aufdruck erzeugt, einen wesentlich gleichmäßigeren Druckverlauf über das Entleeren der Flasche, weil ein anderer Druckminderer bereits für einen gleichmäßigeren Zwischendruck sorgt.

Die Integration eines Zwischendrucks ermöglicht ebenfalls die Anbindung einer separaten Zuleitung von Stickstoff, die nicht von der Flaschenbatterie kommt. Durch die Gegebenheiten am Aufstellort des Prüfstandes kann es möglich sein, dass eine andere Möglichkeit besteht, den Prüfstand mit Stickstoff zu versorgen. Der Druck, mit dem das Medium bereitgestellt wird, variiert jedoch. Die Zwischendruckstufe sorgt dafür, dass immer ein gleichmäßiger Druck für den Druckminderer zur Verfügung steht, der den Aufdruck erzeugt.

In der Zwischendruckstufe sitzt der Zwischendruckverteiler, der den Strang in zwei Stränge aufteilt. Dadurch ist wie oben beschrieben die Trennung von Spülung und Aufdruck möglich.

Der Zwischendruck ist auf 60 bar festgelegt. Hierdurch wird bestimmt, wie weit sich die Flaschen entleeren lassen, bevor sie ausgetauscht werden müssen. Gleicht sich der Druck aus der Flasche dem Zwischendruck an, strömt kein Gas mehr nach. Der Zahlenwert von 60 bar ist in Abschnitt 6.3.5 begründet.

Hinzu kommt, dass durch Einführung des Zwischendrucks kein Bauteil im Container selber für mehr als den Zwischendruck ausgelegt sein muss. Damit liegt das Sicherheitsrisiko, das hoher Druck mit sich bringt, nicht im Prüfstand selbst, sondern bleibt auf die Flaschenbatterie und die erste Druckminderstufe begrenzt. Zusätzlich erzeugt dies eine Unabhängigkeit von dem bereitgestellten Druck. Wird die Flaschendruckstufe gewechselt oder am Standort eine Versorgung mit anderem Druckniveau angeschlossen, ändert sich an der Auslegung im Container nichts.

Der Sollwert des Druckminderers für den Aufdruck entspricht mit 39 bar dem Tankdruck, da der Druckverlust der kurzen Aufdruckleitung gasseitig vernachlässigbar ist. Zusammen mit einer Marge von 5 bar, die der Druckminderer als Mindestvordruck benötigt, ergibt sich ein erforderlicher Vordruck von 44 bar. Der Zwischendruck von 60

bar liegt darüber, die Kaskade ist damit druckmäßig durchgängig (siehe Tabelle A.2 im Anhang).

Um das nötige Druckgas bereitzustellen, werden im Normalfall Gasflaschen mit Stickstoff auf dem Zugfahrzeug mitgeführt. Diese haben einen internen Druck von 200 bar. In der Regelbestückung werden vier dieser Flaschen mitgeführt, optional können bis zu sechs mitgeführt werden. Hierdurch entstehen mehrere Quellen, die zusammengeführt werden müssen, um gemeinsam den Druckgasstrang einspeisen zu können.

Eine Möglichkeit wäre, die Flaschen über ein Hochdruck-Sammelmanifold zusammenzuschließen, das auf 200 bar die einzelnen Stränge der Flaschen zusammenführt. Dadurch würde nur ein Druckminderer benötigt werden, der den Druck von 200 bar auf den Zwischendruck von 60 bar senkt. Auf diese Weise wurde bei vergleichbaren Prüfständen [4, 6] die Druckgasversorgung mittels Gasflaschen gelöst.

Gewählt wurde jedoch eine andere Lösung. Der Hochdruckstrang wird so kurz wie möglich gehalten, damit wird direkt an jeder Gasflasche ein separater Druckminderer angeschlossen, der den Zwischendruck von 60 bar erzeugt. So beschränkt sich der Hochdruckstrang von 200 bar auf wenige Zentimeter zwischen Gasflasche und direkt dahinter sitzendem Druckminderer. Durch das drastische Verkürzen des Hochdruckstranges werden potenzielle Orte des Versagens reduziert, bei denen ein Versagen gravierendere Folgen hätte als im Zwischendruckstrang. Denn je höher der Druck des Gases ist, desto mehr Energie trägt es in sich und desto größer ist die Zerstörungskraft, die bei einem Versagen frei wird.

Die Stränge werden anschließend in einem Sammelmanifold kombiniert, der sich ebenfalls an der Flaschenbatterie befindet. Von dem Sammelmanifold führt dann eine Leitung zu dem Prüfstand, um diesen mit Druckgas zu versorgen.

Dadurch werden mehrere Druckminderer benötigt, diese müssen beschafft werden und erhöhen die gesamte Anzahl und Komplexität sowie den Wartungsaufwand des Aufbaus. Jedoch sind diese Druckminderer, die direkt an der Flasche sitzen, Standardteile und müssen auch nicht besonders präzise den Ausgangsdruck halten können, dieser wird durch die Mehrstufigkeit des Systems ein zweites Mal geregelt. Die Mehrkosten für eine erhöhte Anzahl an Druckminderern werden hierdurch relativiert. Die Auslegung der Stufe auf Basis der Durchflussmenge wird in Abschnitt 6.3.5 durchgeführt.

Sowohl die Leitung von der Flaschenbatterie aus dem Zugfahrzeug als auch die optionale Leitung von einer Versorgung des Standortes, an dem der Prüfstand zum gegenwärtigen Zeitpunkt steht, werden an der Schnittstelle S1 angeschlossen. Eine parallele Versorgung ist nicht vorgesehen.

Die Leitung von der Flaschenbatterie im Zugfahrzeug überbrückt den Abstand von Zugfahrzeug zu Prüfstand und ist beim Aufbau am Einsatzort die einzige lösbare Verbindung, die Gas führt. Die Auslegung nach Nennweite und Länge erfolgt in Abschnitt 6.3.5.

Wird die Standortversorgung gewählt, um den Prüfstand mit Druckgas zu versorgen, so wird ein zusätzlicher Druckminderer benötigt, um das Druckniveau der Versorgung auf das der Zwischenstufe anzupassen. Zudem muss sich eine Absperreinrichtung an der Standortversorgung befinden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass kein abgeschlossener Abschnitt entsteht, daher muss die Absperreinrichtung vor dem Druckminderer sitzen. Diese Bauteile gehören zu dem mitgeführten Equipment und werden je nach Standort und dessen Druckniveau mitgeführt, sie gehören nicht zu den Bauteilen des Prüfstands an sich. Der Grund dafür ist, dass alles, was vom Standort abhängt, auf der Seite liegen muss, die ohnehin für jede Kampagne neu zusammengestellt wird. Läge die Anpassung im Container, müsste dieser für das ungünstigste denkbare Druckniveau ausgelegt werden, und die Unabhängigkeit von der bereitgestellten Druckstufe wäre wieder verloren.

6.3.5 Auslegung

Für die Auslegung des Druckgassystems, insbesondere das benötigte Gasbudget und damit die Anzahl der benötigten Gasflaschen, wurden die folgenden Rechnungen angestellt. Die Rechnungen beginnen mit dem Bedarf an Gasvolumen und schlüsseln dann das Angebot und das Ergebnis auf.

Für einen Triebwerkstest wird die Menge an Gas benötigt, die sich aus dem verdrängten Flüssigkeitsvolumen des HTP und Treibstoff sowie dem Gaspolster im Tank über den Medien bei dem nötigen Tankdruck ergibt. Es werden 125,32 L Stickstoff bei 39 bar für einen Envelope-Test benötigt, das entspricht 5,62 kg Stickstoff (siehe Tabelle A.3 im Anhang).

Zusätzlich zu dem für den Aufdruck benötigten Druckgas wird dasselbe Gas für die Spülung des Treibstoffstrangs verwendet. Hierbei wird ein Spüldruck von 15 bar angenommen und ein Leitungsvolumen von zwei Litern. Dabei wird von zehn Spülzyklen ausgegangen. Es ergibt sich ein Bedarf von 0,345 kg Stickstoff für die Spülung des Treibstoffstrangs. Dieser Bedarf entsteht nur am Ende einer Kampagne, nicht aber zwischen Tests mit dem gleichen Treibstoff.

Der Anteil der Spülung am Gesamtbedarf pro Test beziehungsweise pro Kampagne ist klein, er darf bei der Berechnung jedoch nicht vernachlässigt werden. Die Summe aus Aufdruckbedarf und Spülbedarf ergibt sich zu 5,97 kg.

Hinzu kommt ein Sicherheitsfaktor. Dieser wird aus mehreren Gründen aufgeschlagen und dient dazu, mögliche Abweichungen bei dem tatsächlichen Bedarf zu decken. Mögliche Abweichungen beinhalten Restgas in den Leitungen, Verluste beim An- und Abkoppeln, Unsicherheiten in den angesetzten Tankvolumina, Abweichungen der Stoffdaten sowie Temperaturschwankungen. Aus diesen Gründen wird ein pauschaler Sicherheitsfaktor von 2 aufgeschlagen. Damit ergibt sich nach dem Sicherheitsaufschlag ein Bedarf von 11,93 kg (siehe Tabelle A.4 im Anhang). Bei dem Bedarf für die Spülung handelt es sich um einen bekannten Verbrauchsposten und nicht um eine Unsicherheit. Der Sicherheitsfaktor deckt Abweichungen von den Schätzungen ab, er ist jedoch nicht für die Kompensierung eines weggelassenen Postens vorgesehen.

Eine Gasflasche des gewählten Druckgases beinhaltet 50 Liter bei 200 bar, somit 10,85 kg Stickstoff. Dabei wurde eine Realgaskorrektur mit Z gleich 1,06 bei 200 bar und 25 °C [14] vorgenommen, da bei diesem Druck die Idealgasnäherung nicht mehr trägt.

Die 200-bar-Variante wurde der 300-bar-Variante vorgezogen, da sie nach eigener Beschaffungsabschätzung breiter verfügbar und günstiger ist und der Mehrinhalt der 300-bar-Flasche aufgrund des verbleibenden Gases keinen maßgeblichen Mehrwert bietet.

Nähert sich der Druck in der Flasche nun dem des Zwischendrucks von 60 bar, bleiben noch 3,45 kg in der Flasche zurück, mit einem Realgasfaktor von rund 1,00 bei 60 bar und 25 °C [14]. Dieses Gas ist nicht nutzbar, da es nicht aus der Flasche strömen kann, weil der Druckabfall von Gasflasche zu Zwischendruck zu klein wird, um ausreichend Strömung zu erzeugen. Deswegen handelt es sich hierbei um Verlust und nicht um eine

Reserve. Es bleibt eine nutzbare Menge von 7,40 kg des Flascheninhalts zur Verfügung. Das sind 69 Prozent des gesamten Flascheninhalts.

Bei einem Flaschendruck von 60 bar entsteht keine Strömung mehr, die den Zwischen-
druck des Stranges halten würde. Der praktisch erreichbare Enddruck liegt damit über
60 bar und hängt vom Kv-Wert der ersten Druckminderstufe ab. Bei einem angenom-
menen Kv-Wert von 0,4, also einem Enddruck der Flaschen von 62 bar, verändert sich
die nutzbare Menge je Flasche von 7,40 kg auf 7,29 kg. Die Mindestanzahl und die
Kampagnenreichweite bleiben davon unberührt, bei zwei Flaschen Mindestanzahl und
fünf Tests bei vier Flaschen. Die Differenz betrifft nur den Spitzendurchfluss während
eines Tests, für das langsame Aufdrücken im Pre-Test (Testvorlauf) ist das Gas bis 60
bar nutzbar.

Die Realgaskorrektur ist nur nötig bei dem Hochdruckstrang beziehungsweise bei der
Mengenberechnung des verfügbaren Druckgases in den Gasflaschen. Bei den niedrige-
ren Drücken können die Berechnungen nach dem idealen Gasgesetz vorgenommen
werden.

Nun kann der Bedarf gegen das Angebot verglichen werden. Der Bedarf für einen
Envelope-Test inklusive Spülung und Sicherheitsfaktor beträgt 11,93 kg Gas. Eine
Flasche kann 7,40 kg Gas zur Verfügung stellen. Rechnerisch würden 1,6 Gasflaschen
diesen Bedarf decken. Somit müssen für einen Envelope-Test zwei Gasflaschen zur
Verfügung gestellt werden.

Bei einer Kampagne mit mehreren Envelope-Tests wird nun die maximale Anzahl
der möglichen Tests ermittelt. Die Regelbestückung sieht vier Gasflaschen vor. Damit
stehen 29,60 kg Gas zur Verfügung. Davon wird die Gasmenge abgezogen, die für
die Spülung benötigt wird, da diese einmal am Ende der Kampagne benötigt wird.
Es bleiben 29,26 kg für das Aufdrücken übrig. Abgerundet können somit fünf Tests
nach Envelope-Spezifikation bei einer Regelbestückung von vier Flaschen durchgeführt
werden.

Bei der Ermittlung der maximalen Anzahl an Envelope-Tests wurde kein Sicherheitsfak-
tor aufgeschlagen, da es sich hierbei um einen Kennwert der Wirtschaftlichkeit handelt
und nicht der Sicherheit. Sollte bei den Tests mehr Gas als berechnet verbraucht werden,
reduziert sich die Anzahl der Tests ohne Flaschenwechsel. Ein Test muss aber nicht
aufgrund von unzureichendem Gas abgebrochen werden.

Die Spülung wurde an dieser Stelle in die Bedarfsrechnung inkludiert, obwohl sie nicht zwingend nach jedem Test durchgeführt wird, es handelt sich um eine konservative Annahme.

Vier Flaschen wurden als Regelbestückung gewählt, um fünf Tests je Kampagne ohne Flaschenwechsel zu ermöglichen, während zwei Flaschen die Mindestanzahl abdecken. Das Transportgestell umfasst sechs Stellplätze, bei Bedarf kann somit die Anzahl der Tests weiter erhöht werden.

Während eines Tests muss das Druckgas so schnell in die Tanks nachfließen können, wie die Medien verbraucht werden. Nur so kann der Druck in den Tanks konstant gehalten werden. Der Durchfluss des Druckgases ist somit über den Massenstrom des zu testenden Triebwerks bestimmt.

Durch parametrisch berechnete Werte für das Triebwerk ergibt sich ein Volumenstrom von 109,32 Litern in 60 Sekunden, somit 1,8 Liter pro Sekunde (siehe Tabelle A.5 im Anhang). Bei 39 bar Tankdruck und einer Temperatur von 20 Grad Celsius liegt die Dichte von Stickstoff bei 44,85 kg/m³. Daraus ergibt sich ein Massenstrom von 0,0817 kg/s Stickstoff, der nachfließen muss, um den Tankdruck zu halten. Umgerechnet in Normbedingungen ergibt sich ein Durchfluss von 235,3 Nm³/h.

Hierbei zählt nur das während des Tests nachfließende Gas, das das Volumen einnehmen muss, welches durch die verbrauchten Medien HTP und Treibstoff entsteht. Das Ullage-Volumen fließt nicht in die Rechnung mit ein, da dieses im Vorfeld langsam im Zustand Pre-Test aufgedrückt wird. Hierbei sind die benötigten Durchflussmengen in jedem Fall geringer als bei dem Test selbst, da für diesen Prozess keine zeitliche Begrenzung besteht. Die Geschwindigkeit des Aufdrückens kann somit an den Durchfluss angepasst werden.

Der Durchfluss teilt sich bei einem Envelope-Test auf zwei Gasflaschen auf. Das Druckgas muss von zwei Flaschen gleichzeitig bereitgestellt werden, um in jedem Fall die nötige Durchflussmenge bereitstellen zu können. Dies ergibt sich aus der Kv-Rechnung für die erste Druckminderstufe (siehe Tabelle A.6 im Anhang). Im Endzustand, also wenn die Gasflasche annähernd leer ist, könnte sie allein nicht die nötige Durchflussmenge bereitstellen.

Die Leitung zwischen Flaschenbatterie und der Schnittstelle S1 an der Containerwand führt das Zwischendruckniveau von 60 bar. Angesetzt sind 15 Meter Leitung mit der

Nennweite DN 12, was einem Innendurchmesser von 12 mm entspricht. Es ergibt sich ein Druckverlust von 1,03 bar für die Schlauchleitung bei einem Durchfluss, der bei einem Envelope-Test zu erwarten ist. Die Strömungsgeschwindigkeit liegt mit 10,7 m/s deutlich unter der als Auslegungsgrenze angesetzten Obergrenze von 30 m/s. Erosion und Geräuschentwicklung sind damit nicht auslegungsbestimmend.

Gerechnet wurden der Druckabfall und die Strömung mit der Annahme von inkompressibler Strömung. Als Grenze wurde ein Druckabfall von 10 Prozent angesetzt. In diesem Fall liegt der Druckabfall der Schlauchleitung bei 1,7 Prozent des Zwischendrucks.

In der Tabelle 6.2 sind die Druckverluste für Schlauchleitungen verschiedener Innendurchmesser aufgelistet. Die Werte wurden alle nach demselben Verfahren ermittelt wie der oben genannte Druckverlust für DN 12. Die im Handel übliche Innendurchmessergröße von DN 6 ist für den Spitzendurchfluss bei einem Envelope-Test unbrauchbar. DN 12 wurde gewählt, da diese im Gegensatz zu DN 16 noch eine handhabbare Größe ist und der Druckabfall vertretbar ist und nicht den Rahmen der Marge sprengt.

Tabelle 6.2: Druckverluste für Schlauchleitungen verschiedener Innendurchmesser. Quelle: TERRA_Druckverlust_V3.xlsx

Innendurchmesser	Strömungsgeschwindigkeit	Reynolds-Zahl	Rohrreibungsbeiwert	Druckverlust
mm	m/s	–	–	bar
6	42,7	937 278	0,0251	38,76
8	24,0	702 959	0,0234	8,57
10	15,4	562 367	0,0222	2,67
12	10,7	468 639	0,0214	1,03
16	6,0	351 479	0,0203	0,23
20	3,8	281 184	0,0197	0,07

Gerechnet für 15 m Leitungslänge bei 60 bar Zwischendruck und dem Spitzendurchfluss eines Envelope-Tests. Die Werte der Spalte Innendurchmesser entsprechen den Nennweiten der Hochdruck-Schlauchreihe, 12 mm also der Nennweite DN 12. Die hervorgehobene Zeile ist die gewählte Nennweite. Der Druckverlust skaliert etwa mit $1/d^5$. Die Rechnung setzt inkompressible Strömung an und ist zulässig, solange der Druckverlust unter 10 % des Vordrucks bleibt.

Eine Länge von 15 Metern Schlauchleitung ist eine Annahme, die bei Bedarf geändert werden kann. Die Länge ist abhängig von den Gegebenheiten am Standort des Prüfstandes.

Der Zwischendruck fällt auf der Strecke bis zu der zweiten Regelstufe ab. Ein Druckabfall wird durch die Schlauchleitung erzeugt, wie eben berechnet. Andere Druckabfälle wer-

den durch Filter, Ventile und andere Komponenten erzeugt. Um den nötigen Tankdruck erzeugen zu können, müssen mindestens 44 bar an der zweiten Regelstufe anliegen. Das folgt aus dem Tankdruck von 39 bar mit 5 bar Marge. Der Zwischendruck von 60 bar fällt über die gesamte Strecke um circa 1,73 bar ab, es bleiben also etwa 58,27 bar Druck vor der zweiten Regelstufe. Damit wird die Anforderung von 44 bar um 14,27 bar überschritten (siehe Tabelle A.5 im Anhang).

Ein Effekt wurde bislang nicht in den Rechnungen berücksichtigt, der Droop der Druckminderer. Die 14,27 bar Überschuss vor der zweiten Druckstufe sind somit als Obergrenze zu betrachten und senken sich gegebenenfalls, wenn der Droop der Druckminderer bei hohen Durchflussmengen hinzukommt. Der Zwischendruck wurde aus diesem Grund konservativ auf 60 bar gesetzt.

Offen ist, ob die Druckhaltung rein mechanisch über Druckminderer erfolgt oder aktiv geregelt über einen Regelkreis aus Drucksensor, Steuerung und Stellglied. Die Entscheidung wirkt sich auf die Regelgüte, den Droop der Regelstufen und die Auslegung des Zwischendrucks aus. Sie ist in Abschnitt 12.2 als offener Punkt geführt.

6.3.6 Sicherheits- und Überwachungskonzept

Die Druckgasleitung wird gegen Überdruck abgesichert, um zu vermeiden, dass zu große Drücke in dem System entstehen und hierdurch ein Sicherheitsrisiko entsteht. Eine Druckerhöhung über das normale Niveau kann aus verschiedenen Gründen entstehen, zum Beispiel durch Temperaturänderungen, Bedienerfehler oder weitere Defekte und Fehler.

Das System wird je absperrbarem Abschnitt gegen Überdruck gesichert. So wird vermieden, dass in einem Abschnitt, der im Zweifel vom restlichen System abgeschnitten ist, ein solcher Überdruck entsteht. Eine Ausnahme bildet ein Abschnitt, in dem im abgesperrten Zustand keine Druckquelle mehr vorhanden ist.

Der absperrbare Abschnitt vom Absperrventil bis zum pneumatischen Ventil, zwischen denen sich nur ein kurzes Stück Leitung und der Filter befindet, verfügt über kein separates Überdruckventil, da hier im abgesperrten Fall keine externen Quellen für eine Druckerhöhung vorliegen.

An den Flaschen selber besteht durch das Entnahmeventil eine Sicherheitsvorrichtung, diese besitzen eine Berstscheibe, die im Überdruckfall den Druck ablässt.

Durch den Druckgasstrang werden die beiden Medienpfade von HTP und Treibstoff verbunden, da beide Tanks aus demselben System den nötigen Aufdruck zur Verfügung gestellt bekommen. Hier entsteht ein kritischer Punkt für die nötige Trennung der beiden Medien, die zusammen ein hochentzündliches Gemisch bilden, das sich auch ohne Zündquelle entzünden kann. Das Risiko besteht in der Rückströmung eines der Medien in den Pfad des Druckgases und dem Erreichen des anderen Tanks.

Um dieses Risiko zu beschränken, kommen Rückschlagsicherungen zum Einsatz, auf beiden Seiten des Stranges, also sowohl zum HTP- als auch zum Treibstoffpfad. Jeweils zwei pro Strang, eine am Tank selbst und eine am Verteiler. Damit ergibt sich eine Redundanz, sodass selbst dann, wenn eine der Rückschlagsicherungen im Fehlerfall nicht auslöst, das System weiterhin durch die andere Rückschlagsicherung abgesichert wird.

Eine Redundanz kommt hier zum Einsatz, da der mögliche Fehlerfall sehr gravierende Folgen hat, wie bereits beschrieben. Es muss somit unter allen Umständen sichergestellt werden, dass die beiden Medien strikt voneinander getrennt werden, auch wenn ein Bauteil versagt.

Im Spülpfad sind hinter dem Verteiler keine Rückschlagsicherungen vorgesehen. Die nötige Trennung zwischen HTP- und Treibstoffstrang erfolgt über die Absperrventile am Spüleintritt in den Treibstoffstrang. Ob an dieser Stelle zusätzlich einzelfehlertolerant abgesichert werden muss, ist Gegenstand der Detailauslegung und wird nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 hier nicht betrachtet. Das Ergebnis ist ohne Rückwirkung auf die Architektur des Konzepts (siehe Abschnitt 12.2).

Der Druckgasstrang sieht eine Vielzahl von Instrumenten zur Bestimmung und Beobachtung der verschiedenen Druckniveaus in dem System vor. Hierbei wird zwischen digitalen Drucksensoren und Manometern unterschieden. Die digitalen Drucksensoren werden an das Steuersystem des Prüfstandes angeschlossen, während die Manometer manuell von dem Personal des Prüfstandes abgelesen werden. Die Drucksensoren stellen die nötigen Druckinformationen über das System zur Verfügung, wenn die Zone evakuiert ist und sich kein Personal mehr am Prüfstand selber befindet.

Der Zweck der Manometer ist das unabhängige Prüfen der Drücke in dem System. Es werden beispielsweise auch Manometer an den Tanks platziert. Hier wird im Regelfall kein Druckwert im Betrieb abgelesen, da der Bediener nur Zugang zum Container hat, wenn die Tanks drucklos sind. Dieses Manometer dient rein zur Überprüfung, ob die Tanks tatsächlich drucklos sind. Die Manometer funktionieren ohne Strom und können selbst bei Stromausfall zuverlässig weiterhin den Druck des Systems messen.

An jeder Flasche befindet sich ein Manometer, um den Füllstand ermitteln zu können. Ein digitaler Drucksensor ist nicht zur Bestimmung und Überprüfung des Flaschendrucks vorgesehen. Ein digitaler Drucksensor an jeder Flasche würde zusätzliche Kabel zum Prüfstand bedeuten und auch eine weitere Stelle, an der eine Störung im System entstehen könnte. Deswegen wurde hiervon abgesehen. Der Flaschenfüllstand muss manuell vor jedem Test beziehungsweise vor jeder Kampagne überprüft und mit dem Bedarf abgeglichen werden, um zu vermeiden, dass nicht genügend Druckgas während des Tests oder der Kampagne zur Verfügung steht.

6.4 Spül-, Befüll- und Entleerkonzepte

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Aufgaben belaufen sich auf das Spülen, Befüllen und Entleeren des Systems sowie das Sammeln und Entsorgen der Medien. Sie werden gemeinsam in diesem Abschnitt dargestellt statt einzeln in den Medienpfaden, da ein Großteil dieser Aufgaben gemeinsam gefasst ist und analog zu beiden Pfaden abläuft. Lediglich das Spülen unterscheidet sich zwischen HTP- und Treibstoffpfad. Der HTP-Pfad wird mit Wasser gespült, der Treibstoffpfad mit Stickstoff (siehe Abschnitt 6.3). Nicht Teil dieses Abschnitts sind das Löschwasser und die Notdusche, diese werden in Kapitel 11 beschrieben.

Als Quelle für das Spülwasser dient ein externer Frischwasseranschluss mit kommunalem Druck. Ein Rückflussverhinderer der Kategorie 5 trennt das System vom Trinkwassernetz. Eine Aufbereitung ist nötig, da Chlorid und metallische Spuren aus dem Wasser entfernt werden müssen, um eine Zersetzungskatalyse des HTP zu vermeiden. Der zulässige Chloridgehalt liegt um mehr als eine Größenordnung unter den 250 mg/l, die Trinkwasser enthalten darf [7]. Der Zahlenwert ist vor der Auslegung

der Aufbereitungsstufe zu bestätigen (siehe Abschnitt 12.2). Zum Einsatz kommt eine Mischbettharz-Patrone, die das Spülwasser vor der Verwendung aufbereitet.

Verbaut ist ein Tank mit 50 Litern Volumen, der drucklos in der Tankzone steht. Die Spülung erfolgt immer aus dem Tank, die externe Quelle wird nur zum Auffüllen benutzt. Dadurch entsteht Unabhängigkeit vom Druckniveau der externen Versorgung. Die Druckerhöhung, die das Spülwasser in das System befördert, erfolgt durch eine elektrische Pumpe. Diese ist vorerst als Kreispumpe angenommen und in der Technikzone aufgestellt, da von ihr eine in der Ex-Zone nicht zulässige Zündquelle ausgeht. Ein offener Punkt, der bei der Detailauslegung zu prüfen ist, ist der Metalleintrag der Pumpe in das aufbereitete Wasser (siehe Abschnitt 12.2). Ein Überströmventil leitet das nicht benötigte Spülwasser zurück in den Tank und nicht in den Sammelbehälter.

Gespült wird der HTP-Strang zwischen TIV und Injektor. Dabei wird das TIV geschlossen und das MRV geöffnet. Ein Pfadvolumen von etwa 2 Litern muss gespült werden. Die Tankinnenspülung ist Teil der Wartung und nicht Teil des Testzyklus. Die Spülung erfolgt vor und nach jedem Testlauf sowie vor dem Transport des Prüfstands. Ebenfalls zu prüfen ist an dieser Stelle ein mit Stickstoff durchgeführter Trocknungsschritt, der das Restwasser aus dem System bläst, um das hochkonzentrierte HTP nicht zu verdünnen (siehe Abschnitt 12.2).

Das Befüllen und Entleeren beider Stränge ist ohne Demontage möglich. Es erfolgt beziehungsweise in Transportgebinde, die für den Transport mit HTP beziehungsweise dem jeweiligen Treibstoff zugelassen sind. Im Transportzustand sind Tanks und Leitungen leer, der HTP-Pfad ist gespült und der Treibstoffpfad inertisiert. Die Detailauslegung der Handhabung mit HTP und Treibstoff ist nicht Gegenstand dieser Arbeit (siehe Abschnitt 3.5).

Es kommen zwei getrennte Sammelbehälter zum Einsatz. HTP und Kohlenwasserstoffe reagieren hypergol, eine Vermischung außerhalb der Brennkammer muss deshalb auch im Einzelfehlerfall ausgeschlossen sein. Das Triebwerk bleibt der einzige Berührungspunkt beider Medien. Auch die Entlüftung an die Außenluft ist mit zwei getrennten Pfaden auszuführen. Die Sammelbehälter der beiden Medien unterscheiden sich im Werkstoff. Der HTP-Sammelbehälter ist aus Polyethylen ausgeführt, der Treibstoffsammelbehälter aus Edelstahl, da Polyethylen für Kohlenwasserstoffe nicht geeignet ist. Damit erhält der gefährlichere Stoff den einfacheren Behälter, weil verdünntes HTP mit Polyethylen verträglich ist.

Beide Sammelbehälter sind drucklos und über je einen Vent-Pfad an die Außenluft angeschlossen. Bei der Detailauslegung ist darauf zu achten, dass der HTP-Behälter dauerhaft entlüftet, der Treibstoffbehälter dagegen stoßweise und mit zündfähigem Gemisch. Die genaue Auslegung der Vent-Pfade einschließlich Behandlung und Mindesthöhe ist nach dem Detaillierungsgrundsatz nicht Teil dieser Konzeptarbeit (siehe Abschnitt 3.5 und Abschnitt 12.2).

Die Entleerung der Sammelbehälter erfolgt durch Absaugen von oben, da die Behälter am Systemtiefpunkt zu verorten sind. Eine genauere Beschreibung ist nach dem Detaillierungsgrundsatz ebenfalls nicht Teil dieser Arbeit. Dazu zählt auch die Entsorgung der verbleibenden Reste nach einer Testkampagne. Eine Einleitung in die Umwelt oder das Abwassernetz ist auszuschließen, die Entsorgung erfordert einen Entsorgungsfachbetrieb.

6.5 Druckluftsystem

Das Druckluftsystem ist nicht mit dem Druckgasstrang zu verwechseln. Es handelt sich um zwei getrennte Systeme. Die Druckluft wird auf einem eigenen Druckniveau von etwa 6 bar in der Technikzone durch einen Kompressor erzeugt. Die Aktorik darf nicht zusammen mit dem Aufdrucksystem ausfallen, da sonst ein gemeinsamer Fehlerfall entsteht (F-264 und F-403).

Der Kompressor wird intern in der Technikzone aufgestellt, um beim Auf- und Abbau des Systems weniger Arbeitsschritte zu erzeugen. Eine externe Aufstellung würde vor jedem Test einen zusätzlichen Aufbauvorgang erfordern, was der angestrebten Aufbau- und Abbauzeit entgegensteht (B-120 und B-121). Die ATEX-Trennung ist dabei durch die Trennwand TW2 gegeben, da der Aufstellort des Kompressors nicht in der Tankzone liegt. Durch die Trennwand führt lediglich die Druckleitung in die Tankzone.

Bei der Auslegung des Kompressors ist anzumerken, dass der Kesselinhalt die dimensionierende Größe ist und nicht die Liefermenge. Es ist von etwa 2 Normlitern je Schaltspiel der Ventile auszugehen. Bei 15 Ventilen und 3 Schaltspielen je Lauf sind damit rund 90 Normliter erforderlich. Ein 50-Liter-Kessel liefert zwischen 8 und 6 bar rund 100 Normliter und trägt damit einen vollständigen Lauf, ohne dass der Kompressor nachfördern muss. Ein anlaufender Kompressor ist während des Tests eines Triebwerks

nicht zulässig, da dieser Vibrationen in die Struktur des Prüfstands einleitet und dadurch die Messergebnisse verfälscht.

Die Druckluft wird nach dem Kessel durch einen Filter und einen Wasserabscheider aufbereitet und über einen Druckminderer auf 6 bar reguliert. Ein Trockner ist nicht vorgesehen. Der Betriebsbereich des Prüfstands liegt zwischen 0 und 35 °C, und die aktive Klimatisierung hält den Innenraum in diesem Bereich. Damit fällt keine Stelle des Druckluftsystems unter den Taupunkt, und das anfallende Restwasser wird über den Kesselablass und den Wasserabscheider beherrscht. Als Folge dieser Auslegung ist die Verfügbarkeit der Pneumatik an die Verfügbarkeit des Klimasystems gekoppelt (siehe Abschnitt 8.1).

Alle Ventile des Prüfstands sind fail-closed ausgeführt. Bei Verlust der Druckluft oder bei einem Stromausfall schließen die pneumatischen Ventile. Der sichere Zustand stellt sich also durch den Ausfall ein. Die Auslegung von Ventilblock und Aktoren ist nach dem Detaillierungsgrundsatz nicht Teil dieser Arbeit (siehe Abschnitt 3.5).

7 Mess-, Überwachungs- und Steuerungssysteme

Der Prüfstand ist während des Tests sowie unmittelbar davor und danach nicht mit Personal besetzt (F-500). Alle Informationen über den Zustand des Systems stammen in dieser Zeit aus der Messtechnik.

Der Container ist in drei Zonen aufgeteilt. Die Messstellen verteilen sich über alle drei, ein Teil von ihnen liegt in der ATEX-Zone. Die Signale müssen diese Grenzen überqueren, ohne sie aufzuheben.

Der Prüfstand wird an jedem Standort neu aufgebaut. Die Messtechnik muss nach jedem Aufbau kalibriert und die Sicherheitskette geprüft werden, bevor der Prüfstand wieder betriebsfähig ist.

Gegenstand dieses Kapitels ist die Architektur- und Schnittstellenebene. Weder die Geräteauswahl noch die Software werden im Detail ausgelegt (Abschnitt 3.5).

7.1 Messequipment und Sensorik

Die Messtechnik des Prüfstands hat im Kern zwei Aufgaben. Sie misst die Parameter des Triebwerks, um diese gegen die Annahmen der im Vorfeld durchgeführten Rechnungen zu verifizieren. Sie dient darüber hinaus der Überwachung für die Sicherheitslogik. Dabei kommen dieselben Sensoren zum Einsatz, sie unterscheiden sich lediglich in den Kriterien. Bei der Qualifikation der Triebwerksparameter braucht es Genauigkeit, bei der Überwachung für die Sicherheitslogik braucht es Verfügbarkeit und ein definiertes Verhalten im Fehlerfall.

Gegenstand dieses Abschnitts ist, wo die Messstellen am Prüfstand angeordnet sind, nicht die genaue Geräteauswahl. Die genannten Geräte sind lediglich Referenzen zur Massen- und Bauraumermittlung (Abschnitt 3.5).

Der Schub des Triebwerks ist die primäre Messgröße des Prüfstands. Aus dem Schub kann zusammen mit dem Massenstrom und dem Brennkammerdruck die Bewertung des Triebwerks erfolgen. Gemessen wird der Schub über die Krafteinleitung in die Kraftmessdose (Abschnitt 5.4). Um über den gesamten Auslegungsbereich einen möglichst genauen Messwert zu erreichen, muss die Kraftmessdose austauschbar sein, denn der Messbereich ist auf die jeweilige Triebwerksgröße abzustimmen (F-301).

Konkret bedeutet dies für die Integration, dass beispielsweise eine Kraftmessdose vom Typ HBK U9C zum Einsatz kommt. Diese besitzt für den 1-kN- und den 5-kN-Auslegungsfall denselben Durchmesser und unterscheidet sich lediglich um 15,5 mm in der Höhe. Zum Wechsel wird lediglich ein Distanzstück benötigt, ein Eingriff in die tragende Struktur ist nicht erforderlich. Damit ist F-301 ohne Sonderkonstruktion erfüllbar.

Maßgeblich für die Messunsicherheit ist dabei nicht die Kraftmessdose selbst, sondern alles, was parallel zu ihr Kraft überträgt [13]. Die Steifigkeit der Fluidleitungen, die Kabel und die Reibung der Führung gehen unmittelbar in den Messwert ein (F-302). Die Auslegung der Lagerung und Aufhängung des Triebwerks und des dazugehörigen Floating Frames ist Detailkonstruktion (Abschnitt 3.5).

Vor jedem Betrieb ist eine Kalibrierung der Schubmesskette erforderlich, die ohne Demontage möglich sein muss (F-303). Kalibriert wird dabei die eingebaute Kette und nicht nur die Kraftmessdose. Da das Triebwerk als Prüfling gewechselt wird und der Prüfstand an jedem Standort neu ausgerichtet und verankert wird, ist der Zustand der Kette zwischen zwei Kampagnen nicht als identisch voranzusetzen.

Der Druck der Stickstoffflaschen wird nicht elektrisch erfasst. Er wird über Manometer direkt an den Flaschen angezeigt und im Zustand Access (Zugang) abgelesen. Damit ist der Zwischendruck die Größe, über die ein erschöpfter Vorrat von einer Leckage unterschieden werden muss (Abschnitt 7.3).

Die Temperatur wird über Pt100-Sensoren im Fluid und über Thermoelemente an den heißen Stellen gemessen. Zweck der Temperaturüberwachung an den Tanks ist die Zersetzungsüberwachung. Die Zersetzung von HTP ist exotherm (siehe Abschnitt 2.2). Ein Temperaturanstieg im Tank ist damit ein Frühwarnsignal.

Der Massenstrom wird über das Coriolis-Prinzip direkt gemessen und nicht indirekt über die Druckdifferenz. Die Coriolis-Messung ist der Bestimmung über die Druckdifferenz überlegen, da sie nicht von der Dichte und der Kalibrierkurve des Mediums abhängt. Erkauft wird dies mit Bauraum, mit rund 30 kg für beide Geräte und mit zusätzlichem Druckverlust im Strang.

Der Füllstand wird ebenfalls erfasst, damit sichergestellt werden kann, dass vor jedem Test genügend Treibstoff und HTP zur Verfügung stehen.

Gasdetektion, Flammen- und Brandmeldung sowie Video- und Bewegungsmelder sind Sicherheitseinrichtungen, die zum Einsatz kommen (Abschnitt 7.4). Die Umgebungsgrößen wie Luftfeuchtigkeit und Umgebungstemperatur werden ausschließlich aufgezeichnet.

Die Messstellen in der Tankzone sind ATEX-relevant, die Messstellen in der Technikzone nicht. Das bestimmt maßgeblich die Ausführung der Geräte und die Signalübertragung aus der ATEX-Zone heraus (Abschnitt 7.2).

In Tabelle 7.1 sind die im Konzept vorgesehenen Messstellen zusammengefasst. Sie dienen als erster Ansatz für die Detailauslegung.

Tabelle 7.1: Messstellen des Konzepts mit Messprinzip, Anbindung und Zone.
Zusammenstellung nach dem R&I-Fließbild (siehe Anhang A.17)

Größe	Messstelle	Prinzip	Anbindung	Zone	Zweck
<i>Druck</i>					
Flaschendruck	Flaschenbatterie	Manometer	rein mechanisch, keine Datenerfassung	GSE	Ablesen des Vorrats vor Ort
Zwischendruck	hinter der ersten Druckminderstufe	Drucksensor und Manometer	Datenerfassung	Tankzone	Überwachung der Kaskade, Auslösegröße für N1 und N3
Aufdruck	hinter der zweiten Druckminderstufe	Drucksensor	Datenerfassung	Tankzone	Regelgröße des Aufdrucks
Spüldruck	Spülstrang	Drucksensor	Datenerfassung	Tankzone	Überwachung der Spülung

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 7.1

Größe	Messstelle	Prinzip	Anbindung	Zone	Zweck
Tankdruck HTP	HTP-Tank	Drucksensor und Manometer	Datenerfassung	Tankzone	Zweistufige Überwachung, Auslösegröße für H1 und H2
Tankdruck Treibstoff	Treibstofftank	Drucksensor und Manometer	Datenerfassung	Tankzone	Zweistufige Überwachung, Auslösegröße für T1 und T2
Injektordruck HTP	Eingang des Triebwerks	Drucksensor	Datenerfassung	Triebwerkszone	Auslösegröße für H4
Injektordruck Treibstoff	Eingang des Triebwerks	Drucksensor	Datenerfassung	Triebwerkszone	Auslösegröße für T4
Brennkammerdruck	Triebwerk	gekühlter Drucksensor	Datenerfassung	Triebwerkszone	Kenngroße des Testlaufs
<i>Massenstrom und Füllstand</i>					
Massenstrom HTP	HTP-Strang	Coriolis, Ex d	Datenerfassung	Tankzone	Kenngroße und Auslösegröße für H3
Massenstrom Treibstoff	Treibstoffstrang	Coriolis, Ex d	Datenerfassung	Tankzone	Kenngroße und Auslösegröße für T3
Füllstand HTP	HTP-Tank	Füllstandsensor	Datenerfassung	Tankzone	Betankung und Zustandsübergänge
Füllstand Treibstoff	Treibstofftank	Füllstandsensor	Datenerfassung	Tankzone	Betankung und Zustandsübergänge
Füllstand Sammelbehälter	Sammelbehälter	Füllstandsensor	Datenerfassung	Tankzone	Statuswert, blockiert die schnelle Testfolge an der Obergrenze
<i>Temperatur</i>					
Temperatur HTP-Tank	HTP-Tank	Thermoelement	Datenerfassung	Tankzone	Richtwert 30 °C nicht überschreiten

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 7.1

Größe	Messstelle	Prinzip	Anbindung	Zone	Zweck
Temperatur Treibstofftank	Treibstofftank	Thermo- element	Daten- erfassung	Tankzone	Frost- und Zustands- überwachung
Temperatur Triebwerk	Triebwerk	vier Thermo- elemente	Daten- erfassung	Triebwerks- zone	Kenngroße des Testlaufs
Zonen- temperatur	Technik- und Tankzone	Temperatur- sensor	Daten- erfassung	beide Zonen	Regelgröße der Klimatisierung
<i>Kraft und Sicherheit</i>					
Schubkraft	Floating Frame	Kraftmessdose, wechselbar	Daten- erfassung	Triebwerks- zone	Zentrale Messgröße des Prüfstands
Gas- konzentration	Tankzone	zwei elektro- chemische Transmitter	Sicherheits- kette	Tankzone	Erkennung von Sauerstoffanrei- cherung und Dämpfen
Flammen- erkennung	drei Zonen	Flammen- melder mit Kamera	Sicherheits- kette	alle drei Zonen	Branderkennung und Sichtkontrolle
Personen- erkennung	Zone des Prüfstands	Bewegungs- melder	Sicherheits- kette	außen	Verriegelung vor der Zündung, Auslösegröße für Q2 und Q3
Umgebungs- größen	Container außen	Luftdruck, Temperatur, Feuchte	Daten- erfassung	außen	Reines Logging, kein Abbruchkriterium

Die Zusammenstellung ist ein erster Ansatz für die Detailauslegung.

7.2 Datenerfassung und Signalverarbeitung

Die gesamte Messkette von der Messstelle über die Signalführung, die Konditionierung, die Erfassung und die Aufzeichnung bis hin zur Entscheidung liegt im Container. Am Kontrollstand werden nur die bereits aufbereiteten Informationen angezeigt (Abschnitt 10.3).

Grund dafür ist, dass die Sicherheitsfunktion nicht vom Zustand der Leitung zwischen Prüfstand und Kontrollstand abhängig sein darf.

Die Messstellen liegen teilweise in der Tankzone, die Auswerteelektronik dagegen im Schaltschrank in der Technikzone. Die Signale müssen damit die Trennwand TW2 zwischen Technik- und Tankzone durchdringen. Die Durchführung muss gasdicht sein, damit die Zonentrennung erhalten bleibt (Abschnitt 5.2), und der Stromkreis darf keine Zündquelle in die Tankzone tragen.

Aus diesem Grund kommt eine eigensichere Ausführung mit Trennbarrieren im Schaltschrank für rund 30 Kanäle zum Einsatz. Die Barrieren begrenzen Spannung und Strom auf der Feldseite so, dass auch im Fehlerfall keine zündfähige Energie in die Zone gelangen kann.

Die Eigensicherheit wurde für die Sensorik gewählt, da die Feldgeräte klein und leicht bleiben und unter Spannung an ihnen gearbeitet werden kann. Die druckfeste Kapselung wird nur dort eingesetzt, wo keine eigensichere Alternative zur Verfügung steht, beispielsweise bei den beiden Coriolis-Massenstrommessern. Diese tragen aus diesem Grund jeweils einen Aufschlag von 2 kg im Gewichtsbudget. Die Trennbarrieren belaufen sich auf rund 7 kg und sind sowohl im Gewichtsbudget als auch im Schrankmaß berücksichtigt.

Die Messkette der Triebwerksparameter und die Sicherheitskette werden getrennt geführt (F-332). Eine Störung aus dem Steuerpfad darf die Messwerte nicht verfälschen, und ein Fehler in der Messkette darf die Abschaltung nicht blockieren. Hieraus resultiert, dass die in Abschnitt 7.3 beschriebene einfache Sicherheitskette nicht an die Datenerfassung angebunden, sondern als hartverdrahtete Schleife ausgeführt ist. Damit setzt sich die Zweischichtigkeit aus Abschnitt 7.3 auf der Signalseite fort.

Die zu erwartenden Störquellen sitzen im System des Prüfstands selbst. Ausschlaggebend sind der Zündimpuls und die Schaltvorgänge der Pneumatikventile. Als Maßnahme dagegen werden einzeln geschirmte Leitungen für die analogen Messkanäle eingesetzt, Sammelleitungen kommen nur für die langsamen Temperaturkanäle zum Einsatz. Der Potentialausgleich erfolgt über den Anschluss am Anschlusspanel. Diese Maßnahmen erfordern einen gewissen Zuwachs der Masse (siehe Tabelle A.7 im Anhang).

Die Datenerfassung erfolgt gesammelt in der DAQ, die sich im Schaltschrank in der Technikzone und damit außerhalb der ATEX-Zone befindet. Vorgesehen ist ein 19-Zoll-

Einschub. Über alle Primärmessgrößen ist eine gemeinsame Zeitbasis vorgesehen, da die Auswertung Größen aus mehreren Kanälen verknüpft (F-331). Unabhängig davon muss die zeitliche Auflösung so gewählt sein, dass Zündung, stationäre Phase und Abschaltung des Triebwerks unterscheidbar bleiben (F-330).

Konkrete Abtastraten und die detaillierte Gerätewahl sind nach dem in Abschnitt 3.5 beschriebenen Detaillierungsgrundsatz nicht Gegenstand dieser Arbeit. Für das Konzept relevant sind die Kanalzahl und die Bauform, um das System zu dimensionieren und einen passenden Schaltschrank auswählen zu können.

Die Datenspeicherung erfolgt am Prüfstand selbst und nicht am Kontrollstand (F-340). Ein Abriss der Datenverbindung löst nach Abschnitt 7.5 selbst einen Sicherheitszustand aus. Genau dieser Vorgang soll mit aufgezeichnet werden, und das ist nur möglich, wenn die Aufzeichnung im Prüfstand stattfindet.

Jeder aufgezeichnete Lauf enthält Metadaten. Diese umfassen die Lauf-ID, die Zeit, die Triebwerkskonfiguration, den Treibstoff, die Sollwerte und den Bediener (F-341). Ohne diese Zuordnung ist die Qualifikationsaussage nicht nachvollziehbar, weil dieselbe Messreihe je nach Konfiguration etwas anderes bedeutet. Die Rohdaten werden gegen nachträgliche Änderung gesichert. Ein Export ist in einem offenen Format möglich, damit die Auswertung nicht an das Erfassungssystem gebunden ist (F-342).

7.3 Steuerungsarchitektur

Die Sicherheitsstruktur ist grundsätzlich in zwei Schichten unterteilt. Einerseits gibt es eine intelligente Überwachung von Mess- und Sensorwerten, die diese konstant auswertet und entscheidet, wann diese kritisch werden. Hinzu kommt eine sehr viel simplere Ebene, auf der bestimmte Signale direkt den Zustand Safe (Sicherheitsstopp) auslösen und zum Abbruch des Tests führen. Die Zweischichtigkeit ist sinnvoll, da auch sichergestellt werden muss, dass die grundlegende Sicherheit gewährleistet ist, selbst wenn das intelligente System versagt.

Die intelligente Ebene besteht im Kern aus einem Computer, der ständig die verschiedenen Werte interpretiert. Eine reine Logik, die ab einem bestimmten Schwellenwert auslöst, reicht hier allerdings nicht, denn in einigen Fällen müssen auch Veränderungen

gemessen werden, also die Veränderung eines Wertes über die Zeit. Wenn diese Veränderung übermäßig stark wird, wird ebenfalls ein Hold (Halten) oder Safe ausgelöst. Zusätzlich zeichnet dieser Computer die Daten auf, um sie später zur Verarbeitung und Auswertung bereitstellen zu können. Zudem können die aufgezeichneten Daten direkt auf dem Computer ausgewertet und visualisiert werden.

Hinzu kommt, dass mehrere Sensorwerte parallel gelesen werden und die Korrelation zwischen ihnen ausgewertet wird. Zwei scheinbar gleiche Signale deuten dann auf verschiedene Ereignisse hin. Wenn zum Beispiel der Aufdruck des Druckgasstrangs absinkt, kann dies zwei Gründe haben. Entweder ist die Flaschenbatterie leer und muss wieder aufgefüllt beziehungsweise gewechselt werden, was zu einem Hold führen würde. Oder es liegt ein Leck im System vor und dies ist der Grund für den Druckabfall, was zu einem Safe führen muss und Reparaturen am Prüfstand erfordert. Wenn nun lediglich der Aufdruck ausgewertet wird, kann nicht eindeutig zwischen den beiden Fällen entschieden werden. Wenn jedoch zusätzlich die Änderungsrate und der Zwischendruck ausgewertet werden, kann eindeutig entschieden werden, welcher Fall vorliegt. Dies muss so auch von dem intelligenten Steuerungssystem übernommen werden.

Der Zwischendruck bildet den Zustand der Flaschenbatterie ab, weil die erste Druckminderstufe ihre Regelfähigkeit verliert, sobald der Flaschendruck sich dem Zwischendruck nähert. Im Falle einer leeren Flaschenbatterie korrelieren die beiden Werte miteinander, sowohl der Zwischendruck als auch der Aufdruck sinken ab, beides in stetiger, langsamer Geschwindigkeit. Sollte es eine Undichtigkeit im Aufdrucksystem geben, würde der Aufdruck schneller als normal abfallen, während der Zwischendruck auf seinem Sollwert bleibt. Die Fälle sind so klar zu unterscheiden.

Diese Entscheidung kann nur von einem intelligenten Steuerungssystem getroffen werden, eine simple Sicherheitskette ist dazu nicht in der Lage. Für diesen sehen beide Fälle gleich aus. Die Sicherheitskette erkennt nur einen zu niedrigen Druck und kann die Korrelation zwischen den beiden Werten und die Änderungsrate nicht identifizieren.

Die simplere Sicherheitsschicht besteht nicht etwa aus einer zentralen Steuereinheit, sie besteht aus einer Kette, die mehrere Schalter, simple Taster und Druckauslöser miteinander verbindet. Sollte einer von diesen ausgelöst werden, wird sofort auf Safe geschaltet und man kann davon ausgehen, dass der Prüfstand nicht mehr ordnungsgemäß

funktioniert. Ausgelöst wird hier in Fällen wie: ein Not-Aus-Schalter wird gedrückt, Druckgrenzen werden überschritten, die Verbindung zwischen Kontrollstand und Prüfstand fällt aus und die Spannungsversorgung bricht ein. Die Entriegelung aus diesem Zustand kann immer nur direkt am Prüfstand in dem Zustand Idle (Leerlauf) vorgenommen werden. Anschließend muss sichergestellt werden, dass sich der Prüfstand wieder in einem ordnungsgemäßen Zustand befindet.

Diese Sicherheitsschicht ist bewusst sehr simpel gehalten, da sie auch in Fällen funktionieren muss, wenn die intelligente Steuerungsschicht ausfällt oder nicht mehr verbunden ist. Je simpler diese Sicherheitskette gehalten wird, desto weniger anfällig ist sie selbst für Ausfälle. Der störungsarme Normalbetrieb wird durch die beiden Extreme gewährleistet, auf der einen Seite eine sehr komplexe intelligente Steuerungsschicht und auf der anderen Seite eine sehr simple Sicherheitskette.

7.4 Betriebszustände und Zustandsautomat

Da es eine Vielzahl verschiedener Bedingungen der Subsysteme des Prüfstands gibt und diese Abhängigkeiten voneinander aufweisen, ist es sinnvoll, den Prüfstand in verschiedene Phasen oder Zustände zu gliedern. Diese werden dann nach ihrer Sicherheitslage bewertet und eingeordnet. Um von einem Zustand in den nächsten zu kommen, müssen gewisse Bedingungen erfüllt sein. Beispielsweise dürfen sich bei der Zündung keine Personen mehr im Bereich des Prüfstands aufhalten. Bestimmte Aktionen sind in den verschiedenen Zuständen zugelassen beziehungsweise verboten. Das Zünden der Triebwerke ist nur in der dafür vorgesehenen Phase erlaubt, in allen anderen Phasen ist es nicht erlaubt beziehungsweise nicht möglich.

Dieses Konstrukt wird auch Zustandsautomat genannt. Es beschreibt genau diese definierten Zustände und die Übergänge zwischen ihnen. Es gibt somit keine undefinierten Situationen, in denen sich der Prüfstand befinden könnte. So wird die Sicherheit während des Betriebes des Prüfstands sichergestellt.

Die Überlegenheit des Zustandsautomaten gegenüber einzelnen Prüfungen und Verriegelungen abhängig von bestimmten Bedingungen ist dadurch zu begründen, dass in verschiedenen Situationen bestimmte Aktionen erlaubt sein müssen, um die Funktionalität des Prüfstands zu ermöglichen. Personen im Bereich des Prüfstands müssen

beispielsweise bei der Betankung und dem Aufbau des Prüfstands erlaubt sein, aber während des Tests verboten. Zusammen mit anderen Bedingungen wie beispielsweise dem Füllstand des Tanks bildet sich eine Matrix von Abhängigkeiten und damit der Zustandsautomat.

Der Zustandsautomat umfasst sieben Zustände, in denen sich der Prüfstand befinden kann. Davon sind fünf die normalen Betriebszustände, die den Normalbetrieb des Prüfstands abbilden, ergänzt durch zwei Sicherheitszustände, die im Falle von Fehlern oder Anomalien erzwungen werden. Die Zustände sind in Tabelle 7.2 aufgelistet. Das vollständige Zustandsdiagramm mit allen Zuständen und Übergängen findet sich in Anhang A.18.

Der reguläre Ablauf eines Tests sieht das Durchwandern der fünf Phasen Idle, Access, Pre-Test, Test und Post-Test (Testnachlauf) vor. Der Startpunkt wird durch Idle dargestellt. Der Prüfstand befindet sich nach dem Aufbau in diesem Zustand. Hier sind alle Arbeiten und Zugänge erlaubt, während das System drucklos bleibt und sich weder HTP noch Treibstoff in den Tanks befindet. Eine unbegrenzte Anzahl an Personen ist in der Zone des Prüfstands erlaubt. Nachdem der Aufbau abgeschlossen ist, kann der Prüfstand dann in den nächsten Zustand übergehen: Access. In diesem Zustand dürfen lediglich ein bis zwei Personen in der Zone des Prüfstands verbleiben. Hier findet die Betankung statt, die nötige Menge an HTP und Treibstoff wird in die Tanks gefüllt. Anschließend wird die Zone um den Prüfstand komplett geräumt, so dass sich keine Personen mehr in und um den Container befinden. Nun kann der Zustand Pre-Test erreicht werden. Die Systeme sind nun bereit für die Zündung des Triebwerks. Sobald das Triebwerk gezündet wird, befindet sich der Prüfstand in dem Zustand Test. Der Test findet statt und alle nötigen Daten werden aufgezeichnet. Wenn der Test beendet wurde, geht der Prüfstand in den Zustand Post-Test über. Hier wird der Aufdruck abgelassen. Die Zone bleibt frei von Menschen.

Aus dem Zustand Post-Test gibt es zwei Wege, die den Kreislauf des Zustandsautomaten schließen. Einer führt direkt wieder zurück zu Pre-Test, der andere geht den Weg über Access. Der direkte Weg zurück zu Pre-Test ermöglicht eine schnelle Sequenz von Tests hintereinander (Rapid-Fire). Wenn ursprünglich in dem Zustand Access ausreichend HTP und Treibstoff betankt wurde, kann nun direkt die nächste Zündung und der nächste Test stattfinden, falls mehrere Tests vorgesehen sind. Der Weg über Access ermöglicht erneut den Zugang von ein bis zwei Personen, die bei

Tabelle 7.2: Zustände des Zustandsautomaten mit Tank- und Druckzustand sowie zulässigem Personenzugang.

Zustand	Tanks	Druck	Personen in der Zone	Beschreibung
<i>Betriebszustände</i>				
Idle	leer	drucklos	unbegrenzt	Aufgebaut und betriebsbereit, Schutzschale platziert
Access	befüllbar	drucklos	ein bis zwei	Betanken und Enttanken, Sammelbehälter leeren, Wasser auffüllen. Aufdrücken und Zünden strukturell gesperrt
Pre-Test	befüllt	drucklos, wird aufgedrückt	keine	Zone frei, bereit zum Aufdrücken und Zünden
Test	befüllt	unter Aufdruck	keine	Zündung, Verbrennung, Datenaufzeichnung
Post-Test	befüllt oder teilbefüllt	abgeblasen, danach drucklos	keine	Test beendet oder abgebrochen
<i>Sicherheitszustände</i>				
Hold	befüllt	bleibt aufgedrückt	keine	Weiche Reaktion. Der Prüfstand ist selbst sicher, die Verbrennung ist gestoppt, die Tanks bleiben befüllt
Safe	befüllt oder leer	drucklos	keine	Harte Reaktion. Der Prüfstand ist potenziell unsicher und wird entschärft

Der reguläre Ablauf durchläuft die fünf Betriebszustände in der Reihenfolge Idle, Access, Pre-Test, Test und Post-Test. Aus Post-Test führen zwei Wege zurück, direkt nach Pre-Test für eine schnelle Testfolge oder über Access für erneutes Betanken. Hold und Safe werden nicht angefahren, sondern bei Störungen erzwungen.

Bedarf wieder HTP und/oder Treibstoff in die Tanks füllen können. Falls das Ende der gesamten Testreihe erreicht ist, kann durch Entleeren der Tanks aus dem Zustand Access wieder der Zustand Idle erreicht werden. Beide Wege sind im Zustandsdiagramm in Anhang A.18 dargestellt.

Zur Gewährleistung des sicheren Betriebs des Prüfstands werden die fünf normalen Zustände durch zwei Sicherheitszustände ergänzt, Hold und Safe. Diese können aus allen normalen Zuständen erreicht werden. Das Lösen aus einem der beiden Sicherheitszustände erfordert immer eine manuelle Quittierung. Die genaue Unterscheidung zwischen Hold und Safe sowie die zugehörige Störungslogik werden in Abschnitt 7.5 behandelt.

In manchen Fällen werden Eintrittsbedingungen eingesetzt, um sicherzustellen, dass die Testreihe sauber zu Ende gebracht werden kann. So kann zum Beispiel der Übergang von Idle zu Access nur erfolgen, wenn der Wassertank über genügend Wasser verfügt, um das System nach Beendigung der Testreihe vollständig zu spülen. Diese Bedingung wird nach der Prüfung für den Übergang von Idle zu Access nicht mehr als Abortkriterium gewertet. Dies verringert die Menge an zu überwachenden Größen während des Durchlaufens von Tests. Somit ist das System weniger störungsanfällig. Ein durch diese Bedingung ausgelöster Sprung in einen Sicherheitszustand würde lediglich HTP und Treibstoff verschwenden, ohne dass ein tatsächliches Risiko für den Test bestanden hat.

Durch das LOTO-Prinzip (Lockout-Tagout, Sperren und Kennzeichnen) wird sichergestellt, dass sich vor dem Übergang von dem Zustand Access zu Pre-Test wirklich keine Person mehr in der Zone des Prüfstands befindet. Hier kommt ein physischer Schlüssel zum Einsatz. Im Zustand Access befindet sich dieser Schlüssel am Prüfstand, also an dem Container mit dem zu testenden Triebwerk. Nachdem die letzte Person die Betankung abgeschlossen hat, nimmt sie den Schlüssel mit und trägt ihn zum Kontrollstand, aus dem der Test durchgeführt wird. Erst wenn der Schlüssel am Kontrollstand vorhanden ist, kann der Übergang von Access zu Pre-Test aktiviert werden. Nach Beendigung des Tests wird der Schlüssel wieder vom Kontrollstand zurück zum Prüfstand gebracht, um den Zustand Access freizuschalten und das erneute Betanken zu ermöglichen.

Der Schlüssel kann sich nie gleichzeitig an beiden Ständen befinden. Solange er am Prüfstand liegt, ist ein Aufdrücken oder Zünden nicht möglich und der Zugang zur Zone

ist freigegeben. Solange er am Kontrollstand liegt, ist die Zone gesperrt und der Test kann freigegeben werden. Da der Schlüssel nur durch eine Person von einem Stand zum anderen getragen werden kann, ist das Zünden nur dann möglich, wenn die letzte Person die Zone tatsächlich verlassen und den Weg zum Kontrollstand zurückgelegt hat.

Durch eine elektromechanische Verriegelung wird sichergestellt, dass der Schlüssel nicht frei greifbar ist und die Zustände und Übergänge tatsächlich von der Position des Schlüssels abhängen. Es gibt eine Verriegelung am Prüfstand und eine am Kontrollstand. Die Verriegelung am Prüfstand gibt den Schlüssel nur frei, wenn der Zustand Access erreicht ist. Erst wenn der Schlüssel am Kontrollstand angekommen ist und fest verriegelt, lässt sich der Zustand Pre-Test aktivieren. Der Schlüssel wird am Kontrollstand erst wieder freigegeben, wenn der Zustand Access wieder erreicht ist. Dann kann der Schlüssel erneut zum Prüfstand gebracht werden und dort kann der Zustand Access vollständig freigeschaltet werden.

Eine physische Verriegelung ist sinnvoll, da diese nicht abhängig von der Disziplin des Personals umgangen oder vernachlässigt werden kann.

Für den Fall, dass zwei Personen im Zustand Access an dem Prüfstand arbeiten müssen und sich in der Zone befinden, muss es ebenso zwei Schlüssel geben. Beide Personen bekommen dann jeweils einen Schlüssel. Dies verhindert, dass eine Person in der Zone zurückgelassen wird, während der Übergang von Access in Pre-Test geschieht. Falls nur eine Person an dem Prüfstand im Zustand Access arbeitet, bekommt diese Person beide Schlüssel. Die Zustandsübergänge sind jeweils immer nur dann möglich, wenn sich beide Schlüssel an einem Ort befinden und physisch verriegelt sind

Ein physischer Schlüssel gewährleistet damit die Unabhängigkeit von den Sensoren und der Kameraüberwachung für die Freischaltung des Zustandes Pre-Test und bildet eine zusätzliche Ebene der Sicherheit. Anders als eine Kamera, die eine Person übersehen kann, ist ein fehlender Schlüssel nicht übersehbar. Das Prinzip ist eine Festlegung dieses Konzepts.

7.5 Verriegelungen, Störungsreaktion und Notabschaltung

Die Sicherheitsreaktion, also der Zustand im Falle eines unerwarteten Ereignisses, eines Fehlers oder eines Mess- oder Sensorwertes, der aus dem sicheren Bereich wandert, ist in zwei Abstufungen unterteilt. Es gibt das harte Not-Aus, bei dem alles entschärft wird, der Zustand heißt Safe. Hinzu kommt der Zustand Hold, bei dem der Prüfstand grundsätzlich scharf bleibt und nur pausiert wird.

Grundsätzlich muss beim Unterscheiden der beiden Sicherheitszustände gefragt werden, ob der Prüfstand noch sicher ist. Also ist die Beschaffenheit aller Komponenten des Prüfstands weiterhin so, dass von ihnen keine Gefahr ausgeht, weder für Menschen, die Umwelt noch den Prüfstand selbst. Falls der Prüfstand an sich noch sicher ist, kann im Zustand Hold die Scharfschaltung aufrechterhalten werden, die Tanks bleiben unter Aufdruck. Sollte der Prüfstand nicht mehr in einem sicheren Zustand sein, so muss das System sofort entschärft werden und dafür gesorgt werden, dass der Prüfstand wieder in einen sicheren Zustand gebracht werden kann, sprich repariert werden.

Der Grund für das Unterscheiden der beiden Sicherheitszustände ist die Nachhaltigkeit. Die Unterteilung erlaubt es, auf den tatsächlichen Schweregrad des Fehlers zu reagieren und nicht immer mit maximaler Härte reagieren zu müssen. So kann gewährleistet werden, dass bei kleineren Abweichungen von Sensorwerten beispielsweise nur die Verbrennung gestoppt wird, die Tanks jedoch weiterhin scharf bleiben. Damit wird das Druckgas nicht verschwendet.

Das Auslösen des Sicherheitszustands Hold ist gleichzusetzen mit einem Pausieren der aktuellen Geschehnisse des Prüfstands. Abhängig davon, in welchem Zustand sich der Prüfstand vor dem Auslösen des Zustands Hold befunden hat, wird die Tätigkeit unterbrochen. Falls bereits eine Verbrennung stattfindet, wird diese gestoppt, also die Hauptventile werden geschlossen, ansonsten bleiben der Aufdruck und der Füllstand der Tanks bestehen. Falls Hold während eines anderen Prozesses ausgelöst wird, wird dieser ebenfalls unterbrochen beziehungsweise pausiert. Beispielsweise während des Aufdrückens, auch hier wird der Prozess angehalten, aber nicht abgebrochen, sodass nicht von Beginn an gestartet werden muss.

Der Weg aus dem Sicherheitszustand Hold kann nur durch eine manuelle Quittierung gestartet werden, diese wird durch eine Person im Kontrollstand initiiert, nachdem die Ursache für das Auslösen behoben wurde oder die Ursache geprüft wurde und feststeht, dass sie nicht die Sicherheit des Tests oder des Prüfstands gefährdet. Anschließend wird immer in den Zustand Pre-Test zurückgekehrt. Der Bruchteil des Aufdrucks, der bereits aufgebaut wurde, darf dabei bestehen bleiben, es muss dann nur weiter aufgedrückt werden. Wurde Hold während der Verbrennung ausgelöst, stehen die Tanks bereits unter vollem Aufdruck und es kann direkt eine neue Zündung durchgeführt werden.

Ganz bewusst kann der Weg direkt wieder zu Pre-Test gegangen werden, da der Prüfstand ja weiterhin scharf gehalten wurde, so werden keine Betriebsmittel verschwendet wie bei dem Weg über Idle, bei dem das System drucklos gemacht werden müsste und HTP und Treibstoff entleert werden müssten.

Im Grunde geschieht somit erst einmal alles das, was auch im Sicherheitszustand Hold passiert, also die Verbrennung wird gestoppt, indem die Hauptventile geschlossen werden. Hinzu kommt jedoch, dass nun auch der Druck aus den Tanks abgelassen wird, das System wird also unscharf geschaltet. Auch die Betriebsmittel aus den Tanks müssen entfernt werden, um anschließend den Zustand Idle zu erreichen. Hier wird der Prüfstand dann auf Schäden oder Fehler überprüft. Dies muss zwingend im Zustand Idle passieren, da in dem Zustand Access der Prüfstand nur von einzelnen Personen betreten werden darf und bis auf Betriebsmittel nachfüllen, also betanken, keine Tätigkeiten durchgeführt werden dürfen.

Diese Vorkehrungen sind notwendig und nicht verschwenderisch, weil in Frage steht, ob der Prüfstand selbst noch sicher ist oder eine Gefahr für Menschen, Umwelt oder sich selbst birgt. Dies gilt es zunächst zu klären und sicherzustellen, dass der Prüfstand weiterhin sicher ist. So muss der Prüfstand komplett entschärft werden, bis diese Frage sicher geklärt ist.

Auch aus dem Zustand Safe führt nur eine manuelle Quittierung zurück in den Betrieb, genau wie bei dem Sicherheitszustand Hold. Diese wird von einer Person im Kontrollstand durchgeführt.

Tabelle 7.3: Störungen, Abstufung und Reaktion, geordnet nach Betriebsmitteln.

Nr.	Störung	Auslösende Größe	Stufe	Reaktion
<i>HTP-Strang</i>				
H1	Tankdruck über der Hold-Schwelle	Druck HTP-Tank	Hold	Aufdruck stoppen und abregeln, Übergang nach Pre-Test
H2	Tankdruck über der harten Grenze	Druck HTP-Tank	Safe	Drucklos schalten, Ventile schließen, Übergang nach Idle
H3	Abweichung des Massenstroms im Test	Massenstrom HTP	Safe	Hauptlaufventil schließen, drucklos schalten
H4	Einbruch des Injektordrucks im Test	Druck am Injektor HTP	Safe	Hauptlaufventil schließen, drucklos schalten
<i>Treibstoffstrang</i>				
T1	Tankdruck über der Hold-Schwelle	Druck Treibstofftank	Hold	Aufdruck stoppen und abregeln, Übergang nach Pre-Test
T2	Tankdruck über der harten Grenze	Druck Treibstofftank	Safe	Drucklos schalten, Ventile schließen, Übergang nach Idle
T3	Abweichung des Massenstroms im Test	Massenstrom Treibstoff	Safe	Hauptlaufventil schließen, drucklos schalten
T4	Einbruch des Injektordrucks im Test	Druck am Injektor Treibstoff	Safe	Hauptlaufventil schließen, drucklos schalten
<i>Stickstoffstrang</i>				
N1	Zwischendruck unter der Mindestschwelle, außerhalb des Tests	Zwischendruck	Hold	Start verweigern, Flaschentausch möglich
N2	Aufdruck zu niedrig, außerhalb des Tests	Druck im Aufdruckpfad	Hold	Abregeln
N3a	Aufdruck fällt langsam bei sich leerender Flasche, im Test	Aufdruck und Zwischendruck, korreliert	Hold	Verbrennung beenden, Tanks bleiben befüllt, Flaschentausch, Übergang nach Pre-Test
N3b	Aufdruck bricht plötzlich ein, Zwischendruck bleibt stehen, im Test	Aufdruck ohne korrelierten Abfall	Safe	Verbrennung beenden und drucklos schalten
N4	Aufdruck zu hoch durch Reglerfehler	Druck im Aufdruckpfad	Hold, bei extremer Überschreitung Safe	Abregeln, an der harten Grenze drucklos schalten

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 7.3

Nr.	Störung	Auslösende Größe	Stufe	Reaktion
<i>Sonstige Störungen</i>				
Q1	Spannungsversorgung außerhalb der Toleranz oder Ausfall	Netzüberwachung	Safe	In jedem Zustand. Ein Totalausfall wirkt hardwareseitig, stromlos ist der sichere Zustand
Q2	Person in der Zone vor der Zündung	Bewegungsmelder	Verriegelung	Blockiert den Übergang von Pre-Test nach Test
Q3	Person betritt die Zone im Test	Bewegungsmelder	Hold	Der Prüfstand ist selbst sicher, der Auslösegrund ist zu beseitigen
Q4	Not-Aus betätigt	Not-Aus-Taster	Safe	Wirkt physisch über die Schließerkette, unabhängig von der Software
Q5	Umgebungsgrößen außerhalb des Erwartungsbereichs	Luftdruck, Temperatur, Feuchte	keine	Reines Logging, kein Abbruch
Q6	Sammelbehälter erreicht die Obergrenze	Füllstand	Verriegelung	Kein Abbruch. Blockiert die nächste schnelle Testfolge, Entleerung über Access oder Spülung in Idle

In Tabelle 7.3 wird eine Reihe verschiedener Störungen aufgelistet, die entsprechende Reaktion auf die Störung sowie die verschiedenen Abstufungen der Störung. Abhängig von der Stärke der Störung wird eine andere Reaktion ausgelöst. Die Tabelle ist jeweils nach den verschiedenen Betriebsmitteln, also HTP, Treibstoff und Stickstoff, geordnet, mit einem zusätzlichen Abschnitt für sonstige Störungen.

Wie bereits in Abschnitt 7.3 beschrieben, gilt es auch, mehrere Werte gleichzeitig auszuwerten und die Korrelation zwischen ihnen einzuschätzen. Dementsprechend wird die Reaktion angepasst.

Abhängig vom gegenwärtigen Zustand, in dem sich der Prüfstand befindet, müssen die Sensorwerte oder Störungen anders bewertet werden. So ist in Idle der Zugang von Personen erlaubt und zum Beispiel ein Bewegungsmelder löst hier weder eine Störung noch einen Sicherheitszustand aus. In Access blockiert der ausgelöste Bewegungsmelder den Übergang zu Pre-Test, und in den Phasen Pre-Test, Test und Post-Test löst ein

Signal des Bewegungsmelders ein Hold aus. Der Prüfstand bleibt weiterhin in einem sicheren Zustand, lediglich der Grund für das Auslösen des Bewegungsmelders muss entfernt werden. So kann das gleiche Signal, Bewegung in der Zone des Prüfstands, verschiedene Reaktionen auslösen. Die Entscheidung über die Reaktion auf bestimmte Signale muss somit auch den gegenwärtigen Zustand des Prüfstands inkludieren.

Manuelle Not-Aus-Schalter sind sowohl in der Zone des Prüfstands als auch am Kontrollstand verteilt. Es handelt sich hierbei um physische Schalter, die nur vor Ort wieder entriegelt werden können. Sie lösen sofort den Sicherheitszustand Safe aus. Hold würde in diesem Fall nicht reichen, da nicht klar ist, warum der Not-Aus-Schalter gedrückt wurde. Die Schalter sind alle in Reihe geschaltet, ein Kabelbruch oder andere Fehler im System führen zum Aktivieren des Sicherheitszustands Safe. Bevor zurück zu dem normalen Ablauf gekehrt werden kann, muss sichergestellt werden, warum der Not-Aus-Knopf gedrückt wurde oder ob es sich um einen Fehler handelt. Anschließend kann der Not-Aus-Knopf, der gedrückt wurde, nur vor Ort wieder entriegelt werden. Anschließend erfolgt die manuelle Quittierung am Kontrollstand.

Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Mensch nur einen der Not-Aus-Schalter drücken würde, wenn die Person Gefahr wahrnimmt oder versteht, dass etwas nicht in Ordnung ist. Das System hat diese Gefahr oder diesen Fehler, der von einem Menschen wahrgenommen wurde, nicht erkannt. So muss die Reaktion auf das Drücken eines Not-Aus-Knopfes immer ein hartes Safe sein.

Die Reihenfolge der Medienabspernung beim harten Safe und beim geordneten Abschalten wurde in diesem Konzept nicht festgelegt. Eine belastbare Festlegung erfordert Prüfstandsliteratur oder Erprobung. Die Architektur mit TIV und MRV je Pfad lässt jede Reihenfolge zu. Die Festlegung ist damit dem Detailentwurf zugeordnet (siehe Abschnitt 12.2).

8 Betriebskonzept

In diesem Kapitel wird beschrieben, in welcher Form der Prüfstand sicher betrieben werden kann. Dabei sind zwei Versorgungsszenarien zu betrachten, da der Prüfstand mobil ist. Er kann mit mitgeführter Versorgung betrieben werden, ebenso kann die Versorgung durch vorhandene Standortinfrastruktur ergänzt werden. Hinzu kommt der Ablauf einer Testkampagne, der beide Szenarien zusammenführt.

Die Betriebszustände und der Zustandsautomat werden in den Abschnitt 7.4 und Abschnitt 7.5 beschrieben und hier lediglich referenziert. Transport und Aufbau des Prüfstands sind Gegenstand von Kapitel 9, der Kontrollstand von Kapitel 10 und die Schutzmaßnahmen für den sicheren Betrieb von Kapitel 11. Teil dieses Kapitels ist es dagegen, die Versorgungslogik zu erläutern sowie die Prozeduren und Checklisten vorzulegen. Nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 werden standortabhängige Größen als Randbedingung geführt und nicht festgelegt.

Ein autarker Betrieb ist dann gegeben, wenn der Prüfstand keine Versorgung von dem Standort annimmt, an dem er aufgestellt ist. Alle Mittel, die während des Aufbaus und des Tests zum Einsatz kommen, werden mitgeführt oder angeliefert. Der Betrieb mit vorhandener Infrastruktur ist demgegenüber als Entlastung von Transport und Aufbau zu betrachten, nicht als Auslegungsfall. Als Referenz dient der Standort Trauen des DLR, auch für den Vergleich beider Betriebsarten. Der Ablauf einer Kampagne von der Planung bis zur Abreise ist Gegenstand des letzten Abschnitts.

8.1 Autarker Betrieb

In der Anforderung B-140 wird der autarke Betrieb definiert. Es handelt sich dabei um einen Betrieb ohne Anschluss an die stationären Versorgungsnetze am Aufstellort. Das mitgeführte Equipment, also das GSE, ist hiervon nicht betroffen. Mit ihm wird der Prüfstand versorgt, wenn eine Versorgung durch den Standort nicht gegeben ist. Autarker Betrieb bedeutet somit nicht Betrieb ohne Versorgung. Die in Abschnitt 5.1

definierte Systemgrenze führt das GSE außerhalb des Prüfstands, innerhalb des Betriebskonzepts liegt es dagegen sehr wohl.

Zur Versorgung von außen zählen die elektrische Energie, das Druckgas und das Wasser. Auch die Betriebsmedien HTP und Treibstoff sind extern heranzuführen, da die Tanks des Prüfstands nach B-105 während des Transports leer bleiben. Um die Reichweite einer Kampagne bestimmbar zu machen, wird der Bedarf dieser Versorgung im Folgenden gegen das geprüft, was mitgeführt werden kann.

Die elektrische Energie wird im autarken Betrieb außerhalb des Containers durch ein Stromaggregat erzeugt. Ein containerinternes Aggregat wurde verworfen. Es würde zu einem unzulässigen Massezuwachs führen, und ein Verbrennungsmotor im Prüfstand wäre eine Zündquelle, die mit dem Zonenkonzept nach B-111 nicht zu vereinbaren ist. Hinzu kommt der Eintrag von Vibrationen in die Messkette, deren parasitäre Pfade in Abschnitt 7.1 beschrieben sind.

Verbraucher der elektrischen Energie sind die Klimatisierung, der Druckluftkompressor, die Wasserpumpe, die Schaltschranktechnik einschließlich der unterbrechungsfreien Stromversorgung sowie Belüftung und Beleuchtung. Daraus ergibt sich eine Anschlussleistung von 6,8 bis 7,7 kW. Die zugehörige Rechnung befindet sich im Anhang in Tabelle A.12. Daraus folgt die Standortanforderung eines CEE-Anschlusses mit 16 A (F-620). Die Klimatisierung ist dabei der größte und zugleich unsicherste Posten der Bilanz. Dimensionierend für die Gerätegröße ist der Kühlfall und nicht der Heizfall, da im Kühlfall die innere Abwärme der Technikzone und der solare Eintrag hinzukommen (siehe Abschnitt 5.6 sowie Abschnitt 12.2).

Ein Aggregat dieser Leistungsklasse wiegt rund 230 kg und passt damit nicht in die verbleibende Nutzlast des Zugfahrzeugs von rund 107 kg (siehe Abschnitt 9.2). Es wird deshalb auf dem zweiten Fahrzeug mitgeführt, sofern keine standortseitige Stromversorgung zur Verfügung steht. Die Zwei-Fahrzeug-Konstellation folgt somit nicht allein aus der Entscheidung zum Kontrollstand, sondern ebenso aus der geforderten Autarkie. Steht eine standortseitige Versorgung zur Verfügung, entfällt das Aggregat. Kontrollstand und Prüfstand werden in jedem Fall getrennt versorgt, das hier beschriebene Aggregat speist ausschließlich den Prüfstand (siehe Abschnitt 10.3).

Die Druckgasversorgung erfolgt im autarken Betrieb über die Druckgasflaschen, die auf dem Zugfahrzeug mitgeführt werden. Die Regelbestückung beläuft sich auf vier Fla-

schen zu je 50 L und deckt rund fünf vollständige Füllungen von HTP- und Treibstofftank ohne Flaschenwechsel ab. Auslegung und Betriebsregeln des Druckgasstrangs sind in Abschnitt 6.3.5 beschrieben (F-242). Das Gestell, in dem sich die Flaschen befinden, wird am Einsatzort nicht abgeladen, es verbleibt auf dem Zugfahrzeug. Die Position des Zugfahrzeugs ist dadurch auf den Radius begrenzt, den die Länge des Umbilicals zulässt (F-624, siehe Abschnitt 10.1). Ein Flaschenwechsel sowie das Öffnen und Schließen von Flaschenventilen sind Handlungen in den Zuständen Idle oder Access.

Die Wasserversorgung ist in zwei Teile zu trennen. Zum einen wird Wasser als Spülwasser für den Medienpfad benötigt, zum anderen aus Sicherheits- und Brandschutzgründen. Das Spülwasser ist autark darstellbar. Der interne Tank mit 50 L reicht aus, um die Spülung der Medienpfade durchzuführen, die externe Quelle dient lediglich dem Nachfüllen (F-261, siehe Abschnitt 6.4).

Wasser wird darüber hinaus für die Notdusche, als Verdünnungsreserve und für die Berieselungsanlage benötigt (F-512, F-513, F-541). Diese Funktionen werden über den externen Anschluss am Container versorgt, eine interne Rückfallebene besteht nicht. F-513 schließt die Reserve nach F-261 ausdrücklich aus, da sie für die Spülung des HTP-Medienpfades vorgehalten wird und den geforderten Durchfluss über die geforderte Dauer nicht bereitstellen kann.

Die benötigten Mengen liegen im Kubikmeterbereich. Allein die Notdusche fordert in der Gefährdungsklasse I nach DIN EN 15154-5 einen Volumenstrom von 50 l/min, die Augendusche zusätzlich 14 l/min. Ein Kubikmeter Wasser wiegt eine Tonne und ist im Massenbudget des Gespanns nicht darstellbar. Die sicherheitstechnische Wasserversorgung ist deshalb entweder standortseitig herzustellen oder durch einen externen Dienstleister bereitzustellen, beispielsweise in Form von IBC-Gebinden.

Damit ist die Wasserverfügbarkeit eine Standortbedingung und Bestandteil der Checkliste nach B-162. Sie ist nicht Teil des Prüfstandsystems, sondern des Betriebskonzepts. Zugleich ist die Verfügbarkeit dieser Versorgung Freigabebedingung für die Zustände Pre-Test und Test (F-550). Die Grenze der Autarkie ist damit im Zustandsautomaten verankert und nicht allein organisatorisch geregelt, ein Übersehen dieser Bedingung ist ausgeschlossen. Die Bemessung von Berieselung und Verdünnungsreserve erfolgt in Abschnitt 12.2.

Der konkrete Bedarf an Betriebsmedien folgt aus dem gewählten Testprogramm und ist damit keine Eigenschaft des Prüfstands. HTP und Treibstoff werden nicht als Vorrat mitgeführt, sondern je Kampagne bereitgestellt und können zwischen den Tests nachgetankt werden. Abschnitt 9.2 weist nach, dass der Transport einer Tankfüllung im Eigenbedarf möglich ist. Als Regelfall des Betriebs wird er nicht angesetzt. Das Zugfahrzeug trägt in diesem Fall die Grundausrüstung und das Druckgas, während die Gebinde der Betriebsmedien wie auch das Stromaggregat auf dem zweiten Fahrzeug mitfahren (siehe Abschnitt 9.2).

Anders verhält es sich mit dem Druckgas. Im autarken Betrieb ist der Bedarf ausschließlich durch die auf dem Zugfahrzeug mitgeführten Flaschen gedeckt. Wie in Abschnitt 6.3.5 beschrieben, deckt die Regelbestückung von vier Flaschen rund fünf vollständige Tankfüllungen ab, das Gestell fasst mit sechs Stellplätzen rund sieben. Damit ist das Druckgas der begrenzende Faktor für die Länge einer Kampagne, sofern es nicht ebenfalls nachgeliefert oder standortseitig bereitgestellt werden kann. Der Bedarf skaliert dabei mit der Zahl der Tankfüllungen und nicht mit der Zahl der Läufe, sodass eine Nachlieferung von Betriebsmedien stets mit der Flaschenzahl mitzuplanen ist.

Somit ist die Versorgung mit elektrischer Energie durch das Stromaggregat, mit Druckgas durch die Flaschenbatterie auf dem Zugfahrzeug und mit Spülwasser durch den internen Tank autark darstellbar. Nicht darstellbar sind das sicherheitstechnische Wasser sowie, ab der ersten Nachlieferung, die Betriebsmedien HTP und Treibstoff. Beides sind Beschaffungs- und Logistikfragen und keine Konstruktionsaufgaben des Prüfstands, weshalb sie in der Standort-Checkliste nach B-162 geführt werden. Die Grenze der Autarkie ist damit benannt und über F-550 zusätzlich im Zustandsautomaten verankert. Welche Versorgung der Aufstellort bereitstellt, ist folglich maßgeblich für die Beladung der Fahrzeuge einer Kampagne.

8.2 Betrieb mit Standortversorgung

Mit Standortversorgung ist die ortsfeste Infrastruktur am Aufstellort gemeint. Sie ist nicht mit dem mitgeführten GSE zu verwechseln, das nach Abschnitt 5.1 zum Betriebskonzept gehört und auch im autarken Betrieb zum Einsatz kommt. In Abschnitt 8.1 wurde geprüft,

was im autarken Betrieb mitgeführt werden muss. In diesem Abschnitt wird geprüft, welche dieser Abhängigkeiten eine Standortversorgung abnehmen kann. Maßgeblich sind dabei die beiden in Abschnitt 8.1 benannten Grenzen, das sicherheitstechnische Wasser und das Druckgas.

Als Referenz dient das Testgelände des DLR in Trauen, das bereits in der Aufgabenstellung benannt ist [15]. Dieser Aufstellort wird deshalb konkret betrachtet und nicht als allgemeiner Musterstandort. Ein konkreter Standort zeigt zudem, welche Angaben vor einer Kampagne tatsächlich zu bekommen sind und welche offen bleiben. Auch darin liegt ein Erkenntniswert.

Grundlage dieses Abschnitts ist der Nachrichtenaustausch mit Tim Kruse von der Hochschule Bremen, der die Betriebserfahrung am Standort Trauen aus dem Projekt AQUASONIC³ beisteuert. Der Schriftverkehr ist in Anhang A.20 wiedergegeben. Dabei handelt es sich um eine Momentaufnahme, denn der Prüfstand wird in naher Zukunft renoviert und umgebaut, wodurch sich einzelne Angaben ändern können. Hinzu kommt, dass die Zuordnung des Standplatzes auf dem Gelände lediglich aus einem Telefonat mit dem Prüfstandsleiter des DLR stammt und damit mittelbar ist. Der gegenwärtige Zustand wird deshalb als konservative Basis angenommen, ein möglicher Zustand nach der Renovierung wird nicht betrachtet.

Das DLR-Gelände in Trauen ist zweigeteilt, wobei die Oxidatorklasse darüber entscheidet, auf welcher Seite ein Test stattfindet. Die linke Seite ist für Hybridtriebwerke vorgesehen, dort steht der Prüfstand des Projekts AQUASONIC³. Die rechte Seite ist für HTP (H_2O_2) vorgesehen, dort steht der fest installierte Prüfstand des DLR. Nach Auskunft des Prüfstandsleiters soll ein Prüfstand der Hochschule Bremen mit HTP (H_2O_2) auf der rechten Seite aufgestellt werden (siehe Anhang A.20).

Die erste Auskunft nannte die linke Seite, bezog sich dabei jedoch auf den bisherigen Prüfstand der Hochschule Bremen mit N_2O -Hybridtriebwerk (siehe Anhang A.20). Für einen Betrieb mit HTP gilt die rechte Seite. Diese Korrektur ist von Bedeutung, da sich die vorhandene Ausstattung zwischen beiden Seiten unterscheidet und die im Folgenden aufgeführten Angaben überwiegend aus der bisherigen Nutzung der linken Seite stammen. Hinzu kommt, dass die Infrastruktur der rechten Seite zum fest installierten Prüfstand des DLR gehört und ihre Mitbenutzung nicht vorausgesetzt werden darf.

Der Untergrund am Prüfstandsgelände ist Beton, gegenwärtig mit Löchern und Rissen. Damit entfallen die Lastverteilplatten nach Abschnitt 9.3, die Antirutschmatten bleiben dagegen erforderlich. Ob diese Angabe für beide Seiten gilt, ist nicht ausdrücklich bestätigt (siehe Anhang A.20).

Tabelle 8.1 zeigt die am Standort Trauen zur Verfügung stehenden Versorgungsmittel und wie diese an den Prüfstand angebunden werden können. Die Angaben zu Strom und Wasser stammen dabei aus der bisherigen Nutzung der linken Seite.

Die Stromversorgung wurde gegen die Bilanz aus Abschnitt 8.1 geprüft. Der Anschluss mit 400 V bei 16 A stellt rund 11 kW bereit, dem steht ein Bedarf von 6,8 bis 7,7 kW gegenüber. Die verfügbare Leistung ist damit ausreichend. Für die sicherheitstechnische Wasserversorgung steht ein Löschwasseranschluss zur Verfügung, der hierfür funktional geeignet ist. Damit ist die in Abschnitt 8.1 benannte Grenze an diesem Standort grundsätzlich adressierbar, der tatsächliche Umfang auf der rechten Seite ist jedoch unbekannt.

Eine Druckluftversorgung ist nicht vorhanden. Dies bleibt ohne Wirkung, da die Druckluft ohnehin containerintern erzeugt wird (F-264). Auch das am Standort gängige Herunterregeln von Stickstoff auf Druckluftniveau ist damit nicht erforderlich, es wurde in Abschnitt 6.5 bereits über den gemeinsamen Ausfallpfad verworfen. Die Entsorgung kann über die vorhandenen Abflüsse für die entleerten Sammelbehälter erfolgen. Eine Erlaubnis zur direkten Einleitung ist damit nicht verbunden, die Anforderungen F-262 und F-263 bleiben unverändert.

Eine Standortversorgung und die mitgeführte Flaschenbatterie münden in dieselbe Schnittstelle S1 an der Containeraußenwand, ein Parallelbetrieb beider Quellen ist nicht vorgesehen (F-622). Damit ist die Quelle des Druckgases austauschbar, ohne dass der Container dafür umgebaut werden muss.

Druckniveau und Leistungsfähigkeit einer Standortversorgung sind unbekannt und unterscheiden sich von Standort zu Standort. Die zur Anpassung erforderliche Druckminderstufe gehört deshalb zum GSE und nicht in den Container. Wäre sie fest im Container verbaut, müsste dieser für das ungünstigste denkbare Druckniveau ausgelegt werden, und die Unabhängigkeit vom Standort wäre aufgehoben. Damit liegt die standortabhängige Druckminderstufe auf der Seite, die ohnehin für jede Kampagne neu zusammengestellt und im Vorfeld über die Standort-Checkliste geführt wird. Der Stufe

Tabelle 8.1: Am Standort Trauen verfügbare Versorgungsmittel und ihre Anbindung an den Prüfstand (siehe Anhang A.20).

Medium	Verfügbar	Schnittstelle	Anmerkung
Elektrische Energie	400 V, 16 A Drehstrom, rund 11 kW, in einem Raum hinter der Teströhre. Zusätzlich 230 V in der Teströhre	Anschluss-panel Elektro	Deckt den Bedarf von 6,8 bis 7,7 kW. Bisher waren rund 15 m Kabel erforderlich
Stickstoff	nur auf der rechten Seite, gehört zum fest installierten DLR-Prüfstand	S1 über die Anpassstufe	Auf der linken Seite musste Stickstoff bisher mitgebracht werden. Die Mitbenutzung darf nicht vorausgesetzt werden
Druckluft	nicht vorhanden	entfällt	Der mitgeführte Kompressor nach Abschnitt 6.5 bleibt erforderlich
Wasser	linke Seite ausschließlich ein Anschluss für B-Schlauch, überwiegend zur Brandbekämpfung. Rechte Seite unbekannt (siehe Abschnitt 8.2)	Einspeisung Storz C, Frischwasser E1	Für die Berieselung und den Löschwasserbedarf funktional geeignet. Die Notdusche nach F-513 ist damit adressierbar
Entsorgung	Abflüsse und Auffangwannen auf der rechten Seite vorhanden	Transport-gebinde	Bei AQUASONIC ³ konnte alles Wasser versickern, das ist auf HTP nicht übertragbar
Untergrund	Beton, gegenwärtig mit Löchern und Rissen	entfällt	Lastverteilplatten entfallen, Antirutschmatten bleiben erforderlich

Die Angaben zu Strom und Wasser stammen aus der bisherigen Nutzung der linken Seite. Für einen Betrieb mit HTP gilt die rechte Seite, deren Ausstattung zum fest installierten Prüfstand des DLR gehört und deren Mitbenutzung nicht vorausgesetzt werden darf. Eine Verbesserung durch die laufende Renovierung wird erwartet, ist aber nicht zugesagt.

ist ein Handabsperrventil vorgeschaltet, da hinter ihr sonst ein zusätzlicher absperrender Abschnitt mit anstehender Druckquelle entstünde (F-622).

Am Referenzstandort Trauen ist eine Stickstoffversorgung vorhanden, allerdings auf der Seite des fest installierten DLR-Prüfstands. Der Fall, für den die Anpassstufe vorgesehen ist, tritt hier also grundsätzlich ein, ohne dass eine Mitbenutzung zugesagt wäre. Gleiches ist an anderen Standorten zu erwarten. Offen bleiben dabei das Druckniveau, die Entnahmestelle, die Anschlussart und die Frage, ob eine Dauerentnahme möglich ist, sodass die Anpassstufe unbemaßt bleibt (siehe Abschnitt 12.2).

Die Flaschenbatterie bleibt dabei der Auslegungsfall, die Standortversorgung ist die Entlastung im Sonderfall. Der autarke Betrieb ist damit weiterhin gegeben.

Der Referenzstandort Trauen verfügt zusätzlich über einen Bunker in rund 10 m Entfernung zur Teströhre, aus dem die Triebwerkstests durchgeführt werden können (siehe Anhang A.20). Der geringe Abstand ist allein wegen der baulichen Härtung zulässig (siehe Abschnitt 10.1). Auslegungsfall für den Kontrollstand ist dagegen, dass eine solche Anlage nicht vorhanden ist und der Schutz über den Abstand erreicht wird. Es bestehen somit zwei verschiedene Wege zu demselben Schutzziel nach F-500.

Wo ein gehärteter Kontrollraum vorhanden ist, ist seine Nutzung sicherheitstechnisch überlegen und wird bevorzugt. Der mitgeführte Kontrollstand kann in diesem Fall verpackt bleiben oder gar nicht erst mitgeführt werden, alternativ wird er im vorhandenen Raum aufgebaut (siehe Abschnitt 10.2). Voraussetzung ist in jedem Fall, dass die Schnittstellen zum Prüfstand nach F-610 bis F-613 in beiden Aufstellungen dieselben sind.

Der Aufwand verschiebt sich dabei, er entfällt nicht. Nach der Betriebserfahrung am Standort sind der Aufbau der Rechner im Bunker und das Verlegen der Kabel ein wesentlicher Zeitfaktor bei der Inbetriebnahme (siehe Anhang A.20).

Ein Bunker oder eine vergleichbare Einrichtung ist an vielen Standorten nicht vorhanden und taugt deshalb nicht als Auslegungsgrundlage (siehe Abschnitt 10.1). Der mitgeführte Kontrollstand ist die Lösung für ebendiese Standorte, und dort trägt er seinen Aufwandsvorteil. Die Variantenentscheidung selbst ist in Kapitel 10 beschrieben.

Die noch zu klärenden Punkte für den Referenzstandort Trauen und für mögliche weitere Standorte belaufen sich auf die folgenden. Am Standort Trauen ist nicht abschließend

geklärt, ob die Ausstattung der rechten Seite bei Wasser, Strom und Gasentnahme für den Prüfstand nutzbar wäre. Die vorliegenden Angaben stammen von der linken Seite und aus dem Referenzprojekt AQUASONIC³. Druckniveau und Anschlussart der Stickstoffversorgung sind ebenfalls unbekannt (siehe oben). Der Entsorgungsweg für die Sammelbehälter ist plausibel, aber nicht zugesagt. Unbekannt sind ferner die Stellfläche für Container und Anhänger auf der rechten Seite sowie der Zustand nach der angekündigten Renovierung.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass keiner dieser Punkte eine Kernaussage des Konzepts blockiert. Sie betreffen sämtlich standortabhängige Größen, und gerade deren Unbekanntheit ist der Auslegungsgrund für die Anpassstufe nach F-622 und für die Standort-Checkliste nach B-162. Standortabhängige Größen werden als Randbedingung mit dokumentierter Herkunft geführt und nicht festgelegt, für eine Festlegung wäre eine verbindliche Zusage des Betreibers erforderlich (siehe Abschnitt 3.5). Ein Konzept, das an einem konkreten Standort keine offenen Punkte aufwiese, wäre auf diesen Standort zugeschnitten und damit nicht mehr mobil.

Eine Abstimmung mit dem DLR ist für die Weiterführung des Projekts sinnvoll und wird in Abschnitt 12.2 geführt. Sie ist sinnvollerweise nach Abschluss der Renovierung anzusetzen, da sich die Angaben andernfalls zweimal ändern.

Wie in B-142 gefordert, folgt nun ein Vergleich der beiden Betriebsarten. Von einer gewichteten Nutzwertanalyse wird dabei abgesehen, da keine Auswahl getroffen wird. Beide Betriebsarten sind MUSS-Anforderungen nach B-140 und B-141, der Prüfstand muss folglich beide beherrschen. Über die Betriebsart entscheidet der Aufstellort und die dort verfügbare Versorgung. Der Vergleich erfolgt deshalb kriterienbasiert nach Abschnitt 3.4. Sein Zweck ist nicht die Auswahl, sondern eine Planungsgrundlage. Er zeigt, was sich für eine Kampagne ändert, wenn eine Standortversorgung zur Verfügung steht. In Tabelle 8.2 sind beide Betriebsarten anhand verschiedener Kriterien gegenübergestellt.

In Bezug auf die Aufbauzeit spart die Standortversorgung das Aufstellen des Aggregats, kostet aber Leitungswege. Bei der Nutzung eines Kontrollraums am Standort kann sich dieser Vorteil nach der Betriebserfahrung sogar umkehren und zu einem Mehraufwand führen (siehe oben). Der Personalbedarf ist in beiden Betriebsarten unverändert, da er aus dem Zustandsautomaten nach Abschnitt 7.4 und aus B-150 folgt und nicht aus der Versorgung. Bei der Medienreichweite ergibt sich dagegen ein deutlicher

Tabelle 8.2: Vergleich von autarkem Betrieb und Betrieb mit Standortversorgung nach B-142.

Kriterium	Autarker Betrieb	Betrieb mit Standortversorgung
Elektrische Energie	Stromaggregat 10 kVA auf dem zweiten Fahrzeug	Anschluss am Standort, das Aggregat entfällt
Druckgas	Flaschenbatterie auf dem Zugfahrzeug, Regelbestückung vier Flaschen	Einspeisung über S1, die Flaschen entfallen
Medienreichweite	Begrenzt auf fünf Tests je Kampagne ohne Flaschenwechsel	Die Begrenzung der Kampagnenlänge entfällt
Wasser	Interne Spülwasserreserve nach F-261. Sicherheitstechnisches Wasser ist nicht darstellbar	Löschwasseranschluss deckt die sicherheitstechnische Funktion ab
Aufbauzeit	Aufstellen des Aggregats	Spart das Aggregat, kostet Leitungswege. Bei Nutzung eines Kontrollraums am Standort kann sich der Vorteil umkehren
Personalbedarf	unverändert	unverändert. Er folgt aus dem Zustandsautomaten und aus B-150, nicht aus der Versorgung
Kosten und Komplexität	Größere mitgeführte Ausrüstung	In der Größenordnung vergleichbar, die Posten verschieben sich lediglich
Fahrzeuge	Zugfahrzeug und zweites Fahrzeug	Unverändert zwei Fahrzeuge. Standortleistungen verringern die Zuladung, sie machen das zweite Fahrzeug nicht entbehrlich

Der Vergleich trifft keine Auswahl. Beide Betriebsarten sind MUSS-Anforderungen nach B-140 und B-141, der Prüfstand muss folglich beide beherrschen. Über die Betriebsart entscheidet der Aufstellort. Auslegungsfall ist nach B-140 der autarke Betrieb.

Unterschied. Steht Stickstoff standortseitig zur Verfügung, entfällt die in Abschnitt 8.1 benannte Begrenzung der Kampagnenlänge. Kosten und Komplexität unterscheiden sich in der Größenordnung nicht maßgeblich, die Posten verschieben sich lediglich. Im autarken Betrieb liegen sie in der mitgeführten Ausrüstung, bei Standortversorgung in der Anpassung und in der Klärung im Vorfeld.

Die nach B-142 ausdrücklich geforderte Empfehlung lautet damit wie folgt. Eine Standortversorgung wird genutzt, wenn sie im Vorfeld zugesagt ist und damit feststeht, welches GSE nicht mitgeführt werden muss. Der autarke Betrieb bleibt gleichwohl der Auslegungsfall, da er an jedem Standort trägt. Die Standortversorgung ist keine Auslegungsgrundlage, andernfalls wäre der Prüfstand nicht mehr mobil, sondern an ausgestattete Standorte gebunden, was B-162 widerspricht. Die Betriebsart wird deshalb je Kampagne über die Standort-Checkliste festgelegt und nicht generell.

8.3 Betriebsablauf einer Testkampagne

In diesem Abschnitt wird die zeitliche Abfolge der Tätigkeiten von der Planung bis zur Abreise für beide Betriebsarten beschrieben. Ergebnis ist der Rahmen für die nach B-122 geforderten dokumentierten Prozeduren, nicht die Prozeduren selbst. Der in Abschnitt 7.4 beschriebene Zustandsautomat bildet den Ablauf eines einzelnen Tests ab, dieser Abschnitt betrachtet die Ebene darüber. Das Absetzen, Rangieren und Verankern ist in Abschnitt 9.3 beschrieben und wird hier lediglich eingeordnet. Die Prozeduren im Sinne von Arbeitsanweisungen mit Einzelschritten sind nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 nicht Gegenstand dieser Arbeit. Festgelegt werden Umfang, Reihenfolge und Freigabepunkte.

Als Personalstamm sind nach B-150 drei Personen vorgesehen, je eine für die Bedienung am Kontrollstand, für die Sicherheitsverantwortung und für die Unterstützung am Prüfstand außerhalb des Gefahrenbereichs. Die Zahl folgt nicht aus der Versorgung, sondern aus dem Zustandsautomaten. Im Zustand Access sind ein bis zwei Personen am Prüfstand zulässig, im Zustand Test niemand (siehe Abschnitt 7.4). Der physische Schlüssel nach dem LOTO-Prinzip bindet die Rollen aneinander, da er nur von einer Person getragen werden kann und der Kontrollstand zwei Aufnahmen vorhält (siehe Abschnitt 7.4 und Abschnitt 10.2).

Als Qualifikation des Personals sind mindestens die Einweisung nach BetrSichV und GefStoffV, eine HTP-spezifische Schulung, die Sachkunde für druckführende Systeme sowie gegebenenfalls die Sachkunde im Explosionsschutz erforderlich (B-151). Der Nachweis ist Bestandteil des Betriebskonzepts. Hinzu kommt für den Transport die Qualifikation des Fahrers des Zugfahrzeugs eine Fahrerlaubnis der Klasse BE.

Nach B-152 soll die Bedienung nach erfolgter Einweisung auch durch Studierende möglich sein. Dabei handelt es sich um eine Auslegungsvorgabe. Sie begründet eine zentrale Bedienoberfläche anstelle verteilter Bedienstellen sowie die Fehlertoleranz des Zustandsautomaten. Die Aufsicht durch qualifiziertes Personal bleibt Bedingung, die Rolle des Sicherheitsverantwortlichen ist nicht delegierbar.

Eine Testkampagne beginnt nicht mit der Anreise, sondern mit der Prüfung des Aufstellorts. Grundlage dafür ist die Standort-Checkliste nach B-162, die vor jedem Einsatz abzuarbeiten ist und in Anhang A.16 auf Konzeptebene wiedergegeben ist. Vor dem ersten Einsatz ist sie gegen den konkreten Standort zu detaillieren. Sie erfasst den Untergrund und dessen Tragfähigkeit, Stellfläche und Zufahrt, die verfügbaren Versorgungen, den Gefahrenbereich und dessen Absperrung, einen etwaigen Kontrollraum, den Entsorgungsweg, die Erdung sowie behördliche Freigaben.

Aus ihrem Ergebnis ergibt sich die Betriebsart nach Abschnitt 8.2 und damit die Zusammenstellung des GSE. Hier wird entschieden ob beispielsweise das Stromaggregat mitgeführt werden muss oder ob die Flaschenbatterie in Regelbestückung oder voll bestückt mitfährt. Damit ist die Checkliste nicht allein eine Sicherheitsprüfung, sondern zugleich die Grundlage der Beladung.

Die sicherheitstechnische Wasserversorgung ist dabei zwingend vorab zu klären, da sie nach F-550 Freigabebedingung ist und nach Abschnitt 8.1 nicht mitgeführt werden kann. Ebenso sind die Bereitstellung der Betriebsmedien und deren Menge vorab festzulegen, da daraus der Druckgasbedarf folgt (siehe Abschnitt 8.1). Zu klären ist ferner der Entsorgungsweg für die Sammelbehälter nach F-263, da hierfür ein Entsorgungsfachbetrieb erforderlich ist. Fehlt eine dieser Zusagen, findet die Kampagne nicht statt.

Anzumerken ist, dass die Beschaffung des HTP, die Freigaben und der Entsorgungsvertrag einen zeitlichen Vorlauf benötigen. Sie sind daher im Vorfeld mit ausreichendem Puffer zu veranlassen.

Die in Abschnitt 9.3 beschriebene Abfolge des Aufbaus wird im Anschluss ergänzt durch den Anschluss an den Standort-Schnittstellenblock nach F-624 in definierter Reihenfolge, die Erdung nach F-522 sowie den Aufbau des Kontrollstands einschließlich des Verlegens der Datenleitung. Als Zielzeit sind zwei Arbeitstage als weiches Ziel nach B-120 vorgesehen, die Einordnung dieses Werts findet sich in Abschnitt 9.3.

Vor der ersten Testfreigabe ist eine dokumentierte Funktions- und Dichtheitsprüfung aller Fluid- und Druckpfade durchzuführen (B-123). Der Umfang beläuft sich auf eine Druckprobe mit Inertgas, eine Funktionsprüfung der Aktorik sowie eine Überprüfung der Kalibrierung der Messkette. Anzumerken ist, dass das Auffinden von Undichtigkeiten nach dem Transport beim Prüfstand des Projekts AQUASONIC³ der größte Zeitfaktor bei der Inbetriebnahme ist (siehe Anhang A.20). Der Containeransatz beseitigt dabei den Wiederaufbau, nicht jedoch die Transportbelastung der Verbindungen (siehe Abschnitt 9.1).

Das Ergebnis dieser Prüfung ist Voraussetzung für die Betriebsfreigabe und damit für jeden Übergang aus dem Zustand Idle (siehe Abschnitt 7.4). An diesem Punkt endet die Aufbauphase, und der Zustandsautomat übernimmt den Betrieb.

Der Ablauf eines einzelnen Tests folgt dem in Abschnitt 7.4 beschriebenen Zustandsautomaten. Auf Kampagnenebene ist an dieser Stelle relevant, wie ein Test wiederholt wird. Möglich sind der direkte Weg zurück nach Pre-Test sowie der Weg über Access, der ein erneutes Betanken erlaubt.

Zwischen den Läufen fallen Tätigkeiten an, die den zeitlichen Rahmen einer Kampagne mitbestimmen. Dazu zählen die Spülung des HTP-Pfads vor und nach jedem Lauf (siehe Abschnitt 6.4) sowie die Kontrolle des Flaschendrucks über die Manometer und der Abgleich mit dem verbleibenden Bedarf (siehe Abschnitt 6.3). Die Nachlieferung von Betriebsmedien und der Flaschenwechsel sind Handlungen in den Zuständen Access oder Idle. Sie unterbrechen die Testfolge und sind deshalb zu planen und nicht spontan durchzuführen. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt je Lauf einschließlich der Metadaten nach Abschnitt 7.2.

Am Ende einer Testreihe wird über den Zustand Access nach dem Entleeren der Tanks der Zustand Idle erreicht (siehe Abschnitt 7.4). Der Transportzustand ist dadurch definiert, dass Tanks und Leitungen leer sind, der HTP-Pfad gespült und der Treibstoffpfad inertisiert ist (siehe Abschnitt 6.4). Die Spülung des Treibstoffstrangs mit Stickstoff fällt

einmal je Kampagne an und ist im Druckgasbedarf berücksichtigt (siehe Abschnitt 6.3). Die Entleerung erfolgt in die Transportgebinde, ohne dass Komponenten am Prüfstand demontiert werden müssen (F-262, F-263).

Die Entsorgung der verbliebenen Medien erfolgt über einen Entsorgungsfachbetrieb, der wie oben beschrieben vorab zu beauftragen ist. Eine Entsorgung durch Einleitung in die Umwelt oder in das Abwassernetz ist ausgeschlossen. Möglich ist, dass der Standort einen Entsorgungspfad für die entleerten Sammelbehälter bereitstellt. Dies ist vorab zu klären (siehe Abschnitt 8.2).

Der Abbau erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zum Aufbau. Das zeitliche Ziel ist mit der Aufbauzeit vergleichbar und ebenfalls ein weiches Ziel (B-121). Vor der Abfahrt ist die ordnungsgemäße Ladungssicherung im Container zu prüfen (siehe Abschnitt 9.1).

Den Abschluss einer Kampagne bildet die Dokumentation. Prüfprotokolle, Messdaten und Entsorgungsnachweise gehören zur Kampagne und sind Bestandteil der nach B-122 geforderten dokumentierten Prozeduren.

9 Transport- und Aufbaukonzept

Gegenstand dieses Kapitels ist es, die Plausibilität des Transport- und Aufbaukonzepts nachzuweisen. Hierzu wird das Kapitel in zwei Teile unterteilt. Zuerst wird der Transport des Prüfstands dargelegt, anschließend werden der Aufbau und das Bereitmachen am Einsatzort beschrieben. Der in Abschnitt 5.5 erhobene Massennachweis wird in diesem Kapitel verwendet, sein Inhalt jedoch nicht wiederholt. Die Prozeduren und Checklisten, die für den Transport und den Aufbau des Prüfstands erforderlich sind, sind Teil von Kapitel 8 und werden dort erläutert. Der Kontrollstand ist ebenfalls nicht in detaillierter Form Teil dieses Kapitels, alle Angaben dazu sind in Kapitel 10 zu finden.

Um die Mobilität des Prüfstands zu gewährleisten, muss das Gesamtsystem des Gespanns aus Zugfahrzeug und Anhänger betrachtet werden. Nur so lässt sich sicherstellen, dass der Prüfstand ordnungsgemäß transportiert werden darf.

9.1 Transport auf der Straße

Der Prüfstand soll auf öffentlichen Straßen transportiert werden und muss dementsprechend die Vorgaben der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) erfüllen. Daraus ergeben sich im Wesentlichen drei Prüfungen. Die erste betrifft das Gespann aus Anhänger und Zugfahrzeug und die Frage, ob es zulassungsfähig ist. Es folgt die ordnungsgemäße Position und Befestigung des Containers auf dem Anhänger. Die dritte Prüfung betrifft die Befestigung aller im Container verbauten Komponenten. Die Zuladung des Zugfahrzeugs wird in Abschnitt 9.2 behandelt.

Die Masse des Anhängers samt Container und allen darin befindlichen Komponenten wurde bereits in Abschnitt 5.5 nachgewiesen. Die zu erwartende Masse liegt innerhalb der zulässigen Gesamtmasse des Anhängers von 3.500 kg (siehe Abschnitt 5.5). Der Container wird grundsätzlich ohne befüllte Medientanks transportiert. Die Begründung dafür liegt im Gefahrgutrecht und wird in Abschnitt 2.3 behandelt, hier wird nur die Folge für die Massenverteilung betrachtet (B-105).

Die Auswahl des Anhängers, der den Container während des Transports trägt, ist maßgeblich für die Einhaltung der zulässigen Gesamtmasse. Da die zulässige Gesamtmasse für Anhänger und Zuladung gemeinsam gilt, geht jedes Kilogramm Eigengewicht des Anhängers unmittelbar von der verfügbaren Zuladung ab. Die Zuladung ist in diesem Fall der Prüfstand samt allen darin befindlichen Komponenten, sodass ein möglichst geringes Eigengewicht des Anhängers angestrebt wird.

Die Marktrecherche hat ergeben, dass ein einfacher Containeranhänger für 20-ft-Container mit rund 560 kg das geringste Eigengewicht bei gleicher zulässiger Gesamtmasse aufweist. Alternativen wie Tieflader oder Plattformanhänger liegen bei rund 750 kg. Die Differenz von rund 190 kg ist größer als jede Einzelmaßnahme, die im Innenausbau des Containers erreichbar wäre.

Der Container wird über Twistlock-Sicherungen an den Eckbeschlägen auf dem Anhänger gesichert, was keine zusätzlichen Befestigungsmittel erfordert. Auch die zulässige Gesamthöhe des beladenen Anhängers wird mit dieser Variante eingehalten.

In Tabelle 9.1 werden die Außenmaße des beladenen Anhängers den maximal zulässigen Außenmaßen nach StVZO gegenübergestellt. Alle drei Maße werden eingehalten, die Außenmaße des Containers passen in den Zulassungsrahmen.

Tabelle 9.1: Außenmaße des beladenen Anhängers gegen die Grenzen der StVZO. Quelle: eigene Zusammenstellung nach § 32 StVZO und Herstellerangaben

Maß	Beladener Anhänger mm	Zulässig nach StVZO mm	Reserve mm	Anmerkung
Breite	2.438	2.550	112	Containerbreite
Höhe	3.271	4.000	729	Containerhöhe 2.591 mm zuzüglich Ladehöhe 690 mm des Anhängers
Länge	7.500	12.000	4.500	Anhängerslänge

Container CONTAINEX LC 20 ft mit den Außenmaßen $6.058 \times 2.438 \times 2.591$ mm auf Containeranhänger Vlemmix 20FT. Die verbleibende Breitenreserve von 112 mm verteilt sich auf beide Längsseiten und lässt dort nur flach aufbauende Anbauteile zu.

Von den drei Maßen weist die Breite die geringste Reserve auf. Die verbleibenden 112 mm verteilen sich auf beide Längsseiten und lassen dort nur flach aufbauende Anbauteile zu, etwa die Ankerplatte der außen eingehängten Notdusche. Komponenten

mit größerer Bautiefe, wie die Außengeräte der beiden Klimanlagen, werden daher an der Bugwand angeordnet.

Die Stützlast eines Anhängers ist diejenige Last, die vom Anhänger vertikal nach unten auf die Anhängerkupplung des Zugfahrzeugs wirkt. Nach § 44 Absatz 3 StVZO muss sie mindestens 4 % der tatsächlichen Anhängerlast betragen, jedoch nicht mehr als 25 kg. Für die Auslegung wird dieser Mindestwert bewusst deutlich überschritten, weil eine höhere Stützlast die Fahrstabilität verbessert und die Zuladung des Zugfahrzeugs konservativ belastet.

Der beispielhaft gewählte Anhänger lässt 150 kg zu, das beispielhaft gewählte Zugfahrzeug 140 kg, der bindende Wert ist damit erreicht. Auf die Einhaltung der Stützlast ist bei der Detailauslegung der Massenverteilung im Container und bei der Positionierung des Containers auf dem Anhänger zu achten (siehe Abschnitt 12.2). Hinzu kommt, dass die Stützlast als Zuladung des Zugfahrzeugs gilt, dies darf bei der Berechnung der Zuladung nicht übersehen werden.

Während des Transports wirken Beschleunigungen auf Komponenten, die für Betriebslasten ausgelegt sind. Die Befestigung der dauerhaft im Container verbauten Komponenten muss diese Beschleunigungen aufnehmen und dafür sorgen, dass die Komponenten dauerhaft befestigt bleiben. Die Lastannahmen können der EN 12195 entnommen werden, in der die Beschleunigungsbeiwerte für den Straßentransport festgelegt sind (S-173). Insbesondere die Komponenten mit großer Masse müssen gesichert werden, dazu zählen HTP-Tank und Auffangwanne, Treibstofftank und Auffangwanne, Schaltschrank, Ground Frame mit Triebwerk sowie die Schutzschale (siehe Abschnitt 11.2). Die detaillierte Auslegung dieser Befestigungen ist nicht Teil dieser Arbeit (siehe Abschnitt 3.5).

Neben der Befestigung selbst ist die Dichtheit aller medienführenden Leitungen unter Transportbelastung ein Auslegungskriterium. Dies wurde aus den Erfahrungswerten des Projekts AQUASONIC³ an der Hochschule Bremen abgeleitet. Dort wird der Prüfstand für den Transport auseinandergebaut, und das Auffinden und Beheben von Undichtigkeiten nach dem Wiederaufbau ist der größte Zeitfaktor bei der Inbetriebnahme (siehe Anhang A.20). Der Containeransatz beseitigt den Wiederaufbau, nicht jedoch die Belastung der Verschraubungen während der Fahrt. Die Zeitersparnis stellt sich daher nur ein, wenn die Verbindungen von vornherein transportfest ausgeführt werden.

Die Dichtheitsprüfung bleibt fester Bestandteil des Aufbaus und wird in Abschnitt 9.3 beschrieben.

Komponenten, die nicht fest im Container verbaut sind, aber wie in Abschnitt 9.2 dargelegt in ihm transportiert werden, benötigen einen festen Stauplatz mit ordnungsgemäßer Sicherung.

9.2 Zugfahrzeug und mitgeführte Ausrüstung

Um den Anhänger zu bewegen, muss ein passendes Zugfahrzeug gewählt werden, das den fahrerlaubnisrechtlichen Anforderungen genügt. Daraus ergeben sich zwei Bedingungen, die das Zugfahrzeug erfüllen muss. Es muss eine zulässige Anhängelast von 3.500 kg erlauben und zugleich eine ausreichende eigene Zuladung für die mitgeführte Ausrüstung bereitstellen. Das zulässige Gesamtgewicht des Zugfahrzeugs ist durch die Fahrerlaubnisklasse BE selbst auf 3.500 kg begrenzt. Rechnerisch ergibt sich daraus eine Gesamtzugmasse von 7.000 kg, ob ein Fahrzeug diese auch zulässt, ist eine eigene Herstellerangabe und nicht die Summe der beiden Einzelgrenzen (B-102). Dieser Abschnitt prüft die Zuladung des Zugfahrzeugs und belegt damit die Plausibilität des Mobilitätskonzepts.

Grundsätzlich gilt, dass sämtliche Ausrüstung, die nicht im Container transportiert wird, auf dem Zugfahrzeug oder einem zweiten Fahrzeug mitgeführt werden muss. Um die zulässige Gesamtmasse des Anhängers einzuhalten, wurde die Stickstoffbereitstellung auf das Zugfahrzeug verlagert. Dazu gehören die Stickstoffflaschen samt Gestell, die Druckminderer der ersten Druckminderungsstufe sowie das Umbilical, das im Betrieb vom Zugfahrzeug zum Prüfstand verläuft. Das vollbestückte Flaschengestell mit sechs gefüllten Gasflaschen und Zubehör wiegt rund 610 kg, die Regelbestückung mit vier Flaschen liegt bei rund 450 kg. Hinzu kommen die Hubpfosten, die an den Ecken des Containers angesetzt werden, um ihn vom Anhänger zu heben und abzusetzen. Ein beispielhaft gewähltes Produkt wiegt für alle vier benötigten Stützen 184 kg. Diese zusätzliche Masse allein wäre im Gewichtsbudget des Anhängers nicht darstellbar.

Die zulässige Gesamtmasse des Zugfahrzeugs selbst darf 3.500 kg nicht überschreiten, andernfalls fällt das Fahrzeug aus der Fahrerlaubnisklasse B heraus und die Klasse BE greift nicht mehr. Dies begrenzt zugleich die maximale Zuladung des Fahrzeugs.

Außerdem muss die zulässige Anhängelast größer oder gleich der tatsächlichen Masse des Anhängers beim Transport sein, die ihrerseits die Grenze von 3.500 kg trägt. Die zulässige Gesamtzugmasse darf, wie die anderen Grenzen, in keinem Fall überschritten werden. Die Nutzlast ist der Anteil der zulässigen Gesamtmasse des Zugfahrzeugs, der nach Abzug des Eigengewichts verbleibt und von der mitgeführten Ausrüstung beansprucht wird. Die zulässige Stützlast des Zugfahrzeugs muss außerdem mindestens 140 kg betragen.

Die zulässige Gesamtzugmasse ist dabei der ausschlaggebende Parameter, der ein Fahrzeug für dieses Projekt qualifiziert. Sie liegt in Herstellerangaben häufig unterhalb der Summe aus zulässigem Gesamtgewicht und zulässiger Anhängelast. Ein Mercedes-Benz Sprinter Kastenwagen gibt beispielsweise eine Anhängelast von 3.500 kg frei, ist jedoch auf eine Lastzuggesamtmasse von 5.500 kg begrenzt (siehe Datenblatt im Anhang A.19). Bei einer Anhängerlast von 3.243,6 kg dürfte das Fahrzeug selbst damit nur noch rund 2.256 kg wiegen, was in der Größenordnung seines Leergewichts liegt, das Gespann wäre bereits mit unbeladenem Zugfahrzeug grenzwertig. Fahrzeuge, die die übrigen Kriterien augenscheinlich erfüllen, können also an dieser Grenze scheitern (B-160).

Als Beispielfahrzeug wurde ein Volkswagen Crafter 35 mit mittlerem Radstand, 120 kW Antriebsleistung und Heckantrieb gewählt. Die Fahrzeugkennwerte sind der Tabelle A.11 im Anhang gegen die Anforderungen gestellt. Zu erkennen ist, dass dieses Fahrzeug alle Anforderungen erfüllt. Die Auswahl dient dem Nachweis, dass ein solches Fahrzeug am Markt verfügbar ist, und stellt keine Beschaffungsempfehlung dar (siehe Abschnitt 3.5).

Die mitgeführte Ausrüstung wird nicht als eine feste Beladung des Zugfahrzeugs geführt, sondern in eine Grundausstattung und wählbare Blöcke getrennt. Die Grundausstattung fährt in jedem Fall mit. Sie umfasst das GSE ohne Druckgas, einschließlich der Erdung nach F-522, sowie die Stützlast des Anhängers und beläuft sich auf rund 796 kg. Hinzu kommt das Druckgas, das in der Regelbestückung mit vier Flaschen 320 kg wiegt und in der Mindestbestückung mit zwei Flaschen 160 kg. Damit sind von der Nutzlast des Beispielfahrzeugs von 1.223,4 kg rund 1.116 kg belegt. Es verbleibt eine Reserve von 107,4 kg bei einer Ausnutzung der Nutzlast von 91,2 %. Anzumerken ist, dass bei der Zuladung des Zugfahrzeugs mehrere Massen geschätzt wurden, etwa Werkzeug

und Ersatzteile mit 50 kg. Die verbleibende Reserve deckt Abweichungen in dieser Größenordnung ab.

Nicht auf dem Zugfahrzeug fahren die Gebinde der Betriebsmedien mit 233 kg und das Stromaggregat mit 230 kg. Beide sitzen auf dem zweiten Fahrzeug, das ohnehin zur Kampagne anreist und den Kontrollstand transportiert (siehe Kapitel 10). Bilanziert wird allein das Zugfahrzeug, da es über das Flaschengestell und das auf 15 m begrenzte Umbilical an den Prüfstand gebunden und damit in seiner Nutzlast kritisch ist (F-624). Für das zweite Fahrzeug besteht diese Bindung nicht, seine Nutzlast ist nicht ausgereizt (siehe Abschnitt 10.2).

Welche Blöcke gebraucht werden, hängt von der Versorgung des Aufstellorts beziehungsweise von der Anlieferung durch Fremdfirmen ab. Stellt der Standort elektrische Energie bereit, entfällt das Aggregat, werden Betriebsmedien angeliefert, entfallen deren Gebinde. Ist am Standort eine Stickstoffversorgung verfügbar, entfallen die Druckgasflaschen samt Gestell. Die Aufteilung auf die beiden Fahrzeuge ändert sich dadurch nicht, da Stromaggregat und Betriebsmedien ohnehin auf dem nicht nutzlastkritischen Fahrzeug mitfahren. Standortleistungen verringern damit die Zuladung des zweiten Fahrzeugs, sie machen es nicht entbehrlich. Die vollständige Aufstellung mit Massen, Herkunftsklassen und der Zuordnung der Blöcke befindet sich im Anhang (siehe Tabelle A.10).

Unabhängig von der Massenbilanz unterliegt der Transport der Betriebsmedien dem Gefahrgutrecht. Auf dem zweiten Fahrzeug werden HTP der Klasse 5.1 und Treibstoff der Klasse 3 gemeinsam befördert. HTP in der vorgesehenen Konzentration ist als UN 2015 der Verpackungsgruppe I zugeordnet und weder in begrenzten noch in freigestellten Mengen zugelassen. Bei einer Menge von 110 L wird die Freistellung nach ADR 1.1.3.6 deutlich überschritten, sodass das ADR in vollem Umfang anzuwenden ist. Daraus folgen Anforderungen an Verpackung, Fahrzeugkennzeichnung, Fahrzeugausrüstung und Qualifikation des Fahrers, die im Betriebskonzept abzubilden sind (S-170, siehe Kapitel 8).

Die Aufteilung der mitgeführten Ausrüstung auf zwei Fahrzeuge, von denen eines das Zugfahrzeug ist, ist der betriebliche Normalfall und setzt keine Standortversorgung voraus. Zum Einsatzort reisen ohnehin mehrere Personen an, und der Kontrollstand muss ebenfalls transportiert werden (siehe Kapitel 10). Ein Betrieb mit nur einem Fahrzeug ist damit nicht darstellbar. Das ist keine Frage der Reserven, sondern folgt aus dem in

Abschnitt 10.1 geführten Positionskonflikt zwischen der Bindung des Zugfahrzeugs an das Umbilical und dem geforderten Sicherheitsabstand des Kontrollstands.

9.3 Aufbau und Rangieren am Einsatzort

Um den Betrieb des Prüfstands am Einsatzort zu ermöglichen, muss der Container vom Anhänger abgesetzt werden. Erforderlich wird dies durch die Schubreaktion, die beim Zünden des zu testenden Triebwerks entsteht. Steht der Container auf dem Anhänger, verläuft der Kraftpfad über Federung und Bereifung, die für eine solche horizontale Last weder ausgelegt noch ausreichend steif sind. Nach dem Absetzen wird die Schubreaktion dagegen unmittelbar über die Aufstandsfläche in den Untergrund eingeleitet. Zusätzlich dient das Absetzen der Zugänglichkeit der Personentür und der Doppelflügeltüren am Heck des Containers.

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie das Absetzen des Containers konkret erfolgt, wie er am Einsatzort in Position gebracht wird, ob die Reibung zwischen Container und Untergrund die Schubreaktion aufnimmt und ob der Untergrund die Masse des Containers tragen kann. Hierdurch ergeben sich Bedingungen für den Aufstellort. Abschließend wird die Reihenfolge der Tätigkeiten bei der Inbetriebnahme dargestellt, zu der auch die Dichtheitsprüfung aus Abschnitt 9.1 gehört.

Das Absetzen des Containers vom Anhänger erfolgt mittels manueller Hubpfosten, die in die vier Eckbeschläge eingehängt werden. Von einer fest verbauten hydraulischen Anlage wurde abgesehen, da diese zu einer erheblich höheren Masse geführt hätte, die dauerhaft am Container mitgeführt würde, obwohl sie je Kampagne nur zweimal benötigt wird. Zusätzlich hätte sie die Komplexität des Gesamtsystems beträchtlich erhöht. Die manuellen Hubpfosten müssen den Container aus eigener Kraft anheben und absenken können, da ein Anhänger mit absenkbarer Pneumatik oder Hydraulik nicht vorgesehen ist. Die erforderliche Hubhöhe ergibt sich aus der Ladeflächenhöhe des gewählten Anhängers von 680 mm.

Zur Bestimmung der Masse für die Gewichtsbilanz wurde ein beispielhaftes Produkt der Marke ConFoot gewählt. Es besteht aus vier Stützen von jeweils 46 kg, die sich in Bauteile von höchstens 25 kg zerlegen lassen, um die Handhabung durch eine Person nach LasthandhabV zu gewährleisten (B-125). Die Auswahl dient dem Nachweis der

Verfügbarkeit und stellt keine Beschaffungsempfehlung dar (siehe Abschnitt 3.5). Nach dem Absetzen steht der Container auf dem Untergrund und die Hubpfosten werden entfernt (B-135).

Ist der vorgesehene Aufstellort für das Gespann nicht erreichbar, kann der Container stattdessen auf separate Räder abgesetzt werden, die an den vier unteren Eckbeschlägen befestigt werden. Die Räder sind gebremst und schwenkbar, sodass sich der Container in alle Richtungen bewegen und drehen lässt. Ein beispielhaft gewähltes Produkt der Marke Soltec wiegt mit vier Rollen zu je 25 kg insgesamt 100 kg. Die Rollen werden angesetzt, während der Container von den Hubpfosten getragen wird, anschließend wird er auf die Rollen abgelassen und kann verschoben werden. Dies ist nur auf harten und ebenen Böden möglich.

Alternativ besteht die Möglichkeit, den Container mittels eines Krans an den gewünschten Aufstellort zu heben. Der Winkel zwischen Hebeseil und Horizontale muss dabei mindestens 60° betragen, die zulässige Hebenutzlast von 6.500 kg liegt deutlich über der Containermasse von rund 2.683,6 kg (siehe Tabelle 5.3 und Anhang A.19).

Ebenso verfügt der beispielhaft gewählte Container über Staplertaschen mit einem lichten Maß von 355 × 105 mm und einem Abstand der Taschenmitten von 2.050 mm. Die alternativ verfügbare Ausführung mit reduziertem Taschenabstand von 950 mm scheidet aus, da für sie die Handhabung mit dem Stapler nur im leeren Zustand zulässig ist. Für die Handhabung ist eine Gabellänge von mindestens 2 m erforderlich, womit Standardstapler mit einer Gabellänge von 1,2 m für diese Anwendung ausscheiden (siehe Anhang A.19). Die Verfügbarkeit eines Krans oder eines geeigneten Staplers ist damit eine Bedingung an den Aufstellort und Bestandteil der Standort-Checkliste (B-162).

Rangierkonfiguration und Testkonfiguration sind zwei entgegengesetzte Zustände. Auf Rollen ist der Container absichtlich leicht verschiebbar, während für den Test das Gegenteil nachgewiesen werden muss. Vor der Inbetriebnahme des Prüfstands sind die Rollen daher zu entfernen, und der Container ist unmittelbar auf Antirutschmatten beziehungsweise Lastverteilplatten auf dem Untergrund abzusetzen. Ein Betrieb in einer der genannten Rangierkonfigurationen ist nicht vorgesehen, da die Schubreaktion des Triebwerks den leicht beweglichen Container verschieben und damit einen sicheren Betrieb ausschließen würde.

Um die Schubreaktion des zu testenden Triebwerks aufzunehmen, muss der Container gegen Wegrutschen auf dem Untergrund gesichert sein. Dies erfolgt über die Reibung zwischen Container und Untergrund, die aus der Eigenmasse des Containers resultiert. Der Rechnung liegt die Nominalmasse ohne Margen und ohne Betriebsmedien zugrunde, da eine geringere Masse zu geringerer Reibung führt und der Ansatz damit konservativ ist. Daraus ergibt sich eine Gewichtskraft von rund 24,2 kN. Die Reibwerte für verschiedene Untergründe und die daraus resultierenden Kräfte, die zum Verschieben des Containers erforderlich wären, sind in Tabelle 9.2 aufgeführt.

Tabelle 9.2: Reibwerte, Haltekraften und Sicherheiten gegen Wegrutschen.

Aufstellung	Reibbeiwert	Haltekraft kN	Sicherheit gegen	
			1 kN	5 kN
Eckbeschläge auf Beton, trocken	0,3	7,3	7,3	1,5
Eckbeschläge auf Antirutschmatten	0,6	14,5	14,5	2,9

Angesetzt ist die Gewichtskraft von 24,2 kN aus der Nominalmasse ohne Margen und ohne Betriebsmedien. Eine geringere Masse führt zu geringerer Reibung, der Ansatz ist damit konservativ. Gefordert ist nach B-134 eine Sicherheit von 2,0. Ohne Antirutschmatten wird sie im Envelope-Fall nicht erreicht, die Matten sind damit erforderlich und keine zusätzliche Vorsichtsmaßnahme. Der Ansatz $\mu = 0,6$ entspricht dem praxisbezogenen Rechenwert des Herstellers und liegt damit unterhalb des Messwerts von 0,86 sowie unterhalb des nach VDI 2700 Blatt 14 ermittelten Werts von 0,82 (siehe Anhang A.19).

Ohne zusätzliche Maßnahmen wird im Nennfall von 1 kN Schub eine Sicherheit von rund 7,3 gegen Wegrutschen erreicht, im Envelope-Fall von 5 kN jedoch nur rund 1,5. Die nach B-134 geforderte Sicherheit von 2,0 wird damit für den Envelope-Fall nicht eingehalten. Aus diesem Grund kommen Antirutschmatten unter den vier Eckbeschlägen zum Einsatz, die den Reibbeiwert auf einen Rechenwert von 0,6 anheben. Der Messwert liegt nach Herstellerangabe darüber, als praxisbezogener Rechenwert werden nach VDI 2700 Blatt 14 und 15 üblicherweise 0,6 angesetzt. Damit steigt die Sicherheit im Envelope-Fall auf rund 2,9 und im Nennfall auf rund 14,5. Die Matten sind somit keine zusätzliche Vorsichtsmaßnahme, sondern für den Envelope-Fall erforderlich.

Ein Kippen des Containers ist nicht maßgebend. Da die Schubreaktion in Längsrichtung wirkt, steht ihr die halbe Containerlänge als Hebelarm entgegen, während die Kippachse an der vorderen unteren Kante liegt. Die Sicherheit gegen Kippen beträgt im Nennfall rund 77 und im Envelope-Fall rund 15, bezogen auf eine Schubachse rund 0,95 m über der Aufstandsfläche und einen Hebelarm von 3,03 m. Der Einsatz von Erdankern wurde

verworfen, da diese auf Beton nicht setzbar sind und auf weichen Untergründen wegen der ausreichenden Reibung nicht erforderlich werden.

Die vom Container verursachte Flächenpressung beträgt rund 210 kPa, verteilt über die vier Eckbeschläge. Auf tragfähigem Beton wird dieser Wert als unkritisch bewertet, auf Schotter oder losem Untergrund als grenzwertig. Die Tragfähigkeit des Untergrunds ist deshalb Bestandteil der Standort-Checkliste nach B-162 (siehe Anhang A.16). In bestimmten Fällen kommen deswegen Lastverteilplatten zum Einsatz, die je nach Untergrund zu dimensionieren sind. Antirutschmatten und Lastverteilplatten können dabei gemeinsam eingesetzt werden.

Zu beachten ist, dass bei Verwendung von Lastverteilplatten die maßgebende Gleitfläche nicht mehr zwischen Eckbeschlag und Matte liegt, sondern zwischen Platte und Untergrund. Der wirksame Reibbeiwert wird damit vom Untergrund am Aufstellort bestimmt und ist nicht mehr allein durch die gewählten Hilfsmittel festgelegt. Eine entsprechende Prüfung des Aufstellorts ist daher vor dem Betrieb durchzuführen und Bestandteil der Standort-Checkliste (B-162, B-133, siehe Abschnitt 8.3). Im Falle des Aufstellorts am DLR-Standort Trauen ist keine Lastverteilung erforderlich, da sich dort der Untergrund aus Beton befindet.

Für die Inbetriebnahme des Prüfstands ergibt sich damit die folgende Reihenfolge der Tätigkeiten. Nach dem Eintreffen am Einsatzort wird der Aufstellort anhand der Checkliste geprüft und es werden die erforderlichen Matten beziehungsweise Platten ausgelegt. Anschließend wird der Container abgesetzt. Es folgt der Anschluss aller für den Betrieb erforderlichen Leitungen und Kabel. Abschließend ist eine Prüfung aller Systeme vorgesehen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, wesentlicher Bestandteil ist dabei die Überprüfung der Rohrleitungen auf Dichtheit (siehe Abschnitt 9.1).

Der Zielwert für den Aufbau beträgt zwei Arbeitstage und ist als weiches Ziel in den Anforderungen B-120 und B-121 definiert. Eine erhebliche Zeitersparnis gegenüber dem Prüfstand des AQUASONIC³-Projekts ist plausibel, da beim TERRA-Prüfstand die grundsätzliche Struktur fest im Container verbaut bleibt und nicht für jeden Betrieb neu aufgebaut werden muss. Eine belastbare Überprüfung des Zeitrahmens setzt den realen Aufbau voraus und ist nach dem in Abschnitt 3.5 beschriebenen Detaillierungsgrundsatz nicht Teil dieser Arbeit.

10 Kontrollstand

Während des Tests darf sich kein Personal im Gefahrenbereich aufhalten (F-500). Die Bedienung des Prüfstands erfolgt deshalb von einem Kontrollstand aus, an dem sich das Personal während des Tests aufhält.

Der Kontrollstand liegt nach Abschnitt 5.1 außerhalb der Systemgrenze des Prüfstands. Er gehört zum mitgeführten Equipment und zählt damit nicht in das Gewichtsbudget des Anhängers. Dieses Kapitel beschreibt daher nicht die Einrichtung und Auslegung des Kontrollstands, sondern die Variantenentscheidung und die Schnittstellen. Auch der einzuhaltende Sicherheitsabstand zwischen Kontrollstand und Prüfstand ist nach dem Grundsatz aus Abschnitt 3.5 nicht Teil dieser Arbeit, er folgt aus der Gefahrenbereichsbestimmung nach F-502 in der Detailauslegung. Die 100 m der Datenleitung sind eine Annahme zur Dimensionierung und zur Ermittlung des Gewichts (siehe Abschnitt 12.2).

Im Kontrollstand sitzt ausschließlich die Bedienebene, also Anzeige, Bedienung, Quittierung und Not-Aus. Die intelligente Steuerungsschicht und die Sicherheitskette verbleiben einschließlich der Datenerfassung im Container (Abschnitt 7.3). Grund ist, dass die Sicherheitsfunktion nicht von der Leitung zwischen Prüfstand und Kontrollstand abhängen darf.

Zu prüfen sind zwei Varianten. Die Integration des Kontrollstands in das Zugfahrzeug und ein separater Kontrollstand (B-161). Zuerst wird die Integration in das Zugfahrzeug geprüft, da sie bei Bestehen der Prüfung die einfachere Lösung wäre. Anschließend wird das Konzept der verbleibenden Variante dargelegt, abschließend werden die Schnittstellen definiert.

10.1 Prüfung der Integration im Zugfahrzeug

Die Integration des Kontrollstands in das Zugfahrzeug erscheint zunächst naheliegend: kein zweites Fahrzeug, kein zweiter Fahrer, kein separater Aufbau. Das Fahrzeug ist am

Einsatzort ohnehin anwesend und mit seinem geschlossenen, beheizbaren Aufbau als Aufenthaltsort grundsätzlich geeignet. Die Variante wird daher zuerst geprüft und nicht als Nebenvariante behandelt.

Aus dem beschriebenen Konzept ergibt sich jedoch ein Positionskonflikt. Das Flaschengestell der Druckgasversorgung bleibt am Einsatzort auf dem Zugfahrzeug (Abschnitt 9.2), und das Umbilical ist auf 15 m begrenzt (F-624). Das Zugfahrzeug steht damit zwangsläufig in unmittelbarer Nähe des Prüfstands. Der Kontrollstand muss dagegen außerhalb des Gefahrenbereichs liegen. Einzelne Standorte verfügen über gehärtete Kontrollbunker, die deutlich näher stehen dürfen, in Trauen beträgt dieser Abstand rund 10 m. Zulässig ist das allein wegen der baulichen Härtung. Ein Kastenaufbau bietet diese nicht, sein einziges Schutzprinzip ist der Abstand, und dieser ist durch das Umbilical belegt. Als Auslegungsgrundlage scheiden Bunker ohnehin aus, da sie nicht an jedem Standort vorhanden sind.

Beide Wege, den Konflikt aufzulösen, tragen nicht. Das Abladen des gefüllten Flaschengestells am Einsatzort widerspricht der Handhabungslogik aus Abschnitt 9.3 und kostet Aufbauzeit gegen B-120. Ein längeres Umbilical erhöht den Druckverlust im Zwischendruckstrang, dessen Auslegung gerade auf der Längenbegrenzung beruht.

Hinzu kommt, dass das Zugfahrzeug selbst eine Gefahrenquelle darstellt. In seinem geschlossenen Aufbau befinden sich während des Tests 320 kg Druckgasflaschen bei 200 bar. Ein Kontrollstand soll das Personal von der gespeicherten Energie des Systems trennen, hier befände es sich unmittelbar daneben.

Schließlich reicht die Nutzlast nicht aus. Nach der Bilanz aus Abschnitt 9.2 verbleiben selbst im günstigsten Fall, in dem das Zugfahrzeug allein die Grundausstattung und das Druckgas trägt, rund 107 kg Reserve. Bedienplatz, Rechner, Anzeigen, eine eigene Stromversorgung und gegebenenfalls eine weitere Person lassen sich damit nicht unterbringen. Ein größeres Zugfahrzeug löst dies nicht, da es die Grenze der Klasse B und damit die gesamte auf der Fahrerlaubnisklasse BE beruhende Argumentation kippt (Abschnitt 9.2). Dieses Argument wiegt allerdings am leichtesten, denn Nutzlast ließe sich beschaffen, der Positionskonflikt nicht.

Die Variante ist mit F-500 nur zu vereinbaren, wenn das Druckgaskonzept aufgegeben wird. Sie verletzt damit eine MUSS-Anforderung, sodass die K.-o.-Prüfung nach Abschnitt 3.4 greift und eine Nutzwertanalyse entfällt. Der Kontrollstand ist folglich ein

eigenständiges System mit eigenem Transport, und das in Abschnitt 9.2 beschriebene zweite Fahrzeug ist somit zwingend erforderlich. Das Zugfahrzeug bleibt funktional beteiligt, indem es die Druckgasversorgung stellt und das GSE transportiert, während des Tests ist es unbesetzt. Das zweite Fahrzeug transportiert den Kontrollstand.

10.2 Mitgeführter Kontrollstand

Da der Schutz des Personals auf Abstand und nicht auf baulicher Härtung beruht, muss der Kontrollstand weder Druckwelle noch Fragmente abhalten. Er muss lediglich transportiert, aufgestellt und angeschlossen werden. Gegen diese Randbedingung wird die Ausführung gewählt.

B-161 nennt hierfür zwei Möglichkeiten, einen zusätzlichen Container oder eine mobile Einheit. Der Zusatzcontainer wurde verworfen. Er erfordert einen eigenen Anhänger, eigene Hubmittel und eine eigene Verankerung und erzeugt damit genau den Aufbauaufwand, den das Containerkonzept beim Prüfstand beseitigt. Einen Schutzgewinn liefert er nicht, da der Abstand zum Prüfstand frei gewählt werden kann. Gewählt wurde daher eine transportable Einheit aus wenigen Transportkisten, die im zweiten Fahrzeug mitgeführt und am Einsatzort auf einem Tisch aufgebaut wird. Nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 wird die Einheit selbst nicht weiter ausgelegt.

Die Gründe, aus denen die Integration in das Zugfahrzeug ausscheidet, sind an dieses Fahrzeug gebunden und nicht an ein zweites, das zur Testkampagne ohnehin anreist. Das zweite Fahrzeug hängt an keinem Umbilical, trägt kein Druckgas und ist in seiner Nutzlast nicht ausgelastet, es kann frei positioniert werden. Damit es so bleibt, gilt als Betriebsregel, dass die Gebinde der Betriebsmedien, sofern sie im zweiten Fahrzeug transportiert werden, während des Tests nicht am Kontrollstand verbleiben.

Die Ausstattung fällt entsprechend schlank aus. Sie umfasst einen Bedienrechner, dessen Oberfläche den Betriebszustand jederzeit eindeutig anzeigt und dabei die Farbcodierung nach DIN EN 60073 verwendet (F-441), einen Not-Aus-Taster, der wie die Taster am Prüfstand unmittelbar den Zustand Safe auslöst (Abschnitt 7.5), zwei Aufnahmen für die physischen Schlüssel aus dem Zonenkonzept, da im Zustand Access bis zu zwei Personen am Prüfstand arbeiten (Abschnitt 7.4), die Darstellung des Videobildes vom Prüfstand (F-611) sowie eine eigene Stromversorgung, deren

Begründung in Abschnitt 10.3 folgt. Die Bedienkomplexität ist gering zu halten, da das System nach Einweisung auch von Studierenden bedient werden soll (B-152), vorgesehen ist deshalb eine zentrale Oberfläche statt verteilter Bedienstellen. Ein eigenständiger Kontrollstand ist bei Prüfständen dieser Größenordnung der Regelfall, ein Beispiel ist das Kontrollzentrum der UCT [16].

Der wesentliche Aufwand beim Aufbau besteht im Verlegen der Leitung zum Prüfstand. Die Bedieneinheit selbst bleibt in ihren Transportkisten vorkonfektioniert und muss lediglich angeschlossen werden. Steht am Standort ein dedizierter Kontrollraum zur Verfügung, kann dieser genutzt werden, die mitgeführte Einheit wird dann entweder nicht ausgepackt oder in diesem Raum aufgebaut. Dies ist eine standortabhängige Option und ausdrücklich keine Auslegungsgrundlage, da an vielen Standorten keine solche Infrastruktur vorhanden ist. Voraussetzung ist in jedem Fall, dass die Schnittstellen zum Prüfstand in beiden Aufstellungen dieselben sind. Da der Kontrollstand im zweiten Fahrzeug und nicht auf dem Anhänger transportiert wird, ist er nicht Teil der Masse des Gespanns und im Gewichtsnachweis nach Abschnitt 5.5 folgerichtig nicht enthalten.

10.3 Schnittstellen zum Prüfstand

Der Prüfstand und der Kontrollstand sind zwei getrennt transportierte Systeme, die erst am Einsatzort verbunden werden. Zu definieren sind vier Schnittstellen: die Übertragung der Mess- und Steuerdaten, die Videoverbindung, die Energieversorgung und die Sicherheitsverbindung (F-610 bis F-613).

Für alle vier gilt dasselbe Prinzip. Keine Schnittstelle darf eine Sicherheitsfunktion begründen, die vom Bestehen der Verbindung abhängt. Übertragen werden Bedienung und Anzeige, nicht Sicherheit. Hinzu kommt, dass die Ausführung robust gegenüber dem noch offenen Sicherheitsabstand sein muss, also unabhängig davon tragen muss, ob die Detailauslegung 50 m oder 200 m ergibt. Dieses Kriterium tritt an die Stelle der hier nicht geführten Abstandsrechnung. Tabelle 10.1 fasst die vier Schnittstellen zusammen, die Begründungen folgen anschließend.

Über die Datenverbindung nach F-610 werden Messwerte, Statusmeldungen und Bedienbefehle zwischen dem Rechner im Prüfstand und der Bedienoberfläche am Kontrollstand übertragen. Die Sensorleitungen selbst überqueren die Schnittstelle nicht,

Tabelle 10.1: Schnittstellen zwischen Prüfstand und Kontrollstand.

Nr.	Schnittstelle	Ausführung	Begründung
F-610	Mess- und Steuerdaten	Lichtwellenleiter	Überbrückt mehr als die 100 m Segmentgrenze von Kupfer-Ethernet und trennt beide Anlagen galvanisch. Die Messkette verbleibt vollständig im Prüfstand
F-611	Videoverbindung	Lichtwellenleiter, gemeinsam mit F-610	Keine Verriegelung hängt am Videobild, daraus folgt eine weiche Latenzanforderung. Eine eigene Leitung ist nicht erforderlich
F-612	Energieversorgung	Getrennt vom Prüfstand, mit unterbrechungsfreier Stromversorgung	Eine gemeinsame Speisung wäre ein gemeinsamer Ausfallpunkt. Der Übergang nach Safe bei Spannungsausfall am Container muss angezeigt und aufgezeichnet werden können
F-613	Sicherheitsverbindung	Hartverdrahtete Kupferleitung, Ruhestromprinzip	Unabhängig von Software und von der Stromversorgung des Kontrollstands. Leitungsbruch oder Trennen öffnet die Kette und löst Safe aus, damit ist F-432 ohne Überwachungslogik erfüllt

Für alle vier gilt, dass keine Schnittstelle eine Sicherheitsfunktion begründen darf, die vom Bestehen der Verbindung abhängt. Die Ausführung ist zudem robust gegenüber dem noch offenen Sicherheitsabstand zu wählen. Lichtwellenleiter und Kupferleitung werden gemeinsam verlegt und sind im Gewichtsbudget als Position 1.9 mit 100 m und 40 kg geführt.

da die Messwerte bereits im Container erfasst und verarbeitet werden (Abschnitt 7.3). Deshalb genügt eine einzige Leitung, und die Messkette verbleibt vollständig im Prüfstand.

Ausgeführt wird die Verbindung als Lichtwellenleiter. Kupferbasierte Ethernet-Verbindungen sind auf 100 m Segmentlänge begrenzt, die angenommene Distanz liegt genau auf dieser Grenze und kann sich in der Detailauslegung vergrößern. Ein Lichtwellenleiter überbrückt deutlich größere Entfernungen und erfüllt damit das genannte Robustheitskriterium. Zusätzlich trennt er Prüfstand und Kontrollstand galvanisch, die als getrennt geerdete Anlagen aufgestellt werden.

Die Videoverbindung nach F-611 nutzt denselben Übertragungsweg. Die Kameras gehören zur Sensorik des Prüfstands (Abschnitt 7.1) und erfassen den Gefahrenbereich sowie den Innenraum, hier wird lediglich ihr Übertragungsweg festgelegt. Das Videobild dient dem Bediener zur Verifikation und der Dokumentation. Die Freigabe der Zone für den Übergang nach Pre-Test beruht dagegen auf den Bewegungsmeldern, ergänzt um die physischen Schlüssel als davon unabhängige Ebene (Abschnitt 7.4). Keine Verriegelung hängt am Videobild. Daraus folgt eine weiche Latenzanforderung, weshalb das Videosignal den Datenpfad mitbenutzen darf und keine eigene Leitung erhält.

Fällt das Kamerabild aus, ist der Test deshalb nicht zwingend abubrechen. Der Bediener entscheidet situationsabhängig, ob ein Hold genügt oder ob der Prüfstand in den Zustand Safe zu überführen ist. Vor einer Zündung ist die Freigabe ohne Videobild jedoch nicht zu erteilen, da dem Bediener dann die eigene Sichtkontrolle fehlt.

Die Energieversorgung des Kontrollstands erfolgt getrennt von der des Prüfstands. Eine gemeinsame Speisung würde einen gemeinsamen Ausfallpunkt schaffen und ist deshalb nicht vorgesehen. Bei einem Spannungsausfall am Container geht der Prüfstand in den Zustand Safe, und genau dieser Vorgang muss am Kontrollstand angezeigt und aufgezeichnet werden können, bliebe der Kontrollstand von derselben Versorgung abhängig, wäre das nicht möglich. Der Leistungsbedarf am Kontrollstand ist gering und lässt sich je nach Standort über eine Batterie, ein Netzteil am zweiten Fahrzeug, einen standortseitigen Anschluss oder ein kleines Stromaggregat decken. Wie der Prüfstand benötigt auch der Kontrollstand eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, damit bei einer Versorgungsunterbrechung die Anzeige erhalten bleibt und der Kontrollstand geordnet heruntergefahren werden kann.

Die Sicherheitsverbindung nach F-613 ist als hartverdrahtete Kupferleitung ausgeführt und schließt die einfache Sicherheitsschleife des Prüfstands. Sie ist damit unabhängig von Software und von der Stromversorgung des Kontrollstands. Über die Sicherheitschelfe wird der Not-Aus-Taster am Kontrollstand angebunden, der in der Schließerkette des Prüfstands liegt (Abschnitt 7.5). Auch die Freigabe über die physischen Schlüssel wird über diese Leitung durchgeführt (Abschnitt 7.4). Die Auslegung folgt dem Ruhestromprinzip. Ein Leitungsbruch, ein Zug an der Leitung oder das Trennen der Verbindung öffnet die Kette und löst Safe aus. Damit ist F-432 erfüllt, ohne dass hierfür eine Überwachungslogik erforderlich wäre, denn der Verbindungsausfall wirkt physikalisch und nicht als softwareseitig erkannter Fehler.

Die Verbindung zwischen Prüfstand und Kontrollstand besteht somit aus einem Lichtwellenleiter und einer Kupferleitung, die gemeinsam verlegt werden. Getrennte Trassen würden die Unabhängigkeit beider Wege nicht erhöhen, da der maßgebliche gemeinsame Ausfallgrund die mechanische Beschädigung ist und diese ohnehin beide Wege trifft, sie führt über das Ruhestromprinzip in den sicheren Zustand. Im Gewichtsbudget ist die Leitung als Position 1.9 des mitgeführten Equipments mit 100 m und 40 kg geführt, einschließlich einer Trommel zum Auf- und Abwickeln. Der Wert ist eine Annahme zur Ermittlung der Gesamtmasse (Abschnitt 12.2). An beiden Enden sind Steckverbindungen vorgesehen, damit die Leitung für den Transport vollständig von beiden Systemen getrennt und ebenso an einen standortseitigen Kontrollraum angeschlossen werden kann. In der Detailauslegung ändert sich lediglich die Länge der Leitung, nicht ihre Ausführung.

11 Sicherheits- und Brandschutzkonzept

In diesem Kapitel erfolgt die generelle Einordnung des Sicherheits- und Brandschutzkonzepts. Die Maßnahmen, die ergriffen wurden, um das Konzept sicher zu machen, sind in den zugehörigen Kapiteln beschrieben: die Zonentrennung in Abschnitt 5.2, die Medientrennung und die Überdruckabsicherung in Abschnitt 6.3.6, der Zustandsautomat mit den Verriegelungen in den Abschnitten 7.4 und 7.5 sowie der Schutz durch Abstand in Kapitel 10. In diesem Kapitel werden die Maßnahmen nicht wiederholt, sondern die Gefährdungen geprüft und eingeordnet. Hinzu kommt, dass die verteilten Maßnahmen zusammengeführt werden und geprüft wird, ob die Gefährdungen vollständig abgedeckt sind.

Die vom Prüfstand ausgehenden Gefährdungen werden in diesem Kapitel identifiziert und nach Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß eingestuft. Die Maßnahmen werden außerdem danach unterschieden, ob sie präventiv wirken, also die Eintrittswahrscheinlichkeit senken, oder ob sie das Schadensausmaß begrenzen. Die Reihenfolge der gewählten Maßnahmen folgt dem dreistufigen Verfahren nach EN ISO 12100. Dabei kommen zuerst die konstruktive Vermeidung, dann technische Schutzmaßnahmen und zuletzt organisatorische Regeln zum Einsatz. Nach den beschriebenen Maßnahmen wird das Risiko erneut eingestuft, verbleibende Restrisiken werden in Abschnitt 12.2 geführt.

Die Prozeduren und Checklisten selbst sind Gegenstand von Kapitel 8. Ergibt sich aus einer Gefährdung eine organisatorische Maßnahme, so wird sie hier benannt, ihre Ausführung jedoch dort beschrieben. Die Auslösebedingungen und die Reaktion der Sicherheitseinrichtungen sind in Abschnitt 7.5 beschrieben, hier wird lediglich die Detektions- und Wirkseite erläutert. Das zu testende Triebwerk bleibt eine Black Box, betrachtet wird ausschließlich sein Versagen als Lastfall, die innere Auslegung ist nicht Teil dieser Arbeit. Nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 wird nur die Schutzschale vertieft gerechnet, da ihre Masse in der Gewichtsbilanz eine erhebliche Rolle spielt und ihre Geometrie den Zonenzuschnitt bindet.

Zuerst folgen die Gefährdungen und der daraus abgeleitete auslegende Lastfall. Im Anschluss werden die passiven Maßnahmen beschrieben, in denen die Schutzschale den Hauptteil bildet. Es folgen die aktiven Maßnahmen, also Detektion, Löschung und Notfalleinrichtungen. Abgeschlossen wird mit der Normkonformität und der Frage, welche Nachweise dieses Konzept vorbereitet und welche erst am gebauten Prüfstand zu führen sind.

11.1 Gefährdungsanalyse

Bei der Gefährdungsanalyse wird der aufgebaute Zustand am Einsatzort einschließlich des mitgeführten Equipments und der Betriebsmedien in allen Betriebszuständen nach Abschnitt 7.4 betrachtet. Nicht Teil sind der Transport, dessen Gefährdungen bereits in Kapitel 9 behandelt werden, und die innere Auslegung des Triebwerks. Die zu schützenden Güter sind in dieser Reihenfolge abgestuft: zuerst Personen, dann die Umwelt und zuletzt die Anlage selbst. Diese Reihenfolge bestimmt die Einstufung des Schweregrads. Die Gefährdungen selbst stammen aus den Stoffeigenschaften nach Abschnitt 2.2, aus dem R&I-Fließbild, aus dem Zonenlayout, aus den Fehlerbildern nach Abschnitt 7.5 sowie aus den herangezogenen Referenzständen.

Die Bewertung erfolgt in einer 5×5-Matrix aus Schweregrad und Eintrittswahrscheinlichkeit nach ECSS-M-ST-80, die Skalen zeigt Tabelle 11.1. Eine Bewertung nach DIN EN ISO 13849-1 erfolgt an dieser Stelle nicht, da der dortige Risikograph den erforderlichen Performance Level einer einzelnen Steuerungsfunktion bestimmt und nicht das Gesamtrisiko der Anlage. Die Ermittlung des Performance Levels erfolgt nach S-140 gesondert und ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Es handelt sich bei der Einstufung um eine Einschätzung in der Konzeptphase auf Basis von Stoffdaten und Referenzständen, nicht um eine statistisch belegte Bewertung. Zweck ist die Priorisierung der Maßnahmen, nicht der Nachweis eines Risikoniveaus. Je Gefährdung werden zwei Einstufungen vorgenommen, eine vor und eine nach der Maßnahme. Die Einstufung vorher bezeichnet das Risiko ohne die in der Maßnahmenpalte genannten Maßnahmen, bei ansonsten bestimmungsgemäßigem Betrieb nach den Zuständen aus Abschnitt 7.4.

Tabelle 11.1: Bewertungsskalen der Risikoeinstufung. Festlegung nach ECSS-M-ST-80

Wert	Schweregrad	Bezug auf die Schutzgüter
5	katastrophal	Tod oder irreversible Schädigung einer Person
4	kritisch	Schwere, aber reversible Schädigung einer Person. Oder Stoffeintrag über den Aufstellort hinaus
3	erheblich	Leichte Schädigung einer Person. Oder örtlich begrenzter Stoffeintrag. Oder Verlust des Prüfstands
2	spürbar	Kein Personenschaden. Sachschaden am Prüfstand, Abbruch der Kampagne
1	vernachlässigbar	Kein Schaden, Störung im Ablauf

Wert	Eintrittswahrscheinlichkeit	Bezug auf den Betrieb
E	maximal	Tritt in jeder Testkampagne auf
D	hoch	Tritt etwa in jeder zehnten Kampagne auf
C	mittel	Tritt gelegentlich auf, etwa in einer von hundert Kampagnen
B	gering	Tritt selten auf, etwa in einer von tausend Kampagnen
A	minimal	Nahezu ausgeschlossen, über die Lebensdauer nicht erwartet

Die Gefährdungen sind in sechs Gruppen unterteilt: Gefahren, die vom HTP ausgehen, solche vom Treibstoff und solche vom Druckgas, dazu die Gefahren des Triebwerks, der übrigen Anlage und des Betriebs sowie die Gefahren für die Umwelt. Hinzu kommt eine Eigenheit des mobilen Prüfstands. Die Standortabhängigkeit ist selbst eine Gefahrenquelle. Untergrund, Zugänglichkeit, Löschwasserversorgung, Entfernung zur nächsten Hilfe und die benachbarten Einrichtungen sind in der Konzeptphase nicht bekannt und lassen sich daher nicht abschließend bewerten. Gefährdungen, die ein stationärer Stand einmalig über seine bauliche Umgebung abdeckt, muss ein mobiler Prüfstand entweder mitführen oder über die Standort-Checkliste nach B-162 auffangen.

Das Medium HTP ist nicht brennbar, sondern ein Oxidator. Damit kehrt sich die übliche Brandschutzlogik um. Der Stoff liefert nicht den Brennstoff, sondern den Sauerstoff, mit dem andere Stoffe reagieren. Hinzu kommt, dass die Zersetzung von HTP zu Wasser und Sauerstoff exotherm verläuft. Daraus folgen zwei Wirkungen, von denen jeweils eine eigene Gefahr ausgeht. Ein Druckaufbau in geschlossenen Räumen und eine Anreicherung der Atmosphäre mit Sauerstoff sind Ausgangspunkte von Gefahren. Konkret zu benennen ist außerdem die Selbstentzündung an organischem Material ohne jede

weitere Zündquelle, die in der Gefahrstoffliteratur belegt ist [7, 9]. Die Stoffeigenschaften selbst sind in Abschnitt 2.2 beschrieben.

Eine explosionsfähige Atmosphäre ist im Explosionsschutzrecht über atmosphärische Bedingungen definiert, betrachtet wird also ausschließlich ein Gemisch mit Luft. Die durch die HTP-Zersetzung entstehende Sauerstoffanreicherung fällt damit nicht in diesen Rahmen, und das Explosionsschutzdokument nach F-520 deckt diesen Fall nicht mit ab. Aus diesem Grund kommt zusätzlich ein Sauerstofftransmitter zum Einsatz, geführt als Position 2.16 des Gewichtsbudgets (siehe Tabelle A.7 im Anhang). Er erfasst die Veränderung der Atmosphäre in beide Richtungen, sowohl die Anreicherung durch die Sauerstofffreisetzung des HTP als auch einen Mangel, wie ihn etwa eine Stickstoffleckage hervorruft. Die Gasdetektion schließt damit gezielt eine Lücke des Explosionsschutzrechts.

Die vom Treibstoff ausgehende Explosionsgefahr ist demgegenüber der Regelfall und vom Normenrahmen vollständig abgedeckt, weshalb hier nur die Einordnung erfolgt. Vom Druckgas geht eine Gefahr über die gespeicherte Energie aus, namentlich durch das Berstversagen eines Druckraums und durch das Peitschen einer gelösten Leitung. Hinzu kommt der Sauerstoffmangel infolge ausströmenden Stickstoffs in den geschlossenen Räumen des Containers. Eine eigenständige Gefährdung ist schließlich das Zusammenführen von HTP und Treibstoff außerhalb der Brennkammer. Die zugehörigen Maßnahmen sind in Abschnitt 6.3.6 beschrieben.

Aus der Bewertung ragt eine Gefährdung heraus. Das Triebwerksversagen ist durch die mögliche Eskalation bis zur Beschädigung des HTP-Tanks besonders risikoreich. Hinzu kommt, dass dieses Ereignis als einziges nicht durch die Steuerung beherrschbar ist, da es schneller abläuft, als eine Reaktion erfolgen kann. Detektion und Abschaltung greifen hier nicht. Aus diesem Grund kommt für diese Gefährdung als einzige eine konstruktive Maßnahme zum Einsatz, die Schutzschale, die den HTP-Tank gegen ein Versagen am Triebwerk abschirmt.

In der Gefährdungsbetrachtung des Triebwerks wird nach Schweregrad in drei Fälle unterschieden. Fall A deckt Leckagen oder einen Brand ohne Kammerbersten ab. Diese Szenarien sind über Detektion, Abschaltung und Löschung beherrschbar. Fall B deckt das Bersten der Brennkammer infolge einer Deflagration ab, dessen Wirkung über Fragmentwurf und Thermostrahlung eintritt. Fall C deckt eine Massendetonation des angesammelten Gemischs ab. Maßgebend für die Auslegung ist nicht der schwerste

denkbare, sondern der schwerste glaubwürdige dieser Fälle. Dieser wird als Maximum Credible Event bezeichnet.

Von einer Massendetonation kann aus drei Gründen abgesehen werden. Erstens ist die Brennkammer zur Düse hin offen und läuft leer, was in der Praxis bedeutet, dass bei einem Zündversagen der überschüssige Treibstoff aus der Düse abläuft und sich nicht in der Kammer sammelt. Zweitens zerstäubt der Injektor die Medien aktiv, weshalb die über das Verhältnis von Misch- zu Reaktionszeit bestimmte Bedingung für eine hohe Ausbeute nicht erfüllt ist. Drittens zeigt die Unfallauswertung des DDESB für Wasserstoffperoxid örtlich begrenzte Schäden und eine Fragmentgefährdung im Nahfeld, jedoch keine Massenreaktion [10].

Damit ist Fall B das Maximum Credible Event und der Lastfall, nach dem die Schutzschale auszulegen ist. Offenzulegen ist, dass dieser Fall gesetzt und nicht aus einer Fehlerbaumanalyse hergeleitet wurde, dass der Berstdruckfaktor eine Annahme ist und dass als Bezugsfall Kerosin angesetzt wurde. Die Bemessung und die zugehörige Rechnung folgen in Abschnitt 11.2.

Aus demselben Lastfall folgt eigentlich auch der Gefahrenbereich nach F-502. Das Werkzeug hierfür wäre die Quantity Distance über die TNT-Äquivalenz. Für HTP existiert jedoch kein tabellierter Wert, und der in der Literatur verfügbare Wert bezieht sich auf eine Konzentration von 98 % [10]. Nach F-200 ist für die Sicherheitsauslegung eine Konzentration bis 100 % einhüllend, sodass dieser Wert unterhalb des abzudeckenden Bereichs liegt. Der vom DDESB vorgeschlagene Ersatzweg führt über das Fragmentwurfpotenzial in Anlehnung an Hydrazin. Die dortigen Abstände gelten allerdings ausdrücklich für den Fall, dass kein Fragmentschutz umgesetzt ist, und sind daher auf den vorliegenden Prüfstand nicht unmittelbar übertragbar. Die Methode zur Ermittlung des Sicherheitsabstands ist damit benannt, ein Wert wird an dieser Stelle nicht festgelegt. Der Punkt wird in Abschnitt 12.2 geführt.

Tabelle 11.2 fasst die identifizierten Gefährdungen mit ihrer Einstufung vor und nach der Maßnahme zusammen und verweist jeweils auf den Abschnitt, in dem die zugehörige Maßnahme beschrieben ist. Die Maßnahmen selbst folgen in den beiden nächsten Abschnitten, zuerst die passiven, dann die aktiven.

Tabelle 11.2: Gefährdungen mit Einstufung vor und nach der Maßnahme. Vorgehen nach EN ISO 12100, Einstufung nach ECSS-M-ST-80

Nr.	Gefährdung	Vorher	Nachher	Maßnahme	Abschnitt
<i>Gefahren aus dem Oxidator HTP</i>					
G1	Exotherme Zersetzung mit Druckaufbau im geschlossenen Raum	D5	B3	Werkstoffwahl 1.4404, Reinigung und Passivierung, Filter, Druckentlastung, Temperaturüberwachung	6.1, 7.1
G2	Sauerstoffanreicherung der Atmosphäre	D4	B3	Sauerstofftransmitter, Belüftung der Tankzone. Vom Explosionsschutzrecht nicht abgedeckt	11.3
G3	Selbstentzündung an organischem Material ohne Zündquelle	D4	B3	Ausschluss unverträglicher Werkstoffe, Bodenauskleidung, Sauberkeitsregime	6.1, 11.2
G4	Hautkontakt mit sofortiger Schädigung	D4	C2	Notdusche nach EN 15154, persönliche Schutzausrüstung, Zugangsregelung über den Zustandsautomaten	11.3, 7.4
G5	Austritt und Ansammlung im Container	C4	B2	Auffangwannen, Bodenauskleidung, Sammelbehälter, Berieselung	11.2
<i>Gefahren aus dem Treibstoff</i>					
G6	Explosionsfähige Atmosphäre	C5	B2	ATEX-Zoneneinteilung, Ex-Geräte, Belüftung, Erdung. Vom Normenrahmen vollständig abgedeckt	11.1, 11.3
G7	Brand des Treibstoffs	C4	B2	Zonentrennung als Brandabschnitt, Flammenmelder, Löschmittel	11.2, 11.3
<i>Gefahren aus dem Druckgas</i>					
G8	Berstversagen eines Druckraums	C5	A3	Auslegung nach Druckstufe, Sicherheitsventile, Zwischendruckkonzept begrenzt den Druck im Container	6.3
G9	Peitschen einer gelösten Leitung	C4	A2	Leitungssicherung, Zugangsverbot in den Zuständen Pre-Test, Test und Post-Test	7.4

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 11.2

Nr.	Gefährdung	Vorher	Nachher	Maßnahme	Abschnitt
G10	Sauerstoffmangel durch ausströmenden Stickstoff	C5	B3	Gasdetektion in beide Richtungen, Belüftung der Tankzone	11.3
<i>Gefahren aus dem Triebwerk</i>					
G11	Leckage oder Brand ohne Kammerbersten (Fall A)	D3	B2	Detektion, Abschaltung über die Sicherheitskette, Löschung	7.5, 11.3
G12	Bersten der Brennkammer durch Deflagration (Fall B)	C5	B3	Schutzschale nach dem Schattenwurfprinzip. Einzige rein konstruktive Maßnahme, weil das Ereignis schneller abläuft als jede Reaktion	11.2
G13	Massendetonation des angesammelten Gemischs (Fall C)	A5	entfällt	Als nicht glaubwürdig verworfen, Begründung in Abschnitt 11.1	11.1
G14	Thermostrahlung und Abgasstrahl aus der Hecköffnung	C4	B2	Gefahrenbereich nach F-502, Zonenfreigabe über Bewegungsmelder	7.4
<i>Gefahren aus Anlage und Betrieb</i>					
G15	Zusammenführen von HTP und Treibstoff außerhalb der Brennkammer	C5	A3	Getrennte Stränge, Rückschlagsicherung, Spülkonzept	6.3, 6.4
G16	Elektrische Gefährdung und fehlender Potentialausgleich	C4	B2	Erdung nach F-522, Trennbarrieren, unterbrechungsfreie Stromversorgung	11.2
G17	Ausfall der Energieversorgung im Test	D3	B1	Ruhestromprinzip, stromlos ist der sichere Zustand, Übergang nach Safe	7.5
G18	Person in der Zone während des Tests	C5	A4	Zustandsautomat, Bewegungsmelder, physische Schlüssel, Not-Aus	7.4, 7.5
G19	Wegrutschen des Containers durch die Schubreaktion	C4	B2	Antirutschmatten unter den Eckbeschlägen, Nachweis in Abschnitt 9.3	9.3
G20	Undichtigkeit nach dem Transport	D4	B2	Transportfeste Verbindungen, Dichtheitsprüfung als Bestandteil des Aufbaus	9.3

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 11.2

Nr.	Gefährdung	Vorher	Nachher	Maßnahme	Abschnitt
<i>Gefahren für die Umwelt</i>					
G21	Austritt wassergefährdender Stoffe in den Untergrund	C3	B2	Auffangwannen, Bodenauskleidung, Sammelbehälter nach WHG und AwSV	11.2
G22	Kontaminiertes Lösch- und Spülwasser	C3	C3	Rückhaltung. Die Bodenschwelle fasst nur rund 266 L, F-560 ist damit nicht erfüllt	12.2
G23	Schallemission am Aufstellort	E2	E2	Keine Abschätzung durchgeführt, F-563 bleibt unerfüllt	12.2
<i>Gefahren aus der Standortabhängigkeit</i>					
G24	Untergrund, Zugänglichkeit und Löschwasserversorgung unbekannt	D4	C3	Standort-Checkliste nach B-162	8.2
G25	Entfernung zur nächsten Hilfe und benachbarte Einrichtungen	D4	C3	Standort-Checkliste nach B-162, betreiberseitige Gefährdungsbeurteilung	8.2

Die Gefährdungen sind in sechs Gruppen unterteilt, ergänzt um die Standortabhängigkeit als eigene Gefahrenquelle des mobilen Prüfstands. Die vollständige Fassung mit Ursache, Wirkung und Beschreibung der Maßnahme je Gefährdung findet sich im Anhang. Die Gefährdungsidentifikation und die Reihenfolge der Maßnahmen folgen EN ISO 12100, die Einstufung folgt den Skalen aus Tabelle 11.1. Der Buchstabe steht für die Eintrittswahrscheinlichkeit, die Ziffer für den Schweregrad. Vier Gefährdungen lassen sich mit den vorgesehenen Maßnahmen nicht auf ein geringes Risiko senken und sind deshalb in Abschnitt 12.2 als offene Punkte geführt.

11.2 Passive Schutzmaßnahmen

Eine Schutzmaßnahme ist dann passiv, wenn sie ohne Detektion, ohne Energie und ohne Bedienhandlung wirkt. Dies beschreibt die erste Stufe der EN ISO 12100, also die konstruktive Vermeidung und Begrenzung der Gefahr. Zu diesen Maßnahmen, die in diesem Abschnitt erläutert werden, gehören die Schutzschale, die Zonentrennung als Brandabschnitt, die Werkstoffwahl, die Rückhaltung der Medien, die Erdung sowie die Fluchtwege. Der Schwerpunkt dieses Abschnitts liegt auf der Auslegung der

Schutzschale. Bei allen übrigen Maßnahmen folgt lediglich die Einordnung oder ein Rückverweis.

Die Aufgabe der Schutzschale ist es, im Falle eines Triebwerksversagens eine Eskalation zu verhindern. Sie schirmt die sicherheitskritischen Komponenten des Prüfstands gegen Fragmente ab, die beim Bersten der Brennkammer entstehen. Dem Schutz von Personen dient sie dagegen nicht. Der Personenschutz läuft über die Entfernung zwischen Prüfstand und Kontrollstand, da sich Personen während eines Tests ausschließlich am Kontrollstand aufhalten (F-430, F-500 und F-502). Anzumerken ist außerdem, dass die Schutzschale nicht als Explosionsrückhaltung dient. Ein Rückhalt der Druckwelle wird nach F-542 nicht gefordert und dementsprechend nicht ausgelegt. Eine Druckwelle kann für die Komponenten in der Umgebung des Triebwerks ein maßgeblicher Auslegungstreiber sein. Hierbei handelt es sich jedoch um eine Detailauslegung, die nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 nicht behandelt wird.

Der vordere Bereich des Containers um die Triebwerkszone herum ist bewusst als Opferbereich ausgeführt. Das 1,2 mm dicke Blech der Containerhülle hält Fragmente nicht nennenswert auf. Abgeschirmt wird ausschließlich in Richtung der Trennwand TW1 und des dahinter liegenden Aufbaus des Prüfstands. Seitlich austretende Fragmente wirken nach außen und damit auf den Absperrradius nach F-502. Das zugehörige Prinzip ist in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Die Schutzschale sitzt so nah wie möglich am Triebwerk und schattet dadurch die Trennwand TW1 ab. Dadurch kann sie ein Vielfaches kleiner ausfallen als die Trennwand, was Masse und Bauraum einspart. Ihre Größe ergibt sich über den Strahlensatz und wurde für die Massenabschätzung überschlägig ermittelt. Die endgültige Geometrie folgt aus der Detailauslegung und ist nicht Teil dieser Arbeit (siehe Abschnitt 3.5). Die überschlägige Rechnung ist in Tabelle A.13 im Anhang nachzuvollziehen.

Für die Auslegung der Wandstärke existiert kein etabliertes Verfahren, das sich an dieser Stelle unmittelbar anwenden lässt. Aus diesem Grund wurde das Ergebnis auf mehreren voneinander unabhängigen Wegen geprüft. Der erste Weg ist eine eigene Rechnung über das Ausscheren eines Pfropfens aus der Fragmentenergie und der Scherfestigkeit. Der zweite Weg ist eine Skalierung anhand des vergleichbaren Projekts Atlas, bei der die dort verbaute Wandstärke über das Schubverhältnis heruntergerechnet wurde [4]. Der dritte Weg ist dieselbe Skalierung anhand des Projekts MRETS [5]. Die ersten beiden

Wege liegen mit 9,23 mm und 9,08 mm dicht beieinander, der dritte Vergleichswert liegt mit 5,60 mm deutlich darunter. Grund dafür ist, dass bei MRETS die Schale über eine ballistische Normklasse spezifiziert und nicht gegen einen Fragmentlastfall gerechnet wurde. Als Bemessungsgrundlage wurde dieser Weg daher verworfen. Auf den ungünstigeren der beiden verbleibenden Werte wurde ein Sicherheitsbeiwert von 1,5 angewendet, was einer konservativen Annahme entspricht (siehe Abschnitt 3.6). Daraus folgt eine rechnerische Wandstärke von 13,85 mm, ausgeführt mit 14 mm. Die Schutzschale besteht damit aus Baustahl S355 in den Abmessungen $850 \times 850 \times 14$ mm und wiegt 79 kg. Sie ist als Position 5.2 im Gewichtsbudget geführt (siehe Tabelle A.7 im Anhang). Die Rechnung ist in Tabelle A.13 im Anhang nachzuvollziehen.

Diese Berechnung dient der Massenabschätzung für das Gewichtsbudget. Sie ist weder eine Schutzauslegung noch eine Festigkeitsauslegung und stellt keine Fertigungsfreigabe dar. In der Detailauslegung ist sie erneut und mit belastbaren Eingangsgrößen durchzuführen. Die dominierende Unsicherheit ist die angenommene Fragmentgröße, aus der die Wandstärke unmittelbar folgt. Auch die Referenzierung auf das Projekt Atlas ist mit einer Unsicherheit behaftet, da die zugehörige Veröffentlichung keine Auslegung enthält und die dortige Wandstärke einer Katalogstärke entspricht. Wie diese Dicke zustande gekommen ist, lässt sich daher nicht nachvollziehen. Die Referenz auf Atlas ist somit ein Plausibilitätsanker und kein Beleg.

Die weiteren passiven Schutzmaßnahmen beginnen mit der Zonentrennung. Diese wirkt als Trennung von Brandabschnitten und begrenzt die Ausbreitung von Gasen und Feuer zwischen den Zonen. Genauer erläutert wird sie in Abschnitt 5.2. Auch die Werkstoffwahl ist eine passive Schutzmaßnahme. An den sicherheitsrelevanten Stellen kommen ausschließlich Werkstoffe zum Einsatz, die das Risiko nicht erhöhen. Ein Beispiel hierfür ist die nichtbrennbare Dachdämmung. Besonders zu benennen ist, dass hochkonzentriertes HTP in Verbindung mit zellulosehaltigen Materialien ohne weitere Zündquelle zur Selbstentzündung führen kann [9]. Der für das Gewichtsbudget gewählte Container wird serienmäßig mit einem Holzboden ausgeliefert. Daraus folgt als konstruktive Vermeidung, dass der Boden dort metallisch abzudecken ist, wo HTP auf ihn gelangen kann. Für die Tankzone ist dies im Gewichtsbudget berücksichtigt. In der Triebwerkszone hängt der Umfang von der Leitungsführung ab und ist damit Detailauslegung (siehe Abschnitt 12.2).

Die Rückhaltung austretender Medien ist konstruktiv über zwei Auffangwannen unter den Tanks gelöst, die jeweils den vollständigen Tankinhalt aufnehmen können (F-561). Zusätzlich ist eine umlaufende Schwelle der Bodenauskleidung als zweite Rückhalteebene vorgesehen. Gegen elektrostatische Zündquellen sind am Einsatzort eine Erdung und ein Potentialausgleich nach F-522 herzustellen. Zu beachten ist ferner der Vent-Pfad des Treibstoffs, an dem eine Flammendurchschlagsicherung vorzusehen ist. Schutzziel ist dabei der Rückschlag in den Behälter und nicht die Emission der austretenden Gase. Schließlich erfolgt eine Beurteilung der Fluchtwege nach F-543. Jede Zone erhält eine nach außen aufschlagende Tür, ein Durchgang in den Trennwänden ist nicht vorgesehen. Die abschließende Festlegung von Anzahl und Ausführung der Fluchtwege bleibt der Gefährdungsbeurteilung und der Detailauslegung vorbehalten (siehe Abschnitt 3.5).

Der Explosionsschutz des Prüfstands lässt sich in drei Stufen einteilen: die Vermeidung des Entstehens einer explosionsfähigen Atmosphäre, die Vermeidung von Zündquellen und die konstruktive Begrenzung der Auswirkungen. Die ersten beiden Stufen sind im Konzept ausgeführt, zu nennen sind hier beispielhaft die Belüftung, die Gasdetektion, die Zündquellenfreiheit und die Erdung. Für die dritte Stufe gilt, dass eine Verpuffung im geschlossenen Zonenvolumen einen Druck erzeugen würde, den die Umschließung der Zone nicht aufnehmen kann. Es muss daher eine Lösung gefunden werden, die eine unkontrollierte Ausbreitung verhindert und Personen im Umfeld nicht gefährdet. Die konstruktive Umsetzung ist Teil der Detailkonstruktion des Containers und nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 nicht Gegenstand dieser Arbeit. Der Punkt wird in Abschnitt 12.2 geführt.

11.3 Aktive Schutzmaßnahmen

Die im Folgenden beschriebenen aktiven Schutzmaßnahmen unterscheiden sich von den passiven dadurch, dass sie Detektion, Energie oder eine Bedienhandlung benötigen. Damit beschreiben sie die zweite Stufe der EN ISO 12100, die technische Schutzmaßnahme. Eine grundsätzliche Eigenschaft dieser Gruppe ist, dass ihre Maßnahmen ausfallen können, weswegen sie hinter den passiven Maßnahmen stehen und diese nicht ersetzen. Im Folgenden werden die Maßnahmen zur Detektion, zur Löschung und Verdünnung sowie die Notfalleinrichtungen für Personen und die Signalisierung beschrieben. Der Abschnitt beschreibt dabei ausschließlich die eingesetzten Mittel. Die

Signalführung und die daraus folgenden Reaktionen, also Alarm, Verriegelung und Übergang in den Zustand Safe, sind in Abschnitt 7.5 beschrieben.

Für die Gasdetektion kommen zwei Transmitter in der Tankzone zum Einsatz, geführt als Position 2.16 des Gewichtsbudgets (siehe Tabelle A.7 im Anhang). Der erste misst brennbare Gase und Dämpfe in Prozent der unteren Explosionsgrenze und stellt damit die klassische Explosionsüberwachung nach F-320 dar. Der zweite misst die Sauerstoffkonzentration, und zwar in beide Richtungen: sowohl den durch die HTP-Zersetzung entstehenden Überschuss als auch einen Mangel infolge ausströmenden Stickstoffs (siehe Abschnitt 11.1). Die Zwangsbelüftung verhindert das Entstehen kritischer Konzentrationen, die Detektion überwacht, ob ihr das gelingt. Beide ersetzen einander nicht. Die Gasdetektion ist zugleich Freigabebedingung nach F-551 und wird damit nicht erst im Ereignisfall herangezogen, sondern bereits davor.

Zur Branddetektion kommen Flammenmelder mit integrierter Kamera in allen drei Zonen zum Einsatz, geführt als Position 2.19 des Gewichtsbudgets (siehe Tabelle A.7 im Anhang). Anzumerken ist dabei, dass in der Triebwerkszone während eines Tests bestimmungsgemäß eine Flamme brennt, die keine Auslösung verursachen darf. Hierfür kommt eine zustandsabhängige Auswertung zum Einsatz, bei der die automatische Auslösung in der Triebwerkszone während des Feuerns gesperrt ist, während sie in den übrigen Zonen aktiv bleibt. Dasselbe Prinzip ist in Abschnitt 7.5 bereits für den Bewegungsmelder etabliert. Zusätzlich kommen Handfeuermelder in jeder Zone und am Kontrollstand zum Einsatz, da sich gerade während des Tests visuell zuverlässig unterscheiden lässt, ob das Triebwerk ordnungsgemäß feuert oder ein Fehlerfall vorliegt. Die Kameras der Melder übermitteln das Bild hierfür an den Kontrollstand. Damit ist F-540 erfüllt, ohne dass die Detektion den Testbetrieb blockiert.

Die Auswahl des Löschmittels erfolgt nicht wie üblich über die dimensionierende Brandlast, sondern über den Ausschluss der übrigen Mittel. Maßgeblich ist dabei das HTP, das nicht die höchste Brandlast darstellt, sich aber mit den meisten Löschmitteln nicht beherrschen lässt. Pulver und Schaum bringen organische Stoffe und Metallverbindungen ein, die als Katalysator der Zersetzung wirken und das Problem damit verschärfen würden. Gasförmige Löschmittel sind wirkungslos, da sie über die Verdrängung von Sauerstoff wirken, bei der Zersetzung von HTP jedoch Sauerstoff freigesetzt wird. Somit bleibt Wasser als einziges geeignetes Löschmittel, was dem HTP-Handbuch und der Leitlinie der Hersteller entspricht [7, 9]. Gegen Kohlenwasserstoffbrände, wie

sie vom eingesetzten Treibstoff ausgehen können, ist Wasser allerdings nicht das wirksamste Mittel. Die Einheitlichkeit des Löschmittels wiegt hier dennoch schwerer als eine Optimierung je Zone, da eine Verwechslung im Ereignisfall die schwerwiegendere Folge hätte. Handfeuerlöscher werden als mitgeführtes Equipment vorgehalten (siehe Abschnitt 9.2).

Die im Prüfstand eingesetzte Berieselungsanlage erfüllt eine Doppelfunktion. Zum einen wirkt sie als Löschanlage nach F-541, zum anderen verdünnt sie freigesetztes HTP unter die kritische Konzentration nach F-512. Diese Doppelfunktion ist möglich, weil beide Aufgaben das Wasser flächig auf dem Boden der Tankzone verteilen. Getrennte Systeme wären eine unnötige Doppelung, die die Masse erhöht, ohne zusätzlichen Nutzen zu schaffen. Zum Einsatz kommen Vollkegeldüsen in der Tankzone, deren Einspeisung von außen über eine Storz-Kupplung erfolgt. Damit ist sowohl eine standortseitige Versorgung als auch die Versorgung aus einem mitgeführten Vorrat möglich. Das Ventil der Anlage ist federschließend wie die übrige Aktorik. Die Auslösung ist jedoch nicht an die Betriebsenergie gekoppelt, sondern an einen eigenen überwachten Auslösekreis mit separater Druckluftreserve, der von der Branddetektion und von Hand geöffnet werden kann. Ein Ausfall der Betriebsenergie erzeugt damit eine Störmeldung und keine Flutung. Ohne angeschlossene Wasserversorgung wird zudem kein Wasser bereitgestellt, weshalb diese nach F-550 eine Freigabebedingung für die kritischen Zustände des Betriebsablaufs darstellt. Die Bemessung des Volumenstroms für den Löschfall und der Vorratsmenge für den Verdünnungsfall ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird in Abschnitt 12.2 geführt.

Alle aktiven Maßnahmen setzen eine Versorgung mit Energie und Wasser voraus. Diese Abhängigkeit steht dem autarken Betrieb nicht entgegen, da nach B-140 das mitgeführte GSE-Set mit Stromaggregat, Druckgasflaschen und der internen Wasserreserve nach F-261 ausdrücklich Bestandteil der mobilen Infrastruktur ist. Das Wasser für die Sicherheits- und Brandschutzfunktionen wird dagegen wie die Betriebsmedien standortseitig bereitgestellt. Autark bezeichnet den Betrieb ohne Anschluss an stationäre Versorgungsnetze und nicht den Betrieb ohne Versorgung (siehe Abschnitt 5.1). Bei einem Ausfall der Energieversorgung hält die unterbrechungsfreie Stromversorgung Detektion, Anzeige und Datenaufzeichnung aufrecht. Sie ist dabei ausdrücklich keine Sicherheitsfunktion, da sich der sichere Zustand durch den Ausfall selbst einstellt und nicht trotz seiner (siehe Abschnitt 7.5).

Für den Fall einer Kontamination einer Person mit HTP ist eine beheizte Notdusche nach EN 15154 vorzusehen. HTP verursacht bei Hautkontakt eine sofortige Schädigung, und das Spülen mit Wasser ist die einzige wirksame Erstmaßnahme. Als Referenz dient hier das MoHyPer Projekt [1]. Die Dusche ist an der Außenwand des Containers anzubringen, da im Ereignisfall der Container zu verlassen ist und die Dusche nicht in derjenigen Zone stehen darf, in der die Kontamination stattgefunden hat. Ergänzend kommen Not-Aus-Taster an drei Stationen am Prüfstand, also je einer in jeder Zone, sowie am Kontrollstand zum Einsatz, deren Wirkung in Abschnitt 7.5 beschrieben ist.

Schließlich kommt nach F-501 eine optisch-akustische Gefahrensignalisierung innen und außen am Container zum Einsatz, damit der Gefahrenbereich auch für Personen erkennbar ist, die sich nicht am Kontrollstand aufhalten und nicht am Betrieb beteiligt sind. Dies ist zugleich die Schnittstelle zur Absperrung nach F-502, deren Wert in Abschnitt 11.1 offen geblieben ist. Die Ansteuerung der Signalisierung erfolgt zustandsabhängig und ist in Abschnitt 7.4 beschrieben.

11.4 Normkonformität und Nachweisführung

Die einschlägigen Normen und Richtlinien sind bereits in Kapitel 4 als Herkunft der Anforderungen geführt und je Anforderung im Anforderungsdokument nachzuvollziehen. Sie werden hier nicht erneut aufgelistet. Hinzu kommt, dass ein Konzept nicht pauschal konform sein kann. Konformität wird an einer Anlage festgestellt, nicht an einem Konzept. Ein Konzept kann lediglich seine Nachweisfähigkeit belegen, also zeigen, dass keine Entscheidung getroffen wurde, die eine spätere Konformitätsbewertung verbaut. Dieser Abschnitt prüft daher, welche Nachweise das Konzept vorbereitet, welche erst am gebauten Prüfstand zu führen sind und an welchen Stellen eine Festlegung fehlt, die vor dem Bau zu treffen ist.

Die Druckgeräte richtlinie greift bauteilweise über die Herstellerdokumentation nach F-531. Die Zusammenfassung mehrerer Druckgeräte zu einer Baugruppe erfordert darüber hinaus jedoch eine eigene Gesamtbewertung. Das Konzept bereitet diese vor, indem jeder Druckraum eine eigene Absicherung erhält (F-530), führt sie aber nicht durch. Das Explosionsschutzrecht greift über das Explosionsschutzdokument,

dessen Erstellung Betreiberpflicht ist und den Aufstellort voraussetzt. Bei wechselnden Standorten ist es je Standort fortzuschreiben. Das Konzept liefert hierfür die Grundlage über die Zonentrennung, die Belüftung und die Zündquellenfreiheit. Die wiederkehrenden Prüfungen nach der Betriebssicherheitsverordnung sind über F-532 gefordert und im Konzept durch Zugänglichkeit und Prüfanschlüsse vorbereitet. Die Gefährdungsbeurteilung nach dem Gefahrstoffrecht ist ebenfalls Betreiberpflicht. Dieses Kapitel liefert die Vorarbeit dazu, ersetzt sie jedoch nicht.

Zu klären ist ferner, ob der Prüfstand in seiner Gesamtheit als Maschine im Sinne der Maschinenverordnung (EU) 2023/1230 einzuordnen ist, da er über angetriebene Aktorik und eine Sicherheitssteuerung verfügt. Ein Anhaltspunkt dafür findet sich im Anforderungsdokument selbst. DIN EN ISO 13849-1 ist unter der Maschinenrichtlinie harmonisiert, sodass bei Anwendung dieser Norm die Zuordnung zu prüfen ist. Auch der Umstand, dass es sich um eine Eigenherstellung für den Eigengebrauch in einem einzigen Exemplar handelt, entbindet nicht von dieser Einordnung. Griffe sie, wären eine Risikobeurteilung nach EN ISO 12100, eine Betriebsanleitung, eine Konformitätserklärung sowie eine CE-Kennzeichnung für das Gesamtsystem erforderlich. Die Klärung ist vor Baubeginn zu treffen und wird in Abschnitt 12.2 geführt.

Jede Anforderung im Anforderungsdokument trägt eine Verifikationsangabe. Damit ist der Nachweisweg je Anforderung bereits festgelegt und muss später nicht rekonstruiert werden. Die Nachweisarten sind Inspektion, Analyse und Prüfung, und ihre Verteilung zeigt, was in der Konzeptphase abschließbar ist und was nicht. Inspektions- und Analysenachweise sind konzeptseitig führbar, Prüfnachweise setzen dagegen die gebaute Anlage voraus. Konzeptseitig geführt sind beispielsweise die Absicherung jedes Druckraums, die Trennung der Medienpfade, das Ruhestromprinzip der Sicherheitskette und die Zonentrennung. Erst am gebauten Prüfstand zu führen sind demgegenüber die Dichtheit, der Übergangswiderstand der Erdung, das Ansprechverhalten der Detektion und die Funktionsprüfung der Sicherheitskette.

Das Konzept ist damit so aufgebaut, dass die spätere Konformitätsbewertung möglich bleibt. Es nimmt sie nicht vorweg und behauptet keine Konformität. Die Punkte, an denen eine Festlegung noch fehlt, sind über dieses Kapitel verteilt benannt und in Abschnitt 12.2 zusammengeführt.

12 Bewertung und Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird das Konzept als Ganzes geprüft. Zunächst erfolgt eine Bewertung gegen einen gesetzten Maßstab, anschließend werden die offenen Punkte zusammengeführt, und am Ende stehen eine Zusammenfassung sowie die Empfehlungen für eine mögliche Realisierung. Eine erneute Variantenbewertung findet nicht statt. Die Entscheidungen sind in den Fachkapiteln gefallen und dort nach der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Methodik begründet.

Die vier Kernfragen der Arbeit aus Abschnitt 1.2 werden in Abschnitt 12.3 beantwortet. Über den Bericht verteilt sind an mehreren Stellen offene Punkte angemerkt. Sie werden in Abschnitt 12.2 zusammengeführt.

12.1 Technische Bewertung des Gesamtkonzepts

Um eine aussagekräftige Bewertung anstellen zu können, ist ein Maßstab Voraussetzung. Im Folgenden werden drei Maßstäbe angelegt: die Randbedingungen der Aufgabenstellung, der Anforderungskatalog und die Belastbarkeit der Zahlenbasis. Tabelle 12.1 stellt vorab die Kenndaten des Konzepts zusammen. Die Werte sind in den Fachkapiteln hergeleitet und werden hier lediglich gesammelt dargestellt.

Die Randbedingung eines 20-ft-Containers auf einem PKW-Anhänger unter der Fahrerlaubnisklasse BE ist eingehalten, der Nachweis erfolgt in Abschnitt 5.5. Die Anhängergesamtmasse beträgt 3.243,6 kg gegenüber der zulässigen Gesamtmasse von 3.500 kg. Damit ist die erste Kernfrage der Arbeit klar beantwortet, es ergibt sich eine Ausnutzung von 92,7 % mit einer Reserve von 256,4 kg. Ein mobiler Prüfstand dieser Art unter Fahrerlaubnisklasse BE ist darstellbar. Die Erfüllung hängt an den Bedingungen, die in den Fachkapiteln formuliert wurden, beispielsweise ist das Zonenkonzept in Abschnitt 5.2, die Schutzschale in Abschnitt 11.2 und die Sicherheits- und Genehmigungsaufgaben in Kapitel 11 zu finden.

Tabelle 12.1: Kenndaten des Konzepts im Überblick. Zusammenstellung aus den in Spalte drei genannten Abschnitten

Größe	Wert	Hergeleitet in
Nennschub	1 kN	Abschnitt 4.1
Envelope-Schub	5 kN, dimensionierend für das Fluidsystem	Abschnitt 4.1
Brennkammerdruck	30 bar	Abschnitt 4.1
Auslegungsbrenndauer	60 s	Abschnitt 4.1
Oxidator	HTP, 90 % als Auslegungspunkt, 100 % einhüllend für Werkstoff, Reinigung und Sicherheit	Abschnitt 4.1
Abgedeckte Treibstoffe	Kerosin, Ethanol, Propan	Abschnitt 4.1
Tankvolumen	110 L HTP, 50 L Treibstoff	Abschnitt 6.1
Tankdruck	39 bar, oberes Ende des Auslegungsfensters	Abschnitt 6.3
Druckgas	Stickstoff, 200 bar, Regelbestückung 4 × 50 L	Abschnitt 6.3
Zwischendruck	60 bar	Abschnitt 6.3
Nennweiten Medienleitungen	DN 15 HTP, DN 10 Treibstoff	Abschnitte 6.1 und 6.2
Umbilical	DN 12, Länge höchstens 15 m	Abschnitt 6.3
Plattform	20-ft-Container auf PKW-Anhänger, drei Zonen	Abschnitte 5.2 und 5.3
Anhängergesamtmasse	3.243,6 kg gegen 3.500 kg zulässig, 92,7 % Ausnutzung, 256,4 kg Reserve	Abschnitt 5.5
Transport	Zugfahrzeug und zweites Fahrzeug für Kontrollstand und Equipment	Abschnitte 9.2 und 10.1
Anforderungskatalog	182 Anforderungen, davon 168 auf Konzeptebene nachweisbar	Abschnitte 4.2 und 11.4

Das Ergebnis weicht von einer Lösung mit einem Zugfahrzeug als alleinigem Transportmittel neben dem Anhänger ab. Es wird in jedem Fall ein zweites Fahrzeug benötigt. Einerseits weil das Zugfahrzeug durch die Druckgasversorgung an einen Standort in der unmittelbaren Nähe des Prüfstands gebunden ist. Das ist mit einem Kontrollstand, der einen Sicherheitsabstand einhalten muss, nicht verträglich. Andererseits muss ein zweites Fahrzeug den Transport des mitzuführenden Equipments übernehmen.

Das Fluidsystem und die Tanks sind auf den Envelope-Wert des Schubs gerechnet. Die Kraftmessung wird über wechselbare Kraftmessdosen an den jeweiligen Messbereich angepasst (Abschnitt 5.1). Die Auslegung gegenüber HTP erfolgt mit 90 % als Auslegungspunkt für den Betrieb und mit 100 % als einhüllendem Wert für Werkstoff, Reinigung und Sicherheit. Auch die Randbedingung des konzeptionellen Charakters mit Detailkonstruktion nur dort, wo sie für die Systemauslegung erforderlich ist, ist methodisch über Abschnitt 3.5 verankert.

In der Aufgabenstellung werden vier Treibstoffe genannt. Das Konzept deckt drei davon über die geforderte Brenndauer ab. Grund für diese Abweichung ist, dass sich bei Nitromethan die Begrenzungslogik umkehrt und der Treibstofftank zum begrenzenden Faktor wird. Im Envelope-Fall verbleiben damit 34,8 s statt der geforderten 60 s, die Herleitung findet sich in Abschnitt 4.1. Die Aufnahme weiterer Treibstoffe sowie eine Auslegung, die Nitromethan über 60 s trägt, würde eine andere Tankkonfiguration und eine Werkstoffprüfung erfordern, jedoch keine grundsätzliche Änderung der Architektur.

Der Anforderungskatalog umfasst 182 Anforderungen, davon 166 MUSS- und 15 SOLL-Anforderungen sowie eine gemischte Anforderung. Jede trägt eine Verifikationsangabe. Die Verteilung beträgt 85 Nachweise über Inspektion, 83 über Analyse, 13 über Dokumentation und einen über Messung. Inspektion und Analyse sind konzeptseitig führbar. Damit sind 168 von 182 Anforderungen und somit rund 92 % bereits auf Konzeptebene nachweisbar, während Dokumentation und Messung die Beschaffung beziehungsweise die gebaute Anlage voraussetzen. Der Nachweisweg ist je Anforderung festgelegt und muss später nicht rekonstruiert werden. Eine SOLL-Anforderung bleibt unerfüllt, die Schallpegelabschätzung nach F-563. Sie ist in Abschnitt 12.2 geführt.

Die Herkunftsbilanz des Gewichtsbudgets weist 65,1 % Datenblattwerte, 28,3 % gerechnete Werte und 6,7 % Annahmen aus. Sie ist die eigentliche Qualitätsaussage über die Zahlenbasis, denn maßgeblich ist nicht, wie genau gerechnet wurde, sondern worauf die Zahlen stehen. Hinzu kommt die Margenstaffelung von 5, 10 und 20 %, die

der Herkunft der Massen folgt. Die Marge ist damit nicht pauschal gesetzt, sondern belegt. Der Massennachweis ist der belastbarste quantitative Nachweis dieser Arbeit und zugleich der knappste.

Es existiert keine gebaute Anlage, alle Aussagen sind Konzeptaussagen. Eine Nutzwertanalyse wird bewusst nicht nachgereicht. Die Entscheidungen sind über K.-o.-Kriterien gefallen (Abschnitt 3.4), und eine nachträgliche Punktbewertung würde eine Genauigkeit vortäuschen, die es nicht gibt. Um den Umfang der Arbeit zu begrenzen, kommt der Detaillierungsgrundsatz zum Einsatz, der an jeder Stelle benannt wird, an der er greift. An einer Stelle ist die Bewertung dünner als im übrigen Dokument. Bei der Schubmesskette sind die parasitären Steifigkeiten qualitativ beschrieben, aber nicht quantifiziert. Auch dieser Punkt ist in Abschnitt 12.2 vermerkt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die maßgebliche Randbedingung der Gewichtsbeschränkungen der Fahrerlaubnisklasse BE erfüllt ist, das Konzept ist unter den oben genannten Bedingungen darstellbar. Mit dem kritischen Pfad der Massenbilanz, der stets bei Änderungen erneut überprüft werden muss. Das Ergebnis dient als Grundlage für die Detailkonstruktion.

12.2 Risiken und offene Punkte

Die in diesem Abschnitt geführten Konzeptrisiken sind diejenigen Punkte, aus denen sich noch eine Änderung des Konzepts ergeben kann. Die Gefährdungen des Betriebs sind demgegenüber in Abschnitt 11.1 geführt und werden hier nicht wiederholt. Die einzelnen Punkte sind über den Bericht verteilt und an der jeweiligen Stelle markiert, sie werden hier zusammengeführt.

Nicht jeder offene Punkt hat dieselbe Tragweite, weshalb nach Klassen unterschieden wird. Klasse A ist vor Baubeginn zu entscheiden, weil die Auslegung daran hängt. Klasse B betrifft die Detailauslegung und hat keine Rückwirkung auf die Architektur. Klasse C ist standortabhängig oder liegt in der Verantwortung des Betreibers. Klasse D umfasst die Themen, die nach dem Detaillierungsgrundsatz aus Abschnitt 3.5 bewusst abgegrenzt wurden. Tabelle 12.2 führt die offenen Punkte nach diesen Klassen auf.

Tabelle 12.2: Offene Punkte nach Klassen. Zusammenstellung aus den markierten Stellen im Bericht

Punkt	Abschnitt	Klasse	Auswirkung
<i>Klasse A — vor Baubeginn zu entscheiden</i>			
Anwendbarkeit der Maschinenverordnung (EU) 2023/1230	11.4	A	Bestimmt den Nachweisaufwand für das Gesamtsystem, nicht für ein Teilsystem
Druckstufe im Aufdruckpfad, PN 40 gegen PN 63	6.3	A	Wandstärken und Komponentenauswahl, Massenzuwachs rund 15 kg
Leistungsbilanz nach F-620 und Gleichzeitigkeitsannahme	8.1	A	Baugröße des Stromaggregats, ohne Rückwirkung auf die Anhänger­masse
Auslegung des Stromaggregats nach Anlaufstrom statt Leistungssumme	8.1	A	Baugröße und Masse des Aggregats auf dem zweiten Fahrzeug
Verankerung und Sicherung gegen Abheben	9.3	A	Lastpfad am Aufstellort, Zusatzmasse für Sicherungsmittel
Explosionsdruckentlastung des Containers	11.1	A	Öffnungsflächen und Wandaufbau
Gefahrenbereich nach F-502	10.1	A	Abstand des Kontrollstands und Länge der Datenleitung
Reihenfolge der Medienabsper­rung bei Safe und Post-Test	7.5	A	Ablauflogik der Sicherheitskette
Werkstoff und Umfang der Bodenauskleidung der Triebwerkszone	5.3	A	Masse und Vorbehalt nach EN 1127-1
Rückhaltung von Löschwasser nach F-560	11.3	A	Bodenschwelle fasst nur rund 266 L, Nichterfüllung ist benannt
<i>Klasse B — Detailauslegung ohne Rückwirkung auf die Architektur</i>			
Bemessung der Berieselung	11.3	B	Düsenzahl und Volumenstrom
Parasitäre Steifigkeiten der Schubmesskette	7.1	B	Messunsicherheit, qualitativ beschrieben und nicht quantifiziert
Vent-Pfade, Behandlung und Mindesthöhe	6.1	B	Führung und Austrittshöhe der Entlüftung
Trocknungsschritt mit Stickstoff nach dem Spülen	6.4	B	Ablauf und Gasbedarf der Spülung
Metalleintrag der Wasserpumpe	6.4	B	Werkstoffverträglichkeit gegenüber HTP
Entleerung der Sammelbehälter	6.4	B	Betriebsablauf und Entsorgungsweg

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 12.2

Punkt	Abschnitt	Klasse	Auswirkung
Rückschlagsicherung im Spülpfad	6.4	B	Vermeidung von Rückströmung
Ventilblock und Aktoren	6.3	B	Bauform und Ansteuerung
ATEX-Zonenklassifikation	11.1	B	Geräteauswahl in der Tankzone
Blitzschutz am freien Aufstellort	11.3	B	Standortbezogene Schutzmaßnahme
Fluchtwege nach F-543	5.3	B	Anordnung der Türen und Durchgänge
WGK-Einstufung der Spülgemische	6.4	B	Entsorgungsweg
Zusammenladung von HTP der Klasse 5.1 und Treibstoff der Klasse 3	9.2	B	Auflagen an das zweite Fahrzeug nach ADR
Druckhaltung im Betrieb, mechanisch gegen aktiv geregelt	6.3	B	Regelgüte und Droop der Regelstufen, Auslegung des Zwischendrucks
<i>Klasse C — standortabhängig oder betreiberseitig</i>			
Stickstoffversorgung am Standort, Anpassstufe bleibt unbemaßt	6.3	C	Entfall der Flaschenbestückung, keine Architekturänderung
Ausstattung der rechten Seite in Trauen bei Wasser, Strom und Gasentnahme	8.2	C	Umfang des mitgeführten Equipments
Entsorgungsweg der Sammelbehälter	6.4	C	Betreiberpflicht
Stellfläche für Container und Anhänger	9.3	C	Untergrund und Lastverteilung
Zustand nach der Renovierung in Trauen	8.2	C	Abstimmung mit dem DLR
Länge der Datenleitung, 100 m als Annahme	10.3	C	Masse im mitgeführten Equipment
Explosionsschutzdokument und Gefährdungsbeurteilung	11.4	C	Betreiberpflicht, standortgebunden
<i>Klasse D — bewusst abgegrenzt nach Abschnitt 3.5</i>			
Sicherheitsabstand des Kontrollstands	10.1	D	Nicht ausgelegt, als Randbedingung gesetzt
Einrichtung und Auslegung des Kontrollstands	10.2	D	Nicht ausgelegt, Masse nicht bilanziert

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle 12.2

Punkt	Abschnitt	Klasse	Auswirkung
Belastbarer Zeitrahmen des Aufbaus	9.3	D	Weiches Ziel nach F-624, nicht nachgewiesen
Schallpegelabschätzung nach F-563	11.4	D	Einzigste unerfüllte SOLL-Anforderung

Die Massenbilanz weist bei einer Ausnutzung von 92,7 % eine Reserve von 256,4 kg aus. Diese Reserve liegt oberhalb der bereits angesetzten Margen und steht damit als zusätzlicher nutzbarer Freiraum zur Verfügung. Eine Änderung einzelner Positionen führt daher nicht unmittelbar zu einer Überschreitung der zulässigen Gesamtmasse.

Das Auslegungsfenster des Aufdruckpfads von 0,57 bar würde im ungünstigsten Fall eine höhere Druckstufe erfordern. Die Folge wären eine Anpassung der Wandstärken und der Komponentenauswahl im gesamten Aufdruckpfad sowie ein geringer Massenzuwachs von 15 kg, nicht jedoch eine Änderung der Architektur.

Die Leistungsbilanz ist mit dem Kühlfall als dimensionierendem Fall ausgelegt und beruht auf einer eigenen Annahme zur Gleichzeitigkeit der Verbraucher. Weicht diese Annahme deutlich ab oder wird das Aggregat nach dem Anlaufstrom des Kompressors statt nach der Leistungssumme ausgelegt, ändert sich die Baugröße des Stromaggregats. Da das Aggregat nach Abschnitt 8.1 auf dem zweiten Fahrzeug mitgeführt wird, wirkt eine solche Änderung nicht auf das Massenbudget des Anhängers. Auch dieser Punkt kippt das Konzept somit nicht.

Bekannt und benannt sind drei Nichterfüllungen. Die SOLL-Anforderung F-563 bleibt unerfüllt, da eine Schallpegelabschätzung nicht durchgeführt wurde. Die nach F-560 geforderte Rückhaltung von Löschwasser ist im Brandfall faktisch nicht erfüllt, da die Bodenschwelle des Containers lediglich rund 266 L fasst. Eine Lösung ist vor der Inbetriebnahme zu treffen. Nitromethan wird über die geforderte Brenndauer von 60 s nicht abgedeckt (Abschnitt 4.1). Keine dieser Nichterfüllungen stellt die Architektur des Konzepts in Frage.

12.3 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Realisierung

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein Konzept für einen mobilen, in einem 20-ft-Container integrierten Prüfstand für Bipropellant-Triebwerke mit HTP als Oxidator, der in drei Zonen gegliedert ist und auf einem PKW-Anhänger unter der Fahrerlaubnisklasse BE transportiert werden kann und für den Kontrollstand sowie das übrige mitgeführte Equipment ein zweites Fahrzeug erfordert. Dokumentiert ist es in diesem Bericht, im Anforderungsdokument mit 182 Anforderungen und durchgängigen Verifikationsangaben, im R&I-Fließbild, im Gewichtsbudget mit dem Massennachweis, in der Druckverlust- und der Parameterrechnung, im CAD-Modell der räumlichen Integration sowie im physischen Modell. Damit liegt das in der Aufgabenstellung geforderte Ergebnis vor, ein vollständig dokumentiertes und nachvollziehbares Gesamtkonzept als Grundlage für die spätere Detailkonstruktion.

Die erste Kernfrage nach der Integration des Prüfstandes in einen 20-ft-Container unter Gewichts- und Platzbeschränkung eines PKW-Anhängers ist erfüllt (Gewichtsnachweis siehe Abschnitt 5.5, Layoutnachweis siehe Abschnitt 5.3).

Die zweite Kernfrage nach der Modularität des Fluidsystems für den Treibstoffwechsel ist ebenfalls erfüllt, lediglich Nitromethan ist bei der Brenndauerauslegung nicht betrachtet worden (siehe Abschnitt 4.1 und 6.2).

Die dritte Kernfrage nach den Sicherheits- und brandschutztechnische Maßnahmen sowie der Normkonformität ist auf Konzeptebene mit Zonenkonzept, Schutzschale und aktiven Maßnahmen erfüllt. 168 von 182 Anforderungen sind dabei bereits auf Konzeptebene nachweisbar (siehe Kapitel 11 und Abschnitt 11.4). Nichterfüllung von Anforderungen ist nur bei zwei Sicherheitsanforderungen der Fall, F-563 und F-560.

Die vierte Kernfrage nach der Autarkie gegen den Betrieb mit Ground-Support-Infrastruktur ist teilweise erfüllt. Autark sind Strom, Druckgas und Spülwasser, nicht autark sind das sicherheitstechnische Wasser und ab der ersten Nachlieferung die Betriebsmedien (siehe Abschnitt 8.1 und 8.2).

Die weitere Arbeit an dem Projekt ist wie folgt zu gestalten. Zuerst sind die offenen Punkte der Klasse A zu schließen. Darauf folgt die Detailkonstruktion von Container

und Rahmen, anschließend die Analyse der zu beschaffenden Komponenten. Standortbezogen sind das Explosionsschutzdokument und die Gefährdungsbeurteilung zu erstellen. Danach kann die Inbetriebnahme erfolgen, die mit Kaltdurchgängen vor dem ersten Heißlauf beginnt.

Die Weiterentwicklungspotenziale liegen im Ausbau auf den vollen 5-kN-Envelope, in Brenndauern über 60 s sowie im Drossel- und Wiederzündbetrieb. Ebenso möglich sind ein Monopropellant-Betrieb zur Erprobung von Katalysatoren, der Einsatz an weiteren Standorten und die Nutzung in der Lehre. Es handelt sich dabei um Richtungen, in denen eine Folgearbeit ansetzen und sich auf die hier dokumentierten Ergebnisse stützen kann.

Damit bildet diese Arbeit die Grundlage für Folgearbeiten in unterschiedlichen Richtungen und den Ausgangspunkt für die Realisierung des Prüfstands.

Literaturverzeichnis

- [1] May, Glaser, Riedel, Poppe, and Ohndorf. Mobiles Lager- und Betankungssystem für die Versorgung von Raketenstufen und Nutzlasten mit hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid (MoHyPer). In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK) 2024*, 2024. DLRK 2024 Proceedings.
- [2] Nosseir, Cervone, and Pasini. Review of state-of-the-art green monopropellants: For propulsion systems analysts and designers. *Aerospace*, vol. 8, p. 20 (Jan 2021), 2021. MDPI (Open Access).
- [3] Die Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft. EFRE-Programm Land Bremen 2021–2027: BreSpaceTech 2025+. Bremische Raumfahrttechnologie für 2025+ — Forschungsinfrastruktur zur Technologieentwicklung im Bereich „Green Propellants“ und „Digital Satellite“. Vorlage für die Sitzung des Senats am 07.01.2025, beschlossene Fassung, Freie Hansestadt Bremen, 2025.
- [4] Mickels, Wright, Soderquist, Prokofieva, Panahandehgar, Uddanti, and Rajan. Project atlas: A mobile universal rocket engine test stand. Technical report, Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, Florida, 2019. commons.erau.edu/student-works/86.
- [5] Betady, Ortiz, Younes, Villanueva, Barnum, Rozario, Rodas, Cors, Patel, Linares, Dobbs, and Chandler. Development of a Mobile Rocket Engine Test Stand (MRETS). In *AIAA Propulsion and Energy Forum, Cincinnati*, 2018.
- [6] Ringas and N. D. Preliminary Design of a 1 kN Liquid Propellant Rocket Engine Testing Platform. Master's thesis, University of Cape Town, SpaceLab (MPhil Thesis SL21-01M), 2021. UCT SpaceLab SL21-01M.
- [7] CEFIC Hydrogen Peroxide Technical Committee. Hydrogen peroxide bulk storage guideline. Technical report, European Chemical Industry Council (CEFIC), Brüssel, 2005.

- [8] Sebastian Schuh, Tobias Bartok, Robert-Jan Koopmans, and Carsten Scharlemann. Hydrogen peroxide material compatibility investigation. In *6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, 2015.
- [9] Rocketdyne, Chemical and Material Sciences Department. Hydrogen peroxide handbook. Technical Report AFRPL-TR-67-144, Air Force Rocket Propulsion Laboratory, Edwards AFB, California, 1967.
- [10] James E. Cocchiaro and Jerry M. Ward. Dod explosives safety standards for energetic liquids program. Technical Report DTIC ADA513291, Department of Defense Explosives Safety Board (DDESB), Alexandria, VA, 1998. Chemical Propulsion Information Agency, The Johns Hopkins University.
- [11] Hans-Burkhard Horlacher and Ulf Helbig, editors. *Rohrleitungen 1: Grundlagen, Rohrwerkstoffe, Komponenten*. Springer Vieweg, Berlin, 2 edition, 2024.
- [12] George P. Sutton and Oscar Biblarz. *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley and Sons, 9 edition, 2017.
- [13] Runyan, Rynd, and Seely. Thrust stand design principles. In *28th AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-92-3976*, 1992.
- [14] Peter Stephan, Stephan Kabelac, Matthias Kind, Dieter Mewes, Karlheinz Schaber, and Thomas Wetzel, editors. *VDI-Wärmeatlas*. Springer Vieweg, Berlin, 12 edition, 2019.
- [15] Poppe, May, Bierwagen, and Eggers. The Site Trauen of the German Aerospace Center – Past, Present and Future of the Largest Test Site for Rocket Engines in Germany. In *3rd Ground-Based Space Facilities Symposium, Marseille, Dez. 2022*, 2022. DLR ELIB / ESA.
- [16] Wilson and J. *Preliminary Design of a Test and Launch Control Centre for Liquid Propellant Rocket Engine Applications*. PhD thesis, University of Cape Town (Thesis), 2020. UCT Theses Repository.

A Anhang

Tabelle A.1: Rechenweg der Triebwerks-Rahmenparameter im 5-kN-Envelope. Quelle:

TERRA_Parameters_V2.xlsx

Größe	Einheit	Kerosin	Ethanol	Propan	Nitromethan ^a
<i>Propellantmassen bei 60 s Brenndauer</i>					
Masse HTP	kg	110,9	105,4	111,1	50,5
Masse Treibstoff	kg	15,6	23,4	14,6	75,4
<i>Volumina</i>					
HTP, theoretisch	L	79,5	75,6	79,6	36,2
Treibstoff, theoretisch	L	19,3	29,7	29,5	66,3
HTP, mit Marge ^b	L	103,3	98,2	103,5	47,0
Treibstoff, mit Marge ^b	L	25,0	38,6	38,3	86,2
<i>Düsengeometrie</i>					
Schubkoeffizient c_F	–	1,471	1,470	1,470	1,474
Düsenhalsfläche A^*	cm ²	11,33	11,34	11,34	11,31
Düsenhalsdurchmesser d^*	mm	38,0	38,0	38,0	37,9
Düsenaustrittsdurchmesser d_e	mm	71,1	71,1	71,1	71,0
<i>Weitere Kennwerte</i>					
Dichte-Impuls I_d	s·kg/m ³	309 792	290 576	280 433	298 503
Maximale Brenndauer bei 1 kN ^c	s	319,4	335,9	318,8	174,1
Maximale Brenndauer bei 5 kN ^c	s	63,9	67,2	63,8	34,8
Begrenzende Seite	–	HTP	HTP	HTP	Treibstoff

Tankgrößen der Auslegung: 110 L HTP, 50 L Treibstoff. Der maßgebliche Fall im Untersuchungsumfang ist Propan auf der Oxidatorseite mit 103,5 L und Ethanol auf der Treibstoffseite mit 38,6 L.

^a Außerhalb des Untersuchungsumfangs, siehe Abschnitt 4.1.

^b Einschließlich 10 % Ullage und 20 % Reserve.

^c Bezogen auf das Volumen mit Marge, also die Brenndauer, bis zu der der volle Margenansatz erhalten bleibt. Der Tank ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht physisch leer.

Tabelle A.2: Druckstufen der Pressurant-Kaskade, von der Brennkammer rückwärts aufgelöst.
 Quelle: TERRA_Druckverlust_V3.xlsx

Größe	Wert	Einheit	Anmerkung
<i>Druckstufen</i>			
Brennkammerdruck	30	bar	Zielgröße des Triebwerks
Tankdruck	39	bar	Festlegung F-241, oberes Ende des Auslegungsfensters
Sollwert der zweiten Regelstufe	39	bar	Druckverlust der Aufdruckleitung gasseitig vernachlässigbar
Mindestvordruck der zweiten Regelstufe	44	bar	Sollwert zuzüglich 5 bar Dropout-Marge
Zwischendruck hinter der ersten Regelstufe	60	bar	gesetzt
Nachweis Zwischendruck über Mindestvordruck	erfüllt		Andernfalls ist der Zwischendruck anzuheben
<i>Nutzbarer Flaschenbereich</i>			
Flaschendruck, gefüllt	200	bar	
Flaschendruck, nutzbar bis	60	bar	Darunter hält die erste Regelstufe den Zwischendruck nicht mehr
Nutzbare Druckspanne	140	bar	
Nutzbarer Anteil des Flascheninhalts	70	%	

Ein höherer Zwischendruck verkleinert den nutzbaren Anteil des Flascheninhalts und erhöht damit die erforderliche Flaschenzahl.

Tabelle A.3: Stickstoffvolumen für den Aufdruck der Tanks bei einem Envelope-Test. Quelle: TERRA_Druckverlust_V3.xlsx

Größe	Wert	Einheit	Anmerkung
<i>HTP-Tank</i>			
Ausgestoßenes HTP-Volumen	79,61	L	Maßgeblicher Fall im Untersuchungsumfang (Propan)
Gaspolster	11,00	L	10 % des Tankvolumens
Stickstoffvolumen bei Tankdruck	90,61	L	
<i>Treibstofftank</i>			
Ausgestoßenes Treibstoffvolumen	29,71	L	Maßgeblicher Fall im Untersuchungsumfang (Ethanol)
Gaspolster	5,00	L	
Stickstoffvolumen bei Tankdruck	34,71	L	
<i>Summe</i>			
Stickstoffvolumen gesamt	125,32	L	Bei 39 bar Tankdruck
Stickstoffmasse für den Aufdruck	5,62	kg	$m = pV/(RT)$

Bei 39 bar liegt der Realgasfaktor nahe eins, die Idealgasnäherung ist hier ausreichend. Eine Realgaskorrektur ist nur auf der Flaschenseite erforderlich.

Tabelle A.4: Stickstoffbudget, Flaschenanzahl und Kampagnenreichweite. Quelle:
TERRA_Druckverlust_V3.xlsx

Größe	Wert	Einheit	Anmerkung
<i>Bedarf</i>			
Aufdruck einer Tankfüllung	5,62	kg	
Spülung	0,345	kg	Zehn Spülzyklen, 15 bar, 2 L Leitungsvolumen
Zwischensumme	5,97	kg	
Gesamtbedarf mit Sicherheitsfaktor	11,93	kg	Sicherheitsfaktor 2
<i>Angebot</i>			
Masse je Flasche bei 200 bar	10,85	kg	Realgaskorrigiert, $Z = 1,06$
Masse je Flasche bei 60 bar	3,45	kg	Nicht nutzbares Restgas
Nutzbare Masse je Flasche	7,40	kg	
<i>Ergebnis</i>			
Rechnerische Flaschenanzahl	1,60	Stk	
Mindestflaschenanzahl ^a	2	Stk	Aufgerundet
Reserve durch Aufrundung	3,00	kg	Zusätzlich zum Sicherheitsfaktor
<i>Kampagnenrechnung</i>			
Regelbestückung	4	Stk	Betriebsvorgabe F-242, Gestell mit sechs Stellplätzen
Nutzbares Stickstoffangebot	29,60	kg	
Abzug Spülung je Kampagne	0,345	kg	Fällt je Kampagne an, nicht je Test
Bedarf je Test ^a	5,62	kg	
Tests je Kampagne ohne Flaschenwechsel	5	Stk	Abgerundet aus 5,25

^a Die beiden Ergebnisse haben unterschiedliche Bezugsbasen. Die Mindestflaschenanzahl schließt den Sicherheitsfaktor 2 ein, die Kampagnenreichweite rechnet ohne ihn. Das ist beabsichtigt: der Sicherheitsfaktor sichert den einzelnen Test ab, die Kampagnenreichweite ist eine Planungsgröße.

Tabelle A.5: Spitzendurchfluss, Druckverlust im Umbilical und Druckmarge vor der zweiten Regelstufe. Quelle: TERRA_Druckverlust_V3.xlsx

Größe	Wert	Einheit	Anmerkung
<i>Spitzendurchfluss während der Brenndauer</i>			
Ausgestoßenes Flüssigkeitsvolumen	109,32	L	HTP und Treibstoff, maßgeblicher Fall im Untersuchungsumfang
Brenndauer	60	s	
Volumenstrom Flüssigkeit	1,82	L/s	Verdrängtes Volumen je Sekunde
Stickstoffdichte bei Tankdruck	44,85	kg/m ³	39 bar, 20 °C
Massenstrom Stickstoff	0,0817	kg/s	
Normvolumenstrom gesamt	235,3	Nm ³ /h	Dimensionierend für erste Regelstufe und Umbilical
Normvolumenstrom je Flasche	117,7	Nm ³ /h	Zwei gleichzeitig geöffnete Flaschen
<i>Druckverlust im Umbilical</i>			
Zwischendruck	60	bar	
Stickstoffdichte bei Zwischendruck	67,64	kg/m ³	Realgaskorrigiert
Leitungslänge	15	m	Höchstwert nach F-624
Innendurchmesser	12	mm	
Strömungsgeschwindigkeit	10,68	m/s	Unterhalb der für Gas üblichen Obergrenze von 30 m/s
Reynolds-Zahl	468 639	–	
Rohrreibungsbeiwert	0,0214	–	Näherung nach Swamee–Jain
Druckverlust	1,03	bar	1,7 % des Zwischendrucks
<i>Druckmarge bis zur zweiten Regelstufe</i>			
Zwischendruck am Ausgang der ersten Regelstufe	60,00	bar	
Abzug Umbilical	-1,03	bar	
Abzug Filter und Armaturen	-0,70	bar	Ansatz ohne Datenblattbeleg
Vordruck an der zweiten Regelstufe	58,27	bar	
Erforderlicher Mindestvordruck	44,00	bar	Tankdruck zuzüglich Dropout-Marge
Marge	14,27	bar	
<i>Praktischer Flaschenenddruck</i>			
Kv-Wert der ersten Regelstufe	0,40	–	Platzhalter bis zur Beschaffung
Praktischer Enddruck	61,97	bar	Aus der Kv-Gleichung nach dem Vordruck aufgelöst
Im Budget angesetzter Enddruck	60,00	bar	
Differenz	1,97	bar	Das Budget überschätzt das nutzbare Gas geringfügig

Das Gaspolster zählt nicht zum Spitzendurchfluss, da es im Zustand Pre-Test ohne zeitliche Begrenzung aufgefüllt wird. Nicht enthalten ist der Droop der Druckminderer unter Volllast. Die Marge von 14,27 bar ist daher als Obergrenze zu verstehen.

Tabelle A.6: Erforderlicher Kv-Wert der ersten Regelstufe über dem Flaschendruck. Quelle: TERRA_Druckverlust_V3.xlsx

Flaschendruck bar (ü)	Vordruck absolut bar	Strömungszustand	Erforderlicher Kv —
200	201	kritisch	0,044
150	151	kritisch	0,058
100	101	unterkritisch	0,089
80	81	unterkritisch	0,125
70	71	unterkritisch	0,177
65	66	unterkritisch	0,251
62	63	unterkritisch	0,397

Gerechnet mit dem Normvolumenstrom je Flasche von 117,7 Nm³/h und 61 bar absolutem Hinterdruck. Die Flaschendrucke sind ein Abstraster, keine Eingabewerte. Der erforderliche Kv-Wert steigt beim Leerlaufen der Flasche stark an. Die erste Regelstufe ist deshalb über den Endzustand auszulegen und nicht über die volle Flasche.

Tabelle A.7: Massenbilanz des Prüfstands, Nominalmassen ohne Marge. Quelle:

TERRA_Gewichtsbudget_V3.xlsx

Pos.	Position	kg	Herkunft	Beleg
<i>1 Container</i>				
1.1	CONTAINEX LC 20 ft, Holzboden	1270,0	Datenblatt	Herstellerangabe, Lastklasse 10 t
<i>2 Tankzone</i>				
2.1	HTP-Tank 110 L, 1.4404, einwandig	77,0	gerechnet	Kesselformel 40 bar, Mantel 6 mm, Böden 7 mm
2.2	Treibstofftank 50 L, 1.4404	43,0	gerechnet	Kesselformel 40 bar, Mantel 5 mm, Böden 6 mm
2.3	Auffangwanne HTP, 650 × 650 × 300	16,0	gerechnet	1,20 m ² × 1,5 mm × 8000 kg/m ³
2.4	Auffangwanne Treibstoff, 440 × 440 × 300	10,0	gerechnet	0,72 m ² × 1,5 mm × 8000 kg/m ³
2.5	Bodenauskleidung Tank- und Triebwerkszone, Aluminium	44,5	gerechnet	(5,8 + 5,2) m ² × 1,5 mm × 2700 kg/m ³
2.6	Spülwassertank 50 L, PE	7,0	gerechnet	0,87 m ² × 5 mm × 950 kg/m ³
2.7	Sammelbehälter HTP, PE	7,0	gerechnet	1,12 m ² × 5 mm × 950 kg/m ³
2.8	Sammelbehälter Treibstoff, 1.4404	9,0	gerechnet	0,60 m ² × 1,5 mm × 8000 kg/m ³
2.9	Mischbettharzpatrone	9,0	Annahme	Ø 150 × 500, Harz 700 kg/m ³
2.10	Stickstoffarmaturen containerseitig	6,1	gerechnet	Stückliste P&ID V6, ohne erste Regelstufe
2.11	Druckminderer-Panel und Ventilblock	33,9	gerechnet	Stückliste P&ID V6
2.12	Verrohrung, 53,5 m	56,4	gerechnet	15 Leitungen DN 10/15/20, EN ISO 1127
2.13	Coriolis-Messgeräte DN 25 und DN 15, Ex d	30,0	Datenblatt	Promass F 300, je +2 kg für Ex d
2.14	Sensorik Tankzone	12,2	Annahme	6 Druck, 6 Temperatur, 2 Füllstand
2.15	Belüftung Tankzone	10,7	gerechnet	152 m ³ /h, Ex-Rohrventilator 4,2 kg
2.16	Gasdetektion, zwei Transmitter	10,0	Datenblatt	Dräger Polytron 5100 EC, 4,5 kg je Stück
2.17	Berieselung	11,9	gerechnet	Vier Düsen, 6 m DN 20, Einspeisung Storz C
2.18	Flammendurchschlagsicherung	3,0	Annahme	Am Ausgang der Entlüftung
2.19	Flammenmelder mit Kamera, drei Zonen, und Signalleuchte	7,6	Datenblatt	Dräger Flame 3000, Werma MC35

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle A.7

Pos.	Position	kg	Herkunft	Beleg
2.20	Not-Aus, drei Stationen	2,5	Datenblatt	Harmony XAW, 0,665 kg je Stück
2.21	Notdusche, außen eingehängt	6,5	Datenblatt	EN 15154-1/-5, Edelstahl, 4,5 kg
3 Triebwerkszone				
3.1	Ground Frame	50,0	Annahme	Platzhalter, Detailauslegung nicht Gegenstand der Arbeit
3.2	Floating Frame	10,0	Annahme	Platzhalter
3.3	Kraftmessdose	0,5	Datenblatt	HBK U9C, 1 kN
3.4	Hochtemperatursensorik	3,4	Annahme	Gekühlter Brennkammerdrucksensor, vier Thermoelemente
4 Technikzone				
4.1	Schaltschrank, USV, Bestückung, Trennbarrieren	171,2	Datenblatt	Rittal VX 8686000, Eaton 9PX2200IRT2U-L
4.2	Datenerfassung, Steuerung, Netzwerk	26,3	Annahme	Klassenwerte 19 Zoll, einschließlich 5 % Zuschlag
4.3	Druckluft	26,0	Datenblatt	Kompressor 50 L, ölfrei, 23,54 kg
4.4	Klimatisierung, zwei Splitanlagen	89,8	Datenblatt	Bosch CL3000i 26 E, Atexxo AIR-EX-FTXM-35
4.5	Anschlusspanels, zwei Stück	11,5	gerechnet	Elektro/Daten und Stickstoff getrennt
4.6	Verkabelung, 280 m, und Pneumatik	55,3	gerechnet	Verbraucherliste, Pilotventile in der Technikzone
4.7	Wasserpumpe	12,1	Datenblatt	Grundfos CM, selbstansaugend, 1.4401
5 Struktur				
5.1	Zonentrennwände TW1 und TW2	146,0	gerechnet	Stahlblech profiliert 1,2 mm, +12 % Abwicklung und Anschlussprofile
5.2	Schutzschale	79,0	gerechnet	850 × 850 × 14 mm, Stahl
5.3	Personentüren, zwei Stück netto	47,5	Annahme	Einbauten CONTAINEX
5.4	Dachdämmung	41,0	gerechnet	9,0 m ² , Mineralwolle 60 mm A2 und Aluminiumblech
5.5	Innenausbau: Kabelpritschen, Montageschienen	40,5	gerechnet	15 m Gitterrinne, 10 m C-Profil
5.6	Kleinteile	5,0	Annahme	Beschilderung, Erste Hilfe, Kleinteile
Nominalmasse Container gesamt		2498,4		

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle A.7

Pos.	Position	kg	Herkunft	Beleg
<i>Nicht im Container — verlagert oder entfallen</i>				
	Hitzeschutz Triebwerkszone	0,0		Entfallen, kurze Brenndauern, der Strahl verlässt die Zone
	Fenster	0,0		Entfallen, Masse gegen Nutzwert
	Bodenverstärkung	0,0		In Position 3.1, Lasteinleitung über die Tischfüße
	Zündeinrichtung	0,0		Teil des Triebwerks, abgegrenzt
	Stickstoffflaschen, Gestell, erste Regelstufe, Umbilical	0,0		Mitgeführtes Equipment
	ConFoot-Stützen	0,0		Mitgeführtes Equipment
	Datenleitung zum Kontrollstand	0,0		Mitgeführtes Equipment
	Feuerlöscher	0,0		Mitgeführtes Equipment, beim Aufbau einzustellen

Tabelle A.8: Herkunftsbilanz und Nachweis gegen die Grenze von 3.500 kg. Quelle:
TERRA_Gewichtsbudget_V3.xlsx

Größe	Wert	Einheit	Anmerkung
<i>Herkunftsbilanz</i>			
Datenblattwerte	1626,2	kg	65,1 % der Nominalmasse, Marge 5 %
Gerechnete Werte	705,8	kg	28,3 % der Nominalmasse, Marge 10 %
Angenommene Werte	166,4	kg	6,7 % der Nominalmasse, Marge 20 %
<i>Nachweis der Betriebserlaubnisgrenze</i>			
Nominalmasse Container	2498,4	kg	Ohne Marge
Marge	185,2	kg	Positionsweise nach Herkunftsklasse
Container mit Marge	2683,6	kg	
Containeranhänger Vlemmix 20 ft	560,0	kg	Leergewicht laut Hersteller, abhängig von Anbauteilen
Anhängergesamtmasse	3243,6	kg	
Zulässige Gesamtmasse	3500,0	kg	Grenze der Fahrerlaubnisklasse BE
Reserve	256,4	kg	
Ausnutzung	92,7	%	Grenze eingehalten

Die Marge wird positionsweise nach der Herkunft des Zahlenwertes angesetzt und nicht zusätzlich auf die Gesamtmasse aufgeschlagen, da dies eine Doppelung wäre.

Tabelle A.9: Offene Entscheidungen mit Massenwirkung. Quelle:

TERRA_Gewichtsbudget_V3.xlsx

Entscheidung	kg	Anmerkung
Druckstufe PN 63 statt PN 40 an Flanschbauteilen	+15	Auslegungsfenster nur 0,7 bar breit
Schaltschrank ohne Montageplatte, System-Chassis	−13	Der Schaltschrank ist dafür ausgelegt
Zwischendruckverteiler näher an der Tankzone	−16	Vier Leitungen je 2 m kürzer
Multisplit statt zwei getrennter Klimaanlage	−21	Sonderanfertigung, keine Redundanz
Schaltschrank als Aluminium-Sonderanfertigung	−69	Keine geprüfte Schutzart mehr

Auch die massenwirksamste der offenen Entscheidungen liegt deutlich innerhalb der Reserve von 256,4 kg.

Tabelle A.10: Mitgeführtes Equipment und Nachweis gegen die Nutzlast des Zugfahrzeugs.

Quelle: TERRA_Gewichtsbudget_V3.xlsx

Pos.	Position	kg	Herkunft	Beleg
1 Zugfahrzeug, Grundausrüstung				
1.2	Transportgestell, sechs Stellplätze	90,0	Annahme	Wird am Einsatzort nicht abgeladen, kein Hebezeug verfügbar
1.3	Erste Regelstufe je Flasche, Sammelmanifold, Absperrventile	25,0	Annahme	Stückliste P&ID V6, GSE-seitig, Ansatz für vier Flaschen
1.4	Umbilical DN 12, 15 m	15,0	gerechnet	Höchstlänge 15 m nach F-624
1.5	ConFoot CFU Stützen, vier Stück	184,0	Datenblatt	Oy Confoot Ltd., in Segmente von rund 25 kg teilbar
1.6	Lastverteilplatten unter die Eckbeschläge	40,0	Annahme	Nur auf nachgiebigem Untergrund erforderlich
1.7	Rangierrollen, vier Stück	100,0	Datenblatt	Soltec Containerräder mit Bremse, Twistlock-Anbindung
1.8	Feuerlöscher	25,0	Annahme	Werden beim Aufbau in den Container eingestellt
1.9	Datenleitung zum Kontrollstand, 100 m	40,0	Annahme	F-502, Länge nach angenommener Distanz, siehe Abschnitt 12.2
1.10	Werkzeug, Anschlagmittel, Ersatzteile	50,0	Annahme	Schätzung
1.11	Zweite Person	75,0	Annahme	Der Fahrer ist im Leergewicht enthalten
1.12	Erdung und Potentialausgleich nach F-522	12,0	Annahme	Erdungsspieße, Anschlussleitung, Klemmen
	GSE gesamt	656,0		
	Stützlast des Anhängers	140,0	Annahme	Zählt gegen die Nutzlast des Zugfahrzeugs
	Grundausrüstung gesamt	796,0		
2 Zugfahrzeug, Druckgas				
1.1	Stickstoffflaschen 4 × 50 L, 200 bar, Regelbestückung	320,0	gerechnet	Fünf Tests je Kampagne ohne Flaschenwechsel, siehe Abschnitt 6.3.5
1.1a	Stickstoffflaschen 2 × 50 L, 200 bar, Mindestbestückung	160,0	gerechnet	Alternativ zu Position 1.1, nicht zusätzlich

Nachweis gegen die Nutzlast des Zugfahrzeugs

Fortsetzung nächste Seite

Fortsetzung von Tabelle A.10

Pos.	Position	kg	Herkunft	Beleg
	Grundausrüstung	796,0		
	Druckgas, Regelbestückung	320,0		
	Belastung des Zugfahrzeugs	1116,0		
	Nutzlast des Beispielfahrzeugs	1223,4		
	Reserve	107,4		Ausnutzung 91,2 %, Grenze eingehalten
	Belastung mit Mindestbestückung	956,0		Nachrichtlich, Reserve 267,4 kg
3 Zweites Fahrzeug				
2.1	HTP 110 L einschließlich Transportgebinde	183,0	gerechnet	ADR-Klasse 5.1, nach B-105 nicht im Container transportiert
2.2	Treibstoff 50 L einschließlich Gebinde	50,0	gerechnet	ADR-Klasse 3
	Betriebsmedien gesamt	233,0		Eine Tankfüllung, Möglichkeitsnachweis und nicht Regelfall
2.3	Stromaggregat 10 kVA	230,0	Annahme	Marktband 230 bis 265 kg, Auslegung nach Anlaufstrom offen
	Bilanzierte Positionen	463,0		
4 Standortabhängigkeit				
	Elektrische Versorgung am Standort	–230		Stromaggregat entfällt, Position 2.3
	Betriebsmedien am Standort	–233		Gebinde entfallen, Positionen 2.1 und 2.2
	Druckgas am Standort über Schnittstelle S1	–320		Flaschen entfallen, Position 1.1
	Reduzierter Gasbedarf der Kampagne	–160		Position 1.1 wird durch 1.1a ersetzt, Planungsentscheidung
	Wasser am Standort	0		Kein Block auf diesem Blatt, siehe F-513

Bilanziert wird allein das Zugfahrzeug, weil es über Flaschengestell und Umbilical an den Prüfstand gebunden und damit nutzlaskritisch ist. Der Kontrollstand fährt nach Abschnitt 10.1 auf dem zweiten Fahrzeug und ist hier nicht bilanziert. Standortleistungen verringern die Zuladung des zweiten Fahrzeugs, sie machen es nicht entbehrlich.

Tabelle A.11: Anforderungen an das Zugfahrzeug und Kennwerte des Beispielfahrzeugs.

Quelle: TERRA_Gewichtsbudget_V3.xlsx

Nr.	Kriterium	Forderung	Beispiel- fahrzeug	Anmerkung
6.1	Zulässiges Gesamtgewicht	$\leq 3.500 \text{ kg}$	3.500 kg	Fahrerlaubnisklasse B, § 6 FeV
6.2	Anhängelast gebremst	$\geq 3.500 \text{ kg}$	3.500 kg	Zulässige Gesamtmasse des Anhängers
6.3	Zulässige Gesamtzugmasse	$\geq 7.000 \text{ kg}$	7.000 kg	Bindende Größe, nicht die Anhängelast allein
6.4	Zulässige Stützlast	$\geq 140 \text{ kg}$	140 kg	Anhängerseitiger Wert siehe Abschnitt 12.2
6.5	Nutzlast	$\geq 1.116 \text{ kg}$	1.223,4 kg	Nachweis in Tabelle A.10
6.6	Laderaum	geschlossen, ADR-tauglich	Kastenwagen	Stickstoff als Druckgas

Beispielfahrzeug: Volkswagen Crafter 35 Kastenwagen, mittlerer Radstand, 120 kW, Heckantrieb. Leergewicht mit Fahrer 2.276,6 kg, daraus Nutzlast 1.223,4 kg (siehe Datenblatt in Anhang A.19). Die Auswahl dient dem Nachweis der Marktverfügbarkeit und ist keine Beschaffungsempfehlung.

Die Stützlastforderung ist konservativ angesetzt. Vier Prozent der tatsächlichen Anhängerlast wären nur 129,7 kg. Kriterium 6.4 ist damit exakt und ohne Spielraum erfüllt.

Tabelle A.12: Elektrische Leistungsbilanz nach F-620.

Verbraucher	Leistung kW	Anmerkung
Klimatisierung, beide Geräte	1,8	Nominal, bis 2,7 kW im Maximum. Splitgeräte sind Wärmepumpen, die thermische Leistung ist nicht die elektrische Aufnahme
Druckluftkompressor	2,0	Läuft während des Heißlaufs nicht
Wasserpumpe	1,0	Läuft während des Heißlaufs nicht
Schaltschranktechnik	0,8	Datenerfassung, Steuerung, Netzwerk
Ex-Rohrventilator	0,2	Belüftung der Tankzone
Ladung der USV und Beleuchtung	1,0	
Summe ohne Gleichzeitigkeitsansatz	6,8–7,7	

Eine Standortversorgung mit 11 kW über CEE 16 A bei 400 V deckt den Bedarf. Im autarken Betrieb genügt ein Stromaggregat der Klasse 10 kVA. Die Gleichzeitigkeitsannahme ist eine eigene Festlegung, sie beruht darauf, dass Kompressor und Wasserpumpe während des Heißlaufs nicht laufen. Die elektrische Aufnahme des Atexxo-Geräts ist nicht öffentlich. Angesetzt ist der Wert des Daikin-Basisgeräts FTXM35, da das Atexxo-Datenblatt dieses Gerät als Ausgangsprodukt der ATEX-Umrüstung ausweist (siehe Anhang A.19). Die Auslegung des Aggregats nach dem Anlaufstrom des größten Motors statt nach der Leistungssumme ist als offener Punkt geführt.

Tabelle A.13: Schutzschale: Schattengeometrie nach dem Strahlensatz, Wandstärke und Masse. Quelle: TERRA_BS_Massenabschaetzung_V2.xlsx

Größe	Wert	Einheit	Anmerkung
<i>Lastfall und Wandstärke</i>			
Freigesetzte Energie	75,6	kJ	Deflagration mit Kammerbersten, Berstdruckfaktor 3
Fragmentenergie	6,43	kJ	Vier Fragmente, Energieanteil 0,34
Pfropfenmodell	9,23	mm	Nur örtliche Scherung, konservativ
Skalierung Project Atlas	9,08	mm	$t \cdot \sqrt{F/F_{Atlas}}$
Skalierung MRETS	5,60	mm	Ohne Gewebeanteil
Maßgebender Wert	9,23	mm	Größter der drei Wege
Mit Sicherheitsbeiwert 1,5	13,85	mm	Einmalig, nicht gestapelt
Angesetzte Wandstärke	14	mm	Aufgerundet, handelsüblich
<i>Abzuschattender Querschnitt an der Zonenwand TW1</i>			
Seitlich, je Seite ab Achse	1.172	mm	Halbe lichte Containerbreite
Nach unten, Achse bis Boden	950	mm	Achshöhe nach B-110
Nach oben, Achse bis Decke	1.426	mm	Lichte Höhe abzüglich Achshöhe
<i>Schattengeometrie</i>			
Abstand Quelle bis Schale <i>a</i>	659	mm	Kammermittelpunkt des kürzesten Triebwerks ^a
Abstand Quelle bis TW1 <i>b</i>	2.007	mm	
Verhältnis <i>a/b</i>	0,3284	–	Strahlensatz
Erforderliche Breite	770	mm	Symmetrisch zur Achse
Erforderliche Höhe	780	mm	312 mm unterhalb, 468 mm oberhalb der Achse
<i>Ausgeführte Platte</i>			
Kantenlänge	850	mm	Quadratisch, eben
Überdeckung seitlich, je Seite	40	mm	Entspricht 122 mm an TW1
Unterkante über Containerboden	603	mm	
Oberkante über Containerboden	1.453	mm	
<i>Masse</i>			
Plattenfläche	0,72	m ²	
Werkstoffdichte	7.850	kg/m ³	Baustahl S355
Masse der Schutzschale	79	kg	Rohe Blechmasse, Position 5.2 des Gewichtsbudgets

^a Bezugsquelle ist der Brennkammermittelpunkt des kürzesten Triebwerks der Schubklasse, 141 mm vor dem Düsenaustritt. Es liegt der Schale am nächsten und erzeugt damit den flachsten Schattenkegel, was den konservativen Fall darstellt.

Die Platte sitzt bewusst außermittig zur Triebwerksachse, weil nach oben eine größere Fläche abzuschatten ist als nach unten. Die Rechnung ist eine Massenabschätzung für das Gewichtsbudget und keine Schutz- oder Festigkeitsauslegung. Die Vorbehalte sind in Abschnitt 11.2 benannt.

A.14 Aufgabenstellung

Aufgabenstellung Masterthesis

„TERRA Concept“

Konzeptioneller Entwurf eines mobilen Teststands für Raketentriebwerke bis 5 kN Schub

Projekt-ID M.26.01
 Kandidat Henry Kröger
 Matrikelnummer
 Erstprüfer
 Zweitprüfer
 Betreuer

Ausgangssituation und Motivation

Für die Entwicklung und Qualifikation kleiner bis mittelgroßer Zwei-Flüssigkeits-Raketentriebwerke besteht ein Bedarf an flexiblen, mobilen Testinfrastrukturen. Insbesondere für Triebwerke im Schubbereich um **1 kN**, mit einer maximalen Auslegung bis **5 kN**, sollen Teststände verfügbar sein, die unabhängig von stationären Prüfständen betrieben werden können und gleichzeitig den sicherheitstechnischen und messtechnischen Anforderungen moderner Triebwerksentwicklung genügen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines detaillierten technischen Konzepts für einen solchen mobilen Raketentriebwerksteststand, der in einem standardisierten **20-ft-Container** integriert ist und auf einem **PKW-Anhänger** transportiert werden kann.

Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Masterarbeit ist die Ausarbeitung eines vollständigen, konsistenten und technisch fundierten Konzepts für einen mobilen Teststand zur Erprobung von Raketentriebwerken unter folgenden Randbedingungen:

- **Maximaler Triebwerksschub:** 5 kN
- **Ziel- und Auslegungsfokus:** 1 kN
- **Oxidator:**
 - Hochkonzentriertes Wasserstoffperoxid (HTP)
- **Treibstoffseite:** Auslegung für mehrere Treibstoffe, mindestens:
 - Kerosin
 - Nitromethan
 - Ethanol
 - Propan

Die Arbeit hat **konzeptionellen Charakter**. Detailkonstruktionen einzelner Komponenten sind nur dort vorzunehmen, wo sie zur Systemauslegung erforderlich sind.

Inhaltliche Schwerpunkte und Aufgaben

Zu Beginn der Arbeit ist ein Projektplan mit Arbeitspaketen, Zeitplan und Meilensteinplan auszuarbeiten und vorzulegen.

Im Rahmen der Arbeit sind insbesondere folgende Punkte zu bearbeiten:

1. Anforderungsanalyse

- Definition funktionaler, sicherheitstechnischer und betrieblicher Anforderungen
- **Erarbeitung und Definition der relevanten Triebwerks-Rahmenparameter** (z. B. Brennkammerdruck, Massenströme, Mischungsverhältnis, Zünd- und Betriebsdauer) als Grundlage der Teststandsauslegung
- Ableitung der Anforderungen aus Triebwerksparametern, Medien, Betriebsdrücken und Durchflussraten
- Berücksichtigung relevanter Normen, Richtlinien und Sicherheitsanforderungen (z. B. Druckgeräte, Gefahrstoffe, **Brandschutz**)

2. Gesamtkonzept des Teststands

- Systemarchitektur des Teststands innerhalb eines 20-ft-Containers
- Modularer Aufbau und Beschreibung der Schnittstellen
- Auslegung für einen mobilen Betrieb auf einem PKW-Anhänger
- Berücksichtigung von Gewichtsbeschränkungen entsprechend relevanter Führerscheinklassen

3. Fluid- und Mediensysteme

- Konzeption des Fluid-Handling-Systems für Oxidator und Treibstoffe
- Umschalt- und Anpassungsmöglichkeiten für unterschiedliche Treibstoffe
- Spül-, Befüll-, Entleer- und Sicherheitskonzepte
- Druckgasversorgung und Regelung

4. Mess-, Überwachungs- und Steuerungssysteme

- Integration von Messequipment (z. B. Schub, Drücke, Temperaturen, Durchflüsse)
- Datenerfassung, Signalverarbeitung und Datenspeicherung
- Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen (Interlocks, Notabschaltung)
- Konzeption einer geeigneten Steuerungsarchitektur

5. Betriebskonzepte

- Bewertung einer autarken Verwendung des Teststands (Energieversorgung, Medien, Klimatisierung)
- Vergleich mit einem Betrieb unter Nutzung vorhandener Ground-Support-Infrastruktur, insbesondere am Standort Trauen
- Logistik- und Aufbaukonzepte für den Testbetrieb

6. Container- und Mobilitätskonzept

- Klimatisierung des Containers unter Berücksichtigung von Messtechnik und Medien
- Mechanische Integration aller Subsysteme
- Konzept zur autarken Rangierbarkeit des Containers
- Transport- und Sicherungskonzepte

7. Kontrollstand

- Konzeption und Bewertung eines separaten Kontrollstands
- Untersuchung der Integration als zusätzliches Modul in einem Zugfahrzeug
- Schnittstellen zwischen Teststand und Kontrollstand (Live-Video, Daten, Energie, Sicherheit)

8. Brandschutz- und Sicherheitskonzepte

- Analyse der brandschutztechnischen Risiken des Testbetriebs (insbesondere HTP und kohlenwasserstoffbasierte Treibstoffe)
- Konzeption passiver und aktiver Brandschutzmaßnahmen (z. B. Materialwahl, Abschottung, Detektion, Löschkonzepte)
- Integration des Brandschutzes in das Gesamt-Sicherheitskonzept des Teststands
- Berücksichtigung einschlägiger Vorschriften und Richtlinien

9. Bewertung und Zusammenfassung

- Technische Bewertung des Gesamtkonzepts
- Identifikation von Risiken, offenen Punkten und Weiterentwicklungspotenzialen
- Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen für eine mögliche Realisierung

Ergebnis der Arbeit

Als Ergebnis der Masterarbeit ist ein vollständig dokumentiertes, nachvollziehbares und technisch konsistentes Gesamtkonzept eines mobilen Raketentriebwerksteststands vorzulegen. Dieses soll als Grundlage für eine spätere Detailkonstruktion und Realisierung dienen.

Zusätzlich ist ein **maßstäbliches, 3D-gedrucktes Modell** des Teststands (oder wesentlicher Teilbereiche) zu erstellen. Das Modell dient der anschaulichen Darstellung des Gesamtkonzepts, der räumlichen Integration der Subsysteme sowie der Unterstützung von Reviews und Präsentationen.

Was Sie mitbringen sollten:

Die Kapazitäten zur Betreuung dieser Masterthesis sind begrenzt. Daher müssen Sie ein hohes Maß an Eigenständigkeit und Selbstorganisation vorweisen.

Konkret ergeben sich folgende Anforderungen:

- Sehr gute Fähigkeit zum selbständigen, strukturierten und zielorientierten Arbeiten
- Sicherer Umgang mit technischer Literatur, Normen und Richtlinien
- Fundierte Vorkenntnisse im Bereich Raumfahrt- und Triebwerkssysteme, idealerweise aus einschlägigen Lehrveranstaltungen (z. B. DMSP, INTP)
- Gute Kenntnisse in CAD zur Erstellung von Systemlayouts und zur Vorbereitung des 3D-gedruckten Modells
- Fähigkeit zur eigenständigen Entwicklung, Dokumentation und kritischen Bewertung technischer Konzepte

Eine enge, wöchentliche Betreuung ist nicht vorgesehen, es ist von maximal monatlichen Betreuungsterminen auszugehen.

Erstprüfer



Zweitprüfer



Kandidat

A.15 Anforderungsdokument

Das Anforderungsdokument liegt in der Fassung V5 vor.

Anforderungsdokument

TERRA Concept

Konzeptioneller Entwurf eines mobilen Teststands für Raketentriebwerke bis 5 kN Schub

Projekt-ID	M.26.01
Kandidat	Henry Kröger, Matrikelnumme 
Erstprüfer	Prof. Dr. Antonio Francisco García Marín
Zweitprüfer	Henrik Kranich
Betreuer	Henrik Kranich, David Messow
Meilenstein	M1 — Anforderungsdokument & Triebwerksparameter
Arbeitspaket	AP 1 — Anforderungsanalyse
Dokumentstand	V5, 26.08.2026 — Abgabestand

Hinweis zum Dokumentstatus: Dieses Dokument ist ein lebendes Dokument. Es wurde im Verlauf der Bearbeitung mehrfach fortgeschrieben; die Fortschreibung ist über die nachstehenden Versionsstände dokumentiert. Verbliebene offene Punkte und Restunsicherheiten sind in Abschnitt 12.2 der Arbeit geführt. Quantitative Feinwerte sind an einzelnen Stellen auf die zugehörigen Kapitel verwiesen und dort begründet ergänzt.

Änderungen V1 → V2 (05.05.2026): Einarbeitung der Architekturentscheidungen aus der Konzeptphase (3-Zonen-Layout, Triebwerksposition, Absetz- und Verankerungskonzept, GSE-Strategie) sowie der R&I-Topologie (Pneumatik als eigener Strang, Sammelbehälter als gemeinsame Senke, Wasserpumpen-Spülung, Mehstofffähigkeitsschnittstellen).

Änderungen V2 → V3 (27.05.2026): Einarbeitung der Meeting-Updates aus dem Betreuer-Meeting. Wesentliche inhaltliche Änderungen: HTP-Konzentrationsbereich materialseitig auf bis zu 100 % erweitert (F-200, F-205, F-206); konsequente Trennung von Vent- und Spülpfaden HTP/Treibstoff mit zwei getrennten Sammelbehältern statt einer gemeinsamen Senke (F-207, F-262, F-265 umformuliert); Schub- und Massenstrommessung explizit auf Modularität und Optimierung am 1-kN-Nennpunkt geschärft (F-301, F-312); konsolidierter Standort-Schnittstellenblock als neue Anforderung (F-624); Setup-Zeit-Ziel als weiches Ziel (2 Tage ab Anlieferung, ohne Personalstamm-Vorgabe) in B-120 / B-121.

Änderungen V3 → V4 (31.07.2026): Einarbeitung der Auslegungsergebnisse des Druckgasstrangs vom 29.07.2026 (Quelle: TERRA_Druckverlust_V3.xlsx, R&I-Fließbild). Wesentliche inhaltliche Änderungen: Betriebsdruck in F-241 auf 39 bar festgelegt und gegen Brennkammerdruck, Leitungsverlust und Injektor-Budget aufgeschlüsselt; Flaschendruckstufe in F-243 auf 200 bar entschieden und die containerfeste Installation von der Flaschendruckstufe entkoppelt; die containerinterne Flaschenbatterie entfällt ersatzlos, Flaschenbatterie und Standortversorgung sind alternative externe Quellen an derselben

Schnittstelle S1 (F-242, F-622, F-248); Schnittstelle S1 in F-624 mit Nennweite, Druckstufe und Entlüftungsventil spezifiziert.

Änderungen V4 → V5 (26.08.2026): Abgabestand. Einarbeitung der Ergebnisse aus Sicherheits- und CAD-Auslegung sowie Rückwirkungen aus der Subsystemauslegung auf die Anforderungsebene. Wesentliche inhaltliche Änderungen: F-623 entfällt ersatzlos und die Druckluftschnittstelle wird aus F-624 und B-141 gestrichen, da die Druckluft nach F-264 containerintern erzeugt wird; F-542 auf Fragmentschutz und Thermostrahlung eingeengt und ein Containment der Druckwelle ausdrücklich ausgeschlossen; Massenstromangaben in F-102 und F-202 auf den 5-kN-Envelope korrigiert; Druckauslegung des Treibstofftanks in F-226 von Addition auf Einhüllende umgestellt; Belüftung in F-521 zonenweise getrennt gefordert; Betriebs- und Sicherheitszustände in F-432, F-440, F-550, F-551 und F-554 auf die Benennung des Zustandsautomaten umgestellt; Verankerung in B-134 von Erdankern auf Reibschluss mit Antirutschmatten umgestellt; neue Anforderungen F-442, F-443, F-503, F-555, F-556 und B-113 zur Anbindung von Zustandsautomat, Abbruchkonzept, Zutrittssicherung und Hüllenöffnungen; F-200 mit der Einhüllenden-Begründung geschlossen; Status von B-102, B-103 und B-112 als erledigt nachgezogen.

1. Zweck und Geltungsbereich

Dieses Dokument definiert die funktionalen, sicherheitstechnischen und betrieblichen Anforderungen an den mobilen Raketentriebwerksprüfstand TERRA Concept. Es bildet die Grundlage für die Systemarchitektur, die Subsystem-Konzeption und die Bewertung alternativer Lösungsvarianten im weiteren Verlauf der Masterthesis.

Der Prüfstand wird im Rahmen des GreenThrust-Programms der Hochschule Bremen konzipiert. Primäres Ziel ist die Erprobung kleiner Zwei-Flüssigkeits-Raketentriebwerke mit hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid (HTP) als Oxidator und wahlweise Ethanol, Kerosin oder Propan als Treibstoff, im Schubbereich von 1 kN (Auslegungsfokus) bis maximal 5 kN (Envelope).

Die Anforderungen sind in drei Klassen gegliedert: Funktionale Anforderungen (F-xxx) beschreiben, was der Prüfstand leisten muss. Sicherheitstechnische Compliance-Anforderungen (S-xxx) benennen die einzuhaltenden Normen und Richtlinien als Nachweisgrundlage. Betriebliche Anforderungen (B-xxx) beschreiben Bedingungen für Transport, Aufbau und Betrieb.

Das Dokument erhebt keinen Anspruch auf vollständige Detailspezifikation. Quantitative Feinwerte (z. B. Messunsicherheiten, Abtastraten, konkrete Löschmittelmengen) werden im jeweiligen Arbeitspaket (AP 3 bis AP 8) ergänzt.

2. Referenzdokumente

2.1 Projektdokumente

- Aufgabenstellung Masterthesis "TERRA Concept", Projekt-ID M.26.01, Stand 27.01.2026 (Kranich, Messow)
- Exposé Masterthesis "TERRA Concept", V2, Stand April 2026 (Kröger)
- TERRA_Parameters_V2.xlsx — Triebwerks-Rahmenparameter und Tankauslegung
- TERRA_Druckverlust_V3.xlsx — Druckverlust-, Volumen- und Gasbudgetrechnung
- TERRA_Gewichtsbudget_V3.xlsx — Massenbilanz, Margenmethodik und Nachweis gegen die Zuggesamtmasse
- TERRA_BS_Massenabschaetzung.xlsx — Lastfall und Massenabschätzung der Schutzschale
- R&I-Fließbild des Fluid- und Mediensystems
- TERRA_Literatur.xlsx — kommentierte Literaturliste
- TERRA_Gantt.xlsx — Arbeits- und Meilensteinplan

2.2 Normen und Richtlinien (informativ, siehe Sektion 4.2)

- Richtlinie 2014/68/EU (DGRL) — Druckgeräte
- Richtlinie 2010/35/EU (TPED) — Ortsbewegliche Druckgeräte
- BetrSichV — Betriebssicherheitsverordnung
- GefStoffV — Gefahrstoffverordnung; einschlägige TRGS (insb. 509, 510, 727)
- Richtlinien 1999/92/EG und 2014/34/EU (ATEX) — Explosionsschutz; TRBS 2152, 2153
- DIN EN ISO 13849-1 — Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen; informativ IEC 61511
- DIN EN 60073 — Kennzeichnung und Farbcodierung; EMV-Richtlinie 2014/30/EU
- DIN EN 15154 — Notduschen und Augenspülung; PSA-Verordnung 2016/425; ArbStättV, DGUV

- WHG, AwSV, AbwV, AVV, KrWG, BImSchG, TA Lärm — Umweltrecht
- ADR, StVZO, ISO 668, ISO 1496, EN 12195 — Transport und Container

2.3 Technisch-wissenschaftliche Referenzen (Auswahl)

- Mickels, C. et al. (2019): Project Atlas — A Mobile Universal Rocket Engine Test Stand (Embry-Riddle), AIAA SciTech
- May, S. et al. (DLR RSC³ 2024): MoHyPer — Mobile Hydrogen Peroxide Container
- Ringas, J. et al. (2022): 1 kN Bipropellant Feed Assembly Design (UCT), Springer
- Sutton, G. P.; Biblarz, O.: Rocket Propulsion Elements
- MIL-PRF-16005F — Propellant, Hydrogen Peroxide

3. Systemkontext und Abgrenzungen

3.1 Systemüberblick

TERRA Concept ist ein mobiler, containerisierter Prüfstand für die statische Erprobung kleiner druckgeförderter Zwei-Flüssigkeits-Raketentriebwerke. Das Gesamtsystem besteht aus drei funktionalen Einheiten: der Prüfstand selbst (Container bzw. Leichtbau-Plattform mit Fluidsystem, Messtechnik, Triebwerksaufnahme), dem Kontrollstand (separater Kontrollraum oder integriert in das Zugfahrzeug) und dem Transportsystem (Straßenanhänger mit passender Zugmaschine).

Die Infrastruktur wird als Forschungsinfrastruktur für wechselnde Triebwerkskonfigurationen ausgelegt. Das zu testende Triebwerk selbst ist nicht Teil der Konzeption; seine Schnittstellen zum Prüfstand sind definiert (siehe Abschnitt 4.1.6).

3.2 Betriebsvarianten

Der Prüfstand wird für zwei Betriebsvarianten ausgelegt: autarker Betrieb (ohne externe Infrastruktur, mit eigener Energie-, Wasser- und Druckgasversorgung) und GSE-gestützter Betrieb (mit externer Infrastruktur, wie z. B. am Referenzstandort vorgesehen). Beide Varianten werden im weiteren Verlauf vergleichend bewertet.

3.3 Rahmenannahmen

- Horizontale Triebwerksorientierung (formale Begründung in der Thesis)
- Single-Engine-Stand: ein Triebwerk pro Testlauf
- HTP wird stationär in den Betriebstanks zwischen Tests gelagert; für den Transport sind die Tanks zwingend entleert und gespült
- Stickstoff (N₂) als Pressurant; die Auswahl ist in F-240 begründet

3.4 Abgrenzungen

3.4.1 Nitromethan als Treibstoff

Die Aufgabenstellung nennt Nitromethan als einen von vier vorgesehenen Treibstoffen. In Abstimmung mit den Betreuern (Kranich, 21.04.2026) wurde Nitromethan aus dem Scope entfernt, da (1) regeneratives Cooling mit Nitromethan aufgrund der Detonationsempfindlichkeit nicht möglich ist, (2) HTP als Oxidator diese Einschränkung nicht kompensieren kann und (3) Nitromethan damit für die im GreenThrust-Programm mittelfristig vorgesehenen Triebwerke nicht relevant ist. Die Erweiterbarkeit gemäß F-220 SOLL bezieht sich ausdrücklich nicht auf Stoffe mit vergleichbarem Detonationsrisiko.

3.4.2 Pumpengeförderte Triebwerke

TERRA Concept ist ausgelegt für druckgeförderte Triebwerke bis zu einem Brennkammerdruck von 30 bar. Triebwerke mit höherem Brennkammerdruck oder mit elektrischen bzw. mechanischen Förderpumpen sind außerhalb des Scopes und werden im Rahmen eines späteren Entwicklungsprogramms adressiert.

3.4.3 Triebwerksentwicklung

Das zu erprobende Triebwerk wird nicht im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Die Thesis beschränkt sich auf den Prüfstand als Infrastruktur und definiert die Schnittstellen zum Triebwerk (mechanisch, Fluid, Signal) so, dass unterschiedliche Triebwerkskonfigurationen im Envelope betrieben werden können.

3.4.4 Detailkonstruktion und Prototyp

Die Arbeit hat konzeptionellen Charakter. Detailkonstruktionen einzelner Bauteile werden nur dort ausgeführt, wo sie für die Systemauslegung erforderlich sind. Es werden keine Prototypen gebaut und keine experimentelle Validierung durchgeführt. Die Steuerungssoftware wird konzeptionell behandelt, nicht implementiert.

4. Anforderungen

Formale Konvention: Jede Anforderung hat eine eindeutige ID, eine Klassifizierung (MUSS — verpflichtend; SOLL — angestrebt mit begründeter Abweichung zulässig; KANN — optional), eine Beschreibung, eine Herkunftsangabe und eine Verifikationsart.

Verifikationsarten: Analyse (rechnerischer, methodischer oder modellbasierter Nachweis), Inspektion (dokumentarische Sichtprüfung, Konstruktionsreview), Dokumentation (Nachweis über Hersteller- und Zertifikatsunterlagen), Messung (messtechnischer Nachweis am realisierten System), Demonstration (Funktionsvorführung) und Test (quantitativ-experimenteller Nachweis). Die Angabe bezeichnet die für die jeweilige Anforderung vorgesehene Nachweisführung, nicht den im Rahmen dieser Arbeit erbrachten Nachweis; innerhalb dieser konzeptuellen Arbeit werden ausschließlich Analyse und Inspektion durchgeführt. Anforderungs-IDs sind stabile Kennungen: entfallene Anforderungen werden nicht nachbelegt und ihre Nummern nicht neu vergeben, Nummernlücken sind daher kein Hinweis auf fehlende Inhalte.

4.1 Funktionale Anforderungen

4.1.1 Testdurchführung

F-100 — Schub- und Brenndauer-Envelope [MUSS]

Das System muss Raketentriebwerke im Schubbereich von 1 kN (Auslegungsfokus) bis 5 kN (Envelope) und bei Brenndauern von bis zu 60 s statisch erproben können.

Auslegungsfälle und Tankvolumina gemäß TERRA_Parameters_V2.xlsx.

Herkunft: Aufgabenstellung; TERRA_Parameters_V2.xlsx

Verifikation: Analyse — Durchrechnung aller Auslegungspunkte; Inspektion — Systemlayout

F-101 — Triebwerks-Fixierung [MUSS]

Das System muss das zu testende Triebwerk unter allen Betriebs- und Fehlerfällen derart fixieren, dass weder Verschiebung noch Verdrehung gegenüber der Messstruktur auftritt. Zulässige Restbewegung ist auf die Messtoleranz der Schubmessung zu begrenzen.

Herkunft: Messtechnik-Praxis (definierte Krafteinleitung); Sicherheit

Verifikation: Analyse — Statik- und Steifigkeitsrechnung der Triebwerkshalterung

F-102 — Thermische Belastbarkeit [MUSS]

Das System muss der thermischen Belastung eines Heißtests bei maximalem Schub (5 kN) und maximaler Brenndauer (60 s) standhalten, ohne dass Struktur, Fluidkomponenten oder Messtechnik über ihre zulässigen Grenzwerte hinaus beansprucht werden.

Herkunft: Triebwerksparameter ($T_c \approx 3000\text{ K}$, $\dot{m}_{\text{gesamt}}$ bis $\sim 2.110\text{ g/s}$ im 5-kN-Envelope, $t = 60\text{ s}$); TERRA_Parameters_V2.xlsx

Verifikation: Analyse — Wärmestrom- und Materialauslegung; ggf. Oberflächenschutzkonzept

F-103 — Abgasabführung [MUSS]

Das System muss die Triebwerksabgase so abführen, dass weder Containerstruktur, Fluidsystem noch Elektrik gefährdet werden und sich keine kritischen Gas- oder Dampfkonzentrationen im Innenraum ansammeln. Dies gilt auch für unverbrannte Restbestandteile und HTP-Zersetzungsprodukte.

Herkunft: Aufgabenstellung; Sicherheit

Verifikation: Analyse — Strömungs-/Abgaswegauslegung, ggf. CFD; Gasdetektion im Betrieb

F-104 — Verankerung am Aufstellort [MUSS]

Der Prüfstand muss während des Testbetriebs gegenüber dem Untergrund formschlüssig gesichert sein, sodass durch den Triebwerksschub (bis 5 kN axial) keine unzulässige Bewegung der Gesamtstruktur auftritt. Kipp- und Rutschsicherheit sind nachzuweisen.

Herkunft: Aufgabenstellung; Sicherheit

Verifikation: Analyse — Verankerungskonzept, Kippsicherheitsnachweis, Bodenpressung

F-105 — Test-Turnaround [SOLL]

Der Prüfstand soll so ausgelegt sein, dass nach einem durchgeführten Test ohne Umbaumaßnahmen ein weiterer Test möglich ist (Wiederbefüllung, Sichtprüfung, Abkühlung). Eine Mindestrate wird nicht vorgegeben; das System ist forschungs-, nicht produktionsorientiert.

Herkunft: Auslegungsentscheidung (nicht-kommerzielle Ausrichtung)

Verifikation: Inspektion — Testablauf im Betriebskonzept

F-106 — Zündinfrastruktur [MUSS]

Der Prüfstand muss die Infrastruktur zur sicheren Zündung des Triebwerks bereitstellen. Die konkrete Zündmethode (pyrotechnisch, elektrisch, katalytisch) bleibt triebwerksseitig wählbar; die prüfstandsseitige Schnittstelle (Energieversorgung, Signalführung, Freigabelogik) muss die gängigen Methoden abdecken.

Herkunft: Systemabgrenzung (Triebwerk = Prüfling, Prüfstand = Infrastruktur)

Verifikation: Analyse — Auslegung Zündschnittstelle

4.1.2 Fluidhandhabung

4.1.2.a Oxidator-System (HTP)

F-200 — HTP-Betriebsmedium [MUSS]

Das System muss mit HTP als Oxidator betrieben werden können. Primärer Auslegungspunkt für die Triebwerks- und Tankauslegung (TERRA_Parameters_V2.xlsx, F-202, F-203) ist HTP 90 %. Material-, Reinigungs- und Sicherheitsauslegung müssen HTP-Konzentrationen bis 100 % abdecken, sodass der Prüfstand auch mit höher konzentriertem HTP (z. B. 98 %, 99 %) ohne Materialeingriff betrieben werden kann; eine gesonderte Durchrechnung höherer Konzentrationen für die fluidische Dimensionierung ist nicht erforderlich, da HTP 90 % für Tankvolumen, Massenstrom und Druckgasbedarf der einhüllende Fall ist: eine höhere Konzentration hebt spezifischen Impuls und Dichte an und senkt damit Massenstrom und verdrängtes Volumen bei gleichem Schub. Für Werkstoffauswahl, Reinigung und Sicherheitsauslegung ist umgekehrt die Obergrenze von 100 % einhüllend; diese Trennung ist in F-206, F-510 und F-511 abgebildet.

Herkunft: Aufgabenstellung; Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (Erweiterung Konzentrationsbereich)

Verifikation: Inspektion — Materialauswahl und Systemauslegung; Analyse — Auslegungsfälle bei alternativen Konzentrationen

F-201 — HTP-Betriebsvorratshaltung [MUSS]

Das System muss HTP im stationären Zustand am Einsatzort in den Betriebstanks lagern können (Default-Auslegungspunkt HTP 90 % gemäß F-200; weitere Konzentrationen im Rahmen von F-200 zulässig). Für den Transport müssen die HTP-führenden Tanks und Leitungen entleert und gespült sein.

Herkunft: Auslegungsentscheidung (Transportregime); Rahmenannahme Sektion 3.3

Verifikation: Inspektion — Betriebskonzept dokumentiert Transport- und Lagerzustände

F-202 — HTP-Zuführung [MUSS]

Das HTP-Fluidsystem muss dem Triebwerk HTP mit Druck- und Massenstromvorgaben gemäß TERRA_Parameters_V2.xlsx im gesamten Envelope zuführen. Dimensionierend ist der 5-kN-Envelope mit einem Tankdruck von 39 bar und einem HTP-Massenstrom von bis zu 1.851 g/s. Der Wert ist der einhüllende Fall über die Treibstoffe im Scope (Propan 1.851 g/s, Kerosin 1.848 g/s, Ethanol 1.757 g/s).

Herkunft: TERRA_Parameters_V2.xlsx

Verifikation: Analyse — Leitungs-, Druckverlust- und Kavitationsauslegung

F-203 — Tank-Kapazität HTP [MUSS]

Das HTP-Tankvolumen muss mindestens 110 L betragen und so ausgelegt sein, dass jeder Auslegungspunkt (1 kN / 5 kN) über die volle Brenndauer (60 s) mit ausreichender Reserve gefahren werden kann.

Herkunft: TERRA_Parameters_V2.xlsx

Verifikation: Analyse — Tankvolumen- und Reserverechnung

F-204 — Befüllen und Entleeren HTP [MUSS]

Das System muss das Befüllen und restloses Entleeren der HTP-Tanks und -Leitungen ohne Demontage von Komponenten ermöglichen.

Herkunft: Ringas et al. (ops requirement); Transportvorgabe (F-201)

Verifikation: Inspektion — Fluidsystem-R&I

F-205 — Wasser-Spülung HTP-Pfad [MUSS]

Das System muss vor und nach jedem Testlauf sowie vor Transport eine Spülung des HTP-Medienpfades mit vollentsalztem Wasser (VE-Wasser) ermöglichen, um HTP-Rückstände und potenzielle Zündquellen (organische Verunreinigungen, Zersetzungskatalysatoren) zu entfernen. Die routinemäßige Spülung umfasst den HTP-Medienpfad zwischen Tank Isolation Valve und Triebwerks-Einlass; der HTP-Tank selbst wird nicht im Test-Zyklus, sondern als separate Wartungsprozedur gespült. Das Spülkonzept muss bei Betrieb mit hoch- bis vollkonzentriertem HTP (siehe F-200) sicherstellen, dass keine relevante Restspülwassermenge im HTP-Medienpfad zurückbleibt, die zu einer unerwünschten Verdünnung des Betriebs-HTP führen würde. Die Detailauslegung des Verfahrens (z. B. N₂-Trocknungsschritt nach Wasserspülung, alternative Spülmedien oder geometrische Pfadtrennung) erfolgt in AP 3/8. Das System muss eine Aufbereitungsstufe enthalten, die das eingespeiste Frischwasser auf die für HTP-Kontakt erforderliche Qualität bringt. Maßgeblich sind der Chloridgehalt und metallische Verunreinigungen, die die HTP-Zersetzung katalysieren; kommunales Trinkwasser erfüllt diese Anforderung nicht zwingend. Der zulässige Grenzwert richtet sich nach der Angabe des HTP-Lieferanten; die Herstellerdokumentation nennt für HTP-Kontakt eine Chloridgrenze in der Größenordnung von 10 mg/l, während die Trinkwasserverordnung bis zu 250 mg/l zulässt. Die Einhaltung ist durch eine Analyse des aufbereiteten Wassers nachzuweisen.

Herkunft: HTP-Handlingpraxis (MoHyPer: integriertes Wasseraufbereitungssystem); Herstellerdokumentation zur Wasserqualität bei HTP-Kontakt; Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (HTP-100%-Verdünnungsproblem)

Verifikation: Inspektion — Spülprozedur dokumentiert, Spülpfade im R&I; Dokumentation — Wasseranalyse des aufbereiteten Spülwassers

F-206 — Materialverträglichkeit HTP [MUSS]

Alle medienberührenden Komponenten im HTP-Pfad (Tanks, Leitungen, Ventile, Dichtungen, Sensoren) müssen aus HTP-kompatiblen Werkstoffen ausgeführt und nach HTP-Reinigungsstandard ("clean for HTP service") vorbereitet sein. Die Werkstoffauswahl muss für den vollen Konzentrationsbereich gemäß F-200 (bis 100 %) gültig sein; werden Werkstoffe verbaut, deren Eignung auf bestimmte Konzentrationsbereiche beschränkt ist, ist dies im Betriebskonzept als Einsatzgrenze zu dokumentieren.

Herkunft: Sicherheits- und Handlingpraxis; passivierte Edelstähle, PTFE, spezifische Elastomere; Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (HTP-Konzentrationsbereich)

Verifikation: Inspektion — Werkstoffliste und Reinigungsnachweis mit Quellennachweis je Werkstoff

F-207 — Trennung HTP- und Treibstoffpfad [MUSS]

HTP- und Treibstoffpfad müssen im Ruhezustand physisch getrennt sein. Eine Vermischung im Fluidsystem (außerhalb der Brennkammer) darf in keinem Einzelfehlerfall auftreten. Die Trennung umfasst ausdrücklich auch sämtliche Vent-, Spül- und Drainagepfade einschließlich Sammelbehälter und Vent-Auslässe (siehe F-262, F-265); ein gemeinsamer Sammelbehälter oder gemeinsamer Vent für beide Medien ist ausgeschlossen.

Herkunft: Sicherheit (hypergole Reaktion mit Hydrocarbon-Treibstoff); Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (Vent-/Spülpfad-Trennung)

Verifikation: Analyse — FMEA Fluidsystem; Inspektion — R&I (getrennte Systeme, keine gemeinsamen Ventile)

F-208 — Überdruckabsicherung HTP [MUSS]

HTP-Tank und -Leitungen müssen gegen Überdruck abgesichert sein. Eine druckentlastende Abblasung muss sicher und kontrolliert in einen dafür vorgesehenen Bereich erfolgen (keine Freisetzung in Innenräume, kein Rückstoß).

Herkunft: DGRL 2014/68/EU; HTP-Zersetzungsverhalten (exotherm)

Verifikation: Analyse — Ventil- und Bersteinrichtungsdimensionierung; Ableitungspfad

F-209 — Temperaturkontrolle HTP [MUSS]

Die HTP-Temperatur in den Betriebstanks muss im Ruhezustand und während des Testbetriebs unter einem definierten Schwellwert gehalten werden. Ziel: Begrenzung der Zersetzungsrate (Literatur-Richtwert ≤ 30 °C; Feinwert in AP 3 zu bestätigen).

Herkunft: HTP-Handlingpraxis (Zersetzung temperaturabhängig); MoHyPer (klimatisierter Tankraum)

Verifikation: Analyse — Klimatisierungskonzept; Demonstration — Temperaturüberwachung mit Alarmgrenze

4.1.2.b Treibstoffsystem (Mehrstofffähigkeit)

F-220 — Mehrstofffähigkeit [MUSS/SOLL]

MUSS: Das Treibstoffsystem muss mit Ethanol (95 %) als primärem Auslegungstreibstoff sowie mit Propan und Kerosin (RP-1) als Ausbaustufen betrieben werden können. Die Detailauslegung erfolgt auf Ethanol; der Betrieb mit Propan und Kerosin muss ohne Änderung tragender Strukturen oder Eingriffe ins HTP-System möglich sein. SOLL: Das System soll so ausgelegt sein, dass eine spätere Erweiterung auf zusätzliche kohlenwasserstoffbasierte Treibstoffe mit vergleichbaren physikalisch-chemischen Eigenschaften ohne grundlegenden Umbau möglich ist; die Verträglichkeit weiterer Treibstoffe ist im Einzelfall zu prüfen. (Nitromethan ist gemäß Sektion 3.4.1 ausgeschlossen.)

Herkunft: Aufgabenstellung; Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026); Designentscheidung "Forschungsinfrastruktur"

Verifikation: Inspektion — Werkstoffmatrix + R&I; Analyse — Bewertung der Erweiterbarkeit anhand Parameter-Envelope (Dichte, Dampfdruck, Reaktivität mit HTP)

F-220a — Mehrstofffähigkeitsschnittstellen [MUSS]

Das Treibstofftank-System muss zwei separate Befüll-/Entleer-Schnittstellen aufweisen: einen Flüssigkeitsanschluss für drucklose Treibstoffe (Ethanol, Kerosin) und einen Druckanschluss für verflüssigte Gase (Propan). Beide Schnittstellen müssen im Ruhezustand verschlossen und dicht sein.

Herkunft: Designentscheidung 29.04.2026; F-220, F-228

Verifikation: Inspektion — R&I; Schnittstellenspezifikation

F-221 — Treibstoffzuführung [MUSS]

Das Treibstoffsystem muss dem Triebwerk den jeweiligen Treibstoff mit Druck- und Massenstromvorgaben gemäß TERRA_Parameters_V2.xlsx zuführen.

Herkunft: TERRA_Parameters_V2.xlsx

Verifikation: Analyse — Leitungs-/Druckverlustauslegung je Treibstoff

F-222 — Tank-Kapazität Treibstoff [MUSS]

Das Treibstofftankvolumen muss mindestens 50 L betragen. Für Ethanol, Kerosin und Propan deckt dieses Volumen die volle Brenndauer (60 s) im gesamten Envelope (1–5 kN).

Herkunft: TERRA_Parameters_V2.xlsx

Verifikation: Analyse — Tankvolumen- und Reserverechnung je Treibstoff

F-223 — Befüllen und Entleeren Treibstoff [MUSS]

Das System muss Befüllen und restloses Entleeren der Treibstofftanks und -Leitungen ohne Demontage ermöglichen. Für den Transport müssen die Treibstoffführenden Tanks und Leitungen entleert und inertisiert sein.

Herkunft: Transportregime (ADR Klasse 3 bzw. Klasse 2 für Propan); Sicherheit

Verifikation: Inspektion — Betriebskonzept und R&I

F-224 — Inertgas-Spülung Treibstoff [MUSS]

Das System muss vor und nach jedem Testlauf sowie vor Transport eine Spülung des Treibstoffmedienpfades mit Inertgas (N₂) ermöglichen, um brennbare Rückstände und Dämpfe zu verdrängen.

Herkunft: Sicherheit (Ex-Schutz, ATEX-Vermeidung)

Verifikation: Inspektion — Spülprozedur; Analyse — O₂-Restkonzentration

F-225 — Materialverträglichkeit Treibstoff [MUSS]

Medienberührende Komponenten im Treibstoffpfad müssen mit allen vorgesehenen Treibstoffen chemisch und temperaturseitig verträglich sein. Kritische Paarungen (z. B. Elastomer-Ethanol; Dichtungswerkstoffe-Propan) sind in einer Werkstoffmatrix Treibstoff × Komponente dokumentiert.

Herkunft: Materialkompatibilitätsdaten; Literatur

Verifikation: Inspektion — Werkstoffmatrix

F-226 — Überdruckabsicherung Treibstoff [MUSS]

Treibstofftank und -Leitungen müssen gegen Überdruck abgesichert sein. Der Auslegungsdruck ist der größere Wert aus dem Betriebsdruck nach F-241 und dem Dampfdruck des Mediums bei maximaler Auslegungstemperatur. Für Propan als verflüssigtes Gas liegt der Dampfdruck bei rund 14 bar bei 40 °C und ist damit vom Betriebsdruck von 39 bar eingehüllt; dimensionierend bleibt der Betriebsdruck. Für den drucklos abgestellten Zustand ist der Dampfdruck der maßgebende Lastfall. Druckentlastung muss kontrolliert in einen sicheren Bereich erfolgen.

Herkunft: DGRL 2014/68/EU; Thermodynamik Propan

Verifikation: Analyse — Tank- und Ventilauslegung; Dampfdruckkurven

F-227 — Elektrostatische Ableitung [MUSS]

Der Treibstoffmedienpfad muss elektrostatisch geerdet und leitfähig ausgeführt sein. Beim Befüllen und beim Fließen von Kerosin und Ethanol können sich relevante elektrostatische Ladungsmengen aufbauen.

Herkunft: TRBS 2153, TRGS 727

Verifikation: Inspektion — Erdungs- und Potentialausgleichskonzept

F-228 — Treibstoffwechsel-Prozedur [MUSS]

Der Wechsel zwischen zwei Treibstoffen muss durch definierte Prozedur erfolgen (Entleeren → Inertspülung → Neu-Befüllen). Eine Restvermischung zweier Treibstoffe im Tank oder Medienpfad darf nicht auftreten.

Der Wechsel umfasst Niedrigpunkt-Drainage des Treibstofftanks und N₂-Tank-Spülung über einen separaten Tank-Spüleintritt (gegen Strömung). Das System muss einen entsprechenden Pfad im Fluidsystem vorsehen.

Herkunft: Mehrstoffaähigkeits-Anforderung; Sicherheit (Zündhygiene, reproduzierbare O/F)

Verifikation: Inspektion — Wechselprozedur im Betriebskonzept

F-229 — Niedrigpunkt-Drain Treibstofftank [MUSS]

Das Treibstofftank-System muss einen Niedrigpunkt-Drain am Tankboden aufweisen, der eine vollständige Entleerung des Tanks bei Treibstoffwechsel oder Wartung ermöglicht. Der Drain führt in den Treibstoffsammelbehälter und ist im Testbetrieb absperrenbar.

Herkunft: Designentscheidung 29.04.2026; F-228 (Trockenlegung vor Neu-Befüllung)

Verifikation: Inspektion — R&I

4.1.2.c Druckgasversorgung

F-240 — Druckgas-Medium [MUSS]

Das System muss mit Stickstoff (N₂) als Pressurant betrieben werden. Die Wahl ist getroffen und gegen Helium und Luft begründet. Ausschlaggebend sind die Inertheit gegenüber HTP und den Treibstoffen, Verfügbarkeit und Beschaffungskosten sowie die Eignung als Spül- und Inertisierungsmedium nach F-224 und F-247.

Herkunft: Designentscheidung (Inertheit, HTP- und Treibstoffverträglichkeit, Verfügbarkeit)

Verifikation: Inspektion — Materialverträglichkeit und Systemauslegung

F-241 — Bereitstellung Betriebsdruck [MUSS]

Das Druckgassystem muss die Tanks (HTP und Treibstoff) auf einen Betriebsdruck von 39 bar bringen und diesen über die gesamte Brenndauer (max. 60 s) unter Einhaltung der Regelgüte stabil halten. Der Wert setzt sich zusammen aus dem Brennkammerdruck von 30 bar, dem gerechneten Druckverlust der Zuleitung von 3,8 bar im dimensionierenden Fall (HTP-Pfad im 5-kN-Envelope, TERRA_Druckverlust_V3.xlsx) und einem verbleibenden Anteil von 5,2 bar für den Druckabfall über den Injektor. Der Prüfstand stellt damit am Injektor-Eingang 35,2 bar bereit, was bei einem Brennkammerdruck von 30 bar einen Injektor-Druckabfall von rund 17 Prozent zulässt; dieser Wert ist als Schnittstellenangabe im ICD nach F-601 zu dokumentieren. Nach oben ist der Betriebsdruck durch die Druckstufe PN 40 des Tank- und Aufdruckabschnitts begrenzt, sodass 39 bar der maximal verfügbare Wert innerhalb der gewählten Druckstufe ist. Die Druckabfallrate darf die für die Schubstabilität zulässige Grenze (Feinwert in AP 3) nicht überschreiten.

Herkunft: Triebwerksauslegung (pressure-fed); TERRA_Parameters_V2.xlsx;

TERRA_Druckverlust_V3.xlsx (Blätter 5_Summary und 6_Pressurant_Kaskade)

Verifikation: Analyse — Druckverlustrechnung Tank → Injektor-Eingang; Druckregelkreis-Auslegung; Regelgüte-Nachweis

F-242 — Druckgasvorrat und Flaschenbatterie [MUSS]

Die Druckgasversorgung muss als Flaschenbatterie ausgeführt sein, damit mehrere Tests ohne Flaschenwechsel gefahren werden können. Die Batterie ist ein externes Ground Support Equipment und steht auf einem Transportgestell mit sechs Stellplätzen; die Regelbestückung beträgt vier Flaschen à 50 L bei 200 bar und deckt fünf (siehe TERRA_Druckverlust_V3.xlsx/8_N2_Budget/Zeile 24) Tests im 5-kN-Envelope einschließlich der zugehörigen Spülungen ab. Gestell und Flaschen verbleiben während Transport und Test auf dem Zugfahrzeug und werden nicht auf dem Anhänger mitgeführt. Jede Flasche wird über einen eigenen Druckminderer unmittelbar am Flaschenventil auf den Zwischendruck geführt; die gemeinsame Strecke beginnt erst hinter dieser ersten Druckminderstufe im Sammelmanifold auf Zwischendruckniveau. Im Betrieb müssen mindestens zwei Flaschen gleichzeitig geöffnet sein, da der dimensionierende Spitzendurchfluss während der Brenndauer aus einer einzelnen Flasche nicht bereitgestellt werden kann. Ein containerinterner Druckgasvorrat ist nicht vorgesehen.

Herkunft: Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026); Auslegungsentscheidung 29.07.2026: Flaschenbatterie als externes Ground Support Equipment, Betriebsregel mit mindestens zwei gleichzeitig geöffneten Flaschen; TERRA_Druckverlust_V3.xlsx (Blätter 8_N2_Budget und 9_Gasstroemung)

Verifikation: Analyse — Druckgas-Budget und Kampagnenrechnung; Inspektion — R&I

F-243 — Hochdruck-Auslegung [MUSS]

Die Flaschenseite des Druckgassystems muss für 200 bar ausgelegt sein. Der Anschluss erfolgt über DIN 477-1 Nr. 10 (W 24,32 × 1/14"), den Standardanschluss für Stickstoff im 200-bar-Bereich. Die 300-bar-Stufe würde DIN 477-5 Nr. 54 (W 30 × 2) erfordern und ist nicht abwärtskompatibel, sodass Flaschen, Armaturen und Druckminderer an einen abweichenden Beschaffungsweg gebunden wären; der demgegenüber höhere nutzbare Flascheninhalt bei 300 bar rechtfertigt diese Bindung im vorliegenden Bedarfsfall nicht. Die erste Druckminderstufe sitzt unmittelbar an der Flasche und ist über den Endzustand der Flasche auszulegen, mit einem Zielwert von Kv größer oder gleich 0,4; eine Auslegung über die volle Flasche würde den nutzbaren Flascheninhalt verschenken, da der benötigte Kv mit sinkendem Flaschendruck stark ansteigt. Der Hochdruckabschnitt endet damit an der ersten Druckminderstufe. Die containerfeste Installation ist auf den Zwischendruck ausgelegt und von der Flaschendruckstufe entkoppelt, sodass ein späterer Wechsel der Flaschendruckstufe keine Änderung an der Containerinstallation nach sich zieht.

Herkunft: Auslegungsentscheidung 29.07.2026: Flaschendruckstufe 200 bar, erste Druckminderstufe über den Flaschen-Endzustand ausgelegt; DIN 477-1; DGRL 2014/68/EU; TERRA_Druckverlust_V3.xlsx (Blatt 9_Gasstroemung)

Verifikation: Inspektion — Komponentendatenblätter; Analyse — Kv-Nachweis der ersten Druckminderstufe gegen den Spitzendurchfluss im Flaschen-Endzustand

F-244 — Zweistufige Druckreduzierung [MUSS]

Die Druckgasversorgung muss zweistufig druckreduziert werden (Flaschendruck → Zwischendruck → Tankdruck). Der Zwischendruck beträgt 60 bar. Er ist bewusst konservativ gewählt, solange der Droop der ersten Druckminderstufe unter Volllast nicht aus der Reglerkennlinie belegt ist; mit belegtem Droop ist ein Absenken auf 50 bar möglich, was den nutzbaren Flascheninhalt erhöht.

Herkunft: Fluidsystem-Praxis (Ringas et al.); Regelgüte

Verifikation: Analyse — Reglerauslegung

F-245 — Überdruckabsicherung Druckgas [MUSS]

Alle Druckstufen des Druckgassystems (Hochdruck, Zwischendruck, Niederdruck) müssen mit Sicherheitsventilen und/oder Bersteinrichtungen gegen Überdruck abgesichert sein. Abblaspfade müssen in sichere Bereiche geführt werden. Die Absicherung erfolgt je absperbarem Abschnitt und nicht je Komponente. Für jeden Abschnitt ist der auslegende Fehlerfall zu benennen.

Herkunft: DGRL 2014/68/EU; Fluidsystem-Praxis

Verifikation: Analyse — Sicherheitsventil-Auslegung; Inspektion — Ableitungskonzept

F-246 — Trennung der Druckstränge [MUSS]

Die Druckgaszuleitungen zu HTP- und Treibstofftank müssen durch Rückschlagsicherungen (Rückschlagventile, ggf. Pufferbehälter) voneinander getrennt sein, um Medienverschleppung über den gemeinsamen Druckgaspfad auszuschließen.

Herkunft: Sicherheit (hypergole Reaktion); FMEA

Verifikation: Analyse — FMEA; Inspektion — R&I

F-247 — Spül- und Inertisierungsfunktion [MUSS]

Die Druckgasversorgung muss zusätzlich zum Tankaufdruck eine separate Inertgas-Bereitstellung für Spül- und Inertisierungsfunktionen (F-224, F-205) ermöglichen. Spülung und Aufdruck dürfen nicht über denselben Regelpfad laufen.

Herkunft: Betriebskonzept; FMEA

Verifikation: Inspektion — R&I; Analyse — Budgetrechnung

F-248 — entfällt mit V4. Der Inhalt ist in F-622 aufgegangen, nachdem die externe Druckgasversorgung vom optionalen Einspeisepfad zum einzigen Bezugspfad geworden ist.

4.1.2.d Hilfsmedien und Servicebetrieb

F-260 — Frischwasseranschluss (extern) [MUSS]

Das System muss über eine Schnittstelle zur externen Frischwasserversorgung verfügen. Die Schnittstelle muss für kommunalen Wasserdruck (ca. 3–6 bar) ausgelegt sein und den Bedarf für Spülungen sowie die sicherheitstechnische Wasserversorgung decken.

Herkunft: Betriebskonzept; Analogie MoHyPer

Verifikation: Inspektion — Schnittstellenspezifikation; Analyse — Wasserbedarfsrechnung

F-260a — Rückflussverhinderer Trinkwasseranschluss [MUSS]

Der Frischwasseranschluss muss durch einen Rückflussverhinderer der Kategorie 5 nach DIN EN 1717 vom restlichen Fluidsystem getrennt sein, um Rückverkeimung in das öffentliche Trinkwassernetz auszuschließen.

Herkunft: DIN EN 1717; DIN 1988; Anschluss an System mit Gefahrstoffen

Verifikation: Inspektion — Komponentendatenblatt

F-261 — Interne Wasserreserve [SOLL]

Das System soll eine interne Wasserreserve vorhalten, die für Standard-Spülvorgänge ohne externen Anschluss ausreicht. Umfang in AP 3 konkretisiert. Die sicherheitstechnische Wasserversorgung bleibt an den externen Anschluss gekoppelt (F-550).

Herkunft: Autarkiegedanke; Abgrenzung gegen F-262

Verifikation: Analyse — Volumenauslegung

F-262 — Sammelbehälter für verbrauchte Medien [MUSS]

Das System muss verbrauchte Fluide (HTP-Restmedien und HTP-Spülwasser, Treibstoffspülungen und Treibstoffrestmedien, Kondensate) in geeigneten Sammelbehältern auffangen. Zur Einhaltung von F-207 sind hierfür zwei voneinander getrennte Sammelbehälter vorzusehen: ein HTP-Sammelbehälter für sämtliche Abläufe aus dem HTP-Strang (Spülwasser, Drainagen, Druckentlastungen) und ein Treibstoffsammelbehälter für sämtliche Abläufe aus dem Treibstoffstrang (Spül-N₂, Treibstoffdrainagen, Druckentlastungen). Beide Behälter müssen materialverträglich (HTP-Senke: verdünntes HTP und HTP-Zersetzungsprodukte; Treibstoffsenke: Kohlenwasserstoff-Rückstände, Inertgas-Gemische), gegen Überdruck abgesichert und ohne Demontage entleerbar sein. Eine Einleitung in die Umwelt oder das öffentliche Abwassernetz ist ausgeschlossen.

Herkunft: § 3 WHG (Verdünnungsverbot); AbwV; Betriebspraxis mobiler Teststände;

Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (strikte Vent-/Spülpfad-Trennung)

Verifikation: Inspektion — Behälterdaten; Analyse — Volumen- und Materialauslegung

F-263 — Entsorgung verbrauchter Medien [MUSS]

Die Entsorgung der gesammelten Medien muss als fachgerechte Entsorgung über einen Entsorgungsfachbetrieb gemäß AVV erfolgen. Das System muss eine saubere, dichte Entleerung beider Sammelbehälter (F-262) in jeweils geeignete Transportgebinde (IBC, Fass) ermöglichen.

Herkunft: AVV; KrWG

Verifikation: Inspektion — Entleerungs-Schnittstelle; Betriebskonzept

F-264 — Pneumatik Versorgung [MUSS]

Die pneumatische Aktorik-Versorgung muss als eigener Versorgungsstrang ausgeführt sein, getrennt vom Pressurant-Strang. Erzeugung erfolgt durch einen internen Kompressor, der im Technikraum (außerhalb der Tankzone, ATEX-Konsistenz) aufgestellt ist. Ausgangsdruck ca. 6 bar nach Filter/Wasserabscheider und Druckminderung.

Herkunft: F-403 (Fail-Safe — Aktorik darf nicht mit Pressurant-Druckverlust gleichzeitig ausfallen); ATEX-Konsistenz des Zonenkonzepts nach B-111

Verifikation: Inspektion — R&I; Komponentendatenblatt Kompressor

F-265 — Strikte Trennung der Sammel- und Vent-Pfade [MUSS]

Die beiden Sammelbehälter gemäß F-262 (HTP-Senke und Treibstoffs Senke) müssen ohne fluidische Verbindung untereinander betrieben werden. Sämtliche Drainagen, Spülabläufe und Druckentlastungen sind eindeutig je Medienklasse einem der beiden Behälter zuzuordnen. Beide Behälter werden drucklos betrieben; Gas-Inputs werden jeweils über einen eigenen Vent-Pfad der HTP- bzw. Treibstoffs Senke abgeführt. Eine gemeinsame Sammelsenke und ein gemeinsamer Vent-Auslass sind ausgeschlossen (siehe F-207). Die Vent-Behandlung (z. B. Aktivkohle, Wäscher, Mindesthöhe) ist standort- und medienabhängig und in AP 8 zu konkretisieren.

Herkunft: Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (Korrektur der gemeinsamen Senke aus V2); F-207; F-262

Verifikation: Inspektion — Behälter- und Vent-Topologie im R&I; Analyse — Volumen- und Materialauslegung je Medienklasse

F-266 — Wasserpumpe für Spülung [MUSS]

Das Spülsystem muss eine elektrische Wasserpumpe aufweisen, die im Technikraum (außerhalb der Tankzone) zu installieren ist. Der Wassertank darf drucklos ausgeführt werden; die Druckerhöhung auf den Spüldruck erfolgt durch die Pumpe.

Herkunft: Designentscheidung 29.04.2026; ATEX-Konsistenz des Zonenkonzepts nach B-111

Verifikation: Inspektion — R&I; Komponentendatenblatt; Analyse — ATEX-Zonenkonsistenz

4.1.3 Messen und Erfassen**4.1.3.a Primärmessgröße Schub****F-300 — Schubmessung [MUSS]**

Das System muss den vom Triebwerk erzeugten Schub in axialer Richtung kontinuierlich über die gesamte Testdauer messen. Die Schubmessung muss für den gesamten Auslegungs-Envelope (1 kN bis 5 kN) geeignet sein.

Herkunft: Triebwerksqualifikation als Primärzweck des Prüfstands

Verifikation: Analyse — Kraftmessketten-Auslegung; Kalibrierkonzept

F-301 — Schubmessung Messbereichsanpassung [MUSS]

Die Schubmessung muss so ausgelegt sein, dass für Nennpunkt (1 kN) und maximalen Envelope (5 kN) angemessene Messgenauigkeit erreichbar ist. Realisierung über auswechselbare Kraftmessdosen unterschiedlicher Messbereiche. Hierfür ist eine standardisierte mechanische und elektrische Schnittstelle vorzusehen, an der die

Kraftmessdose ohne Eingriff in die tragende Struktur und ohne Demontage anderer Komponenten getauscht werden kann.

Herkunft: Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026) — Envelope-Prinzip auf Messtechnik angewandt; Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (Schnittstellen-Standard und Modularität)

Verifikation: Analyse — Sensor-Konfigurationskonzept; Inspektion — Schnittstellenspezifikation; Genauigkeitsnachweis im Nennpunkt

F-302 — Mechanische Entkopplung Schubmesskette [MUSS]

Die Schubmessvorrichtung muss so in die Prüfstandsstruktur integriert sein, dass die Kraftmessung nicht durch parasitäre Kräfte (Leitungssteifigkeit, thermische Dehnungen, Reibung der Verschieblager) über der zulässigen Messunsicherheit verfälscht wird.

Herkunft: Messtechnik-Praxis

Verifikation: Analyse — Kraftmesskonzept; Flex-Auslegung der Fluidanschlüsse

F-303 — In-situ-Kalibrierbarkeit [MUSS]

Das System muss eine In-situ-Kalibrierung der Schubmessung ohne Demontage ermöglichen (z. B. integrierte Kalibriervorrichtung mit bekannter Referenzkraft).

Herkunft: Messtechnik-Standard (DKD/ISO); Ringas et al.

Verifikation: Inspektion — Kalibrierkonzept im Systemlayout

4.1.3.b Prozessmessgrößen Fluidsystem

F-310 — Druckmessung [MUSS]

Das System muss Drücke an allen prozessrelevanten Stellen elektrisch messen: HTP-Tank, Treibstofftank, Druckgasseite (Zwischendruck und Tankaufdruck), Einspritzseite (Injektor-Eingangsdruck HTP und Treibstoff) sowie Brennkammer, sofern die Triebwerks-Schnittstelle zugänglich ist. Der Flaschendruck wird ausschließlich örtlich am Manometer des Flaschengestells angezeigt und vom Bediener vor Testbeginn bestätigt; er steht der Steuerung nicht als Signal zur Verfügung, da das Flaschengestell externes Ground Support Equipment ohne elektrische Anbindung an den Container ist. Der Zwischendruck ist damit die Größe, über die ein erschöpfter Gasvorrat von einer Leckage im Aufdruckpfad unterschieden werden kann; die Fehlerunterscheidung nach F-556 stützt sich auf ihn.

Herkunft: Aufgabenstellung; Prozessführung; Ringas et al.

Verifikation: Inspektion — R&I, Messstellenliste

F-311 — Temperaturmessung [MUSS]

Das System muss Temperaturen an allen sicherheits- und prozesstechnisch relevanten Stellen messen: HTP-Tank, Treibstofftank, Injektor-Eingänge, Containerinnenraum, kritische Strukturpunkte am Triebwerksträger.

Herkunft: HTP-Handling (Zersetzungsüberwachung); Prozesskontrolle; Brandfrüherkennung

Verifikation: Inspektion — Messstellenliste

F-312 — Massenstrommessung [MUSS]

Das System muss die Massenströme von HTP und Treibstoff zum Triebwerk während des Tests messen. Die Massenstrommessung ist auf den Bereich 1 kN nominal bis 5 kN Envelope auszulegen; eine messtechnisch saubere Erfassung von Durchflussraten weit unterhalb des 1-kN-Nennpunkts (z. B. für Triebwerke der 10-N-Klasse) wird nicht gefordert. Die Messung erfolgt direkt nach dem Coriolis-Prinzip. Gegenüber der indirekten Bestimmung über die Druckdifferenz entfällt damit die Abhängigkeit von Dichte und Kalibrierkurve des Mediums, was bei wechselnden Treibstoffen nach F-220 maßgeblich ist.

Herkunft: Triebwerksqualifikation (Isp, O/F-Rekonstruktion); Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (Range-Optimierung auf 1 kN)

Verifikation: Analyse — Messprinzip-Auswahl; Fehlerrechnung

F-313 — Füllstandsmessung [MUSS]

Das System muss den Füllstand der HTP- und Treibstofftanks überwachen. Redundanz mit der Massenstrom-Integration (Plausibilisierung) ist zulässig und erwünscht.

Herkunft: MoHyPer (Tankgewichte redundant); Sicherheit

Verifikation: Inspektion — Messprinzip im R&I

4.1.3.c Umgebungs- und Statusmessgrößen

F-320 — Gasdetektion im Container **[MUSS]**

Der Containerinnenraum muss kontinuierlich auf kritische Gaskonzentrationen überwacht werden. Mindestens zu detektieren: brennbare Gase/Dämpfe (% UEG), Sauerstoffkonzentration (Über- und Unterschreitungen), optional HTP-Dampf / Zersetzungsprodukte. Sensorauswahl und Alarmschwellen in AP 4.

Herkunft: ATEX; GefStoffV; TRGS; MoHyPer

Verifikation: Inspektion — Sensorkonzept; Analyse — Platzierung im Volumenstrom

F-321 — Brand- und Temperaturüberwachung **[MUSS]**

Containerinnenraum und Triebwerksbereich müssen auf Brand- und Überhitzungsereignisse überwacht werden (Flammen- und Wärmemelder, IR-Detektion).

Herkunft: Brandschutz; VdS-Richtlinien; F-540

Verifikation: Inspektion — Meldekonzep

F-322 — Videoüberwachung **[MUSS]**

Der Testbetrieb muss videobasiert überwacht werden. Mindestens abgedeckt: Triebwerksbereich (Heißgasaustritt, Flammenform), relevante Container-Zonen. Videosignale werden an den Kontrollstand übertragen.

Herkunft: Aufgabenstellung (Schnittstelle Live-Video); Sicherheitspraxis

Verifikation: Inspektion — Kameralayout

4.1.3.d Datenerfassung (DAQ)

F-330 — Abtastraten **[MUSS]**

Die Datenerfassung muss für jede Messgröße eine Abtastrate ermöglichen, die eine aussagekräftige zeitliche Auflösung des Triebwerksbetriebs (Zündung, stationäre Phase, Abschaltung) erlaubt. Konkrete Abtastraten in AP 4.

Herkunft: Triebwerksqualifikation; Transientenanalyse

Verifikation: Analyse — Abtastraten-Auslegung je Messgröße

F-331 — Simultane Mehrkanalerfassung **[MUSS]**

Die Datenerfassung muss die gleichzeitige Erfassung aller primären Messgrößen (Schub, Drücke, Temperaturen, Massenströme) mit hinreichend synchronen Zeitstempeln erlauben, damit korrelative Auswertungen verfälschungsfrei möglich sind.

Herkunft: Triebwerksqualifikation (Isp-, c*-Auswertung)

Verifikation: Analyse — DAQ-Architektur; Skew-Spezifikation

F-332 — Trennung Mess- und Steuersignale **[MUSS]**

Die Signalführung der Messdatenerfassung muss von Steuer- und Sicherheitssignalen galvanisch oder logisch so getrennt sein, dass Störungen in einem Pfad den anderen nicht beeinträchtigen.

Herkunft: EMV-Praxis; Ringas et al.

Verifikation: Inspektion — Schaltungskonzept

F-333 — Signalintegrität **[MUSS]**

Messsignale müssen gegen elektromagnetische Störungen (Zündimpulse, Schaltvorgänge) robust geführt sein (Schirmung, Potentialausgleich, geeignete Signaltypen).

Herkunft: EMV; TRBS 2153

Verifikation: Inspektion — Verkabelungskonzept

4.1.3.e Datenhaltung

F-340 — Lokale Datenspeicherung **[MUSS]**

Alle Messdaten eines Testlaufs müssen lokal am Prüfstand oder am Kontrollstand dauerhaft gespeichert werden. Die Speicherung muss bei Unterbrechung der Datenverbindung zwischen Prüfstand und Kontrollstand erhalten bleiben (Pufferung prüfstandseitig).

Herkunft: Betriebssicherheit; Datenverlust-Risiko

Verifikation: Inspektion — Speicherarchitektur

F-341 — Datenintegrität und Nachvollziehbarkeit **[MUSS]**

Gespeicherte Messdaten müssen mit eindeutigen Metadaten versehen sein: Testlauf-ID, Datum/Uhrzeit, Triebwerkskonfiguration, Treibstoff, Sollwerte, Systemstatus, Operator. Nachträgliche Änderungen an Rohdaten sind auszuschließen (read-only, Hash-Sicherung o. ä.).

Herkunft: Forschungsdatenhandling; Qualifikationsaussage erfordert Nachvollziehbarkeit

Verifikation: Inspektion — Datenmodell; Metadaten-Schema

F-342 — Datenexport **[SOLL]**

Gespeicherte Messdaten sollen in einem nicht-proprietären Datenformat exportierbar sein, das eine weitergehende Auswertung (MATLAB, Python o. ä.) erlaubt.

Herkunft: Nachnutzung durch Forschung

Verifikation: Inspektion — Dateiformate; Schnittstellendokumentation

4.1.4 Steuern und Überwachen

4.1.4.a Steuerungsarchitektur

F-400 — Zentrale Steuerungsarchitektur **[MUSS]**

Das System muss über eine zentrale Steuerungseinheit verfügen, die alle Aktoren (Ventile, Zündung, Pressurant-Freigabe, ggf. Pumpen) koordiniert ansteuert und den Systemzustand konsistent überwacht.

Herkunft: Aufgabenstellung; Ringas et al. (zentrales Control Centre)

Verifikation: Inspektion — Steuerungsarchitektur-Diagramm

F-401 — Deterministisches Verhalten **[MUSS]**

Die Steuerung muss für zeitkritische Sequenzen (Zündung, Abschaltung, Notabschaltung) deterministisches Timing mit definierten Reaktionszeiten garantieren. Konkrete Zeitfenster in AP 4.

Herkunft: Triebwerksbetrieb; Sicherheit

Verifikation: Analyse — Reaktionszeitbudget; ggf. Demonstration

F-402 — Pneumatische Aktorik downstream Tanks **[MUSS]**

Alle Ventile im Treibstoff- und Oxidator-Pfad downstream der Tanks müssen pneumatisch aktuiert sein, um elektrische Zündquellen im Medienpfad auszuschließen.

Die Erzeugung der Pneumatik-Versorgung (Kompressor) ist gemäß F-264 außerhalb der Tankzone (im Technikraum) anzuordnen, um die ATEX-Zündquellenfreiheit der Tankzone zu erhalten.

Herkunft: Ringas et al. (Constraint); ATEX; Sicherheit

Verifikation: Inspektion — Ventilliste; R&I

F-403 — Fail-safe-Verhalten der Aktorik **[MUSS]**

Alle sicherheitsrelevanten Aktoren müssen bei Steuer- oder Energieausfall in einen definierten, sicheren Zustand übergehen. Für HTP- und Treibstoffhauptventile ist "stromlos bzw. druckluftlos geschlossen" Standard; Abweichungen sind zu begründen.

Herkunft: Prozesssicherheit; IEC 61511 Grundlagen; FMEA

Verifikation: Analyse — Fail-safe-Matrix je Akteur

4.1.4.b Ablaufsteuerung und Sequenzen

F-410 — Automatisierte Sequenzen **[MUSS]**

Das System muss die zeitkritischen Betriebsphasen (Pressurisieren, Zünden, stationärer Betrieb, Abschalten, Nachspülen) als automatisierte Sequenzen mit parametrierbaren Zeitfenstern und Sollwerten ausführen.

Herkunft: Aufgabenstellung; Project Atlas (IDACS-Sequenzen)

Verifikation: Inspektion — Sequenzdefinitionen

F-412 — Manuelle Prozeduren für Servicebetrieb **[MUSS]**

Vorbereitende und nachbereitende Prozeduren (Befüllen, Entleeren, Spülen, Sichtprüfung) müssen auch manuell und schrittweise ausführbar sein. Der Operator muss jeden Schritt explizit freigeben.

Herkunft: Betriebssicherheit; HTP-Handlingpraxis

Verifikation: Inspektion — Prozedur-Katalog

F-413 — Parametrierung je Triebwerkskonfiguration **[MUSS]**

Sequenz-Parameter (Sollwerte, Zeitfenster, Rampen) müssen je Triebwerkskonfiguration und Treibstofftyp hinterlegt und vor Testbeginn geladen werden können. Die geladene Parametrierung muss vor Testfreigabe verifizierbar angezeigt werden.

Herkunft: Mehrstofffähigkeit; Triebwerk-als-Prüfling-Konzept

Verifikation: Inspektion — Parameterdatenbank; Freigabedialog

F-414 — Testlauf-Logging **[MUSS]**

Die Steuerung muss alle Sequenzereignisse mit Zeitstempel protokollieren (Sequenzschritt, Akteur-Soll- und Istzustand, Operator-Eingriffe). Diese Ereignisdaten sind Teil der Testdokumentation (F-341).

Herkunft: Nachvollziehbarkeit; Qualitätssicherung

Verifikation: Inspektion — Logging-Konzept

4.1.4.c Bedienung und HMI

F-420 — Grafische Bedienoberfläche **[MUSS]**

Das System muss über eine grafische Bedienoberfläche (HMI) am Kontrollstand verfügen, die den aktuellen Systemzustand übersichtlich darstellt (Fluid-Schema, Ventilstellungen, Messwerte, Sequenz-Fortschritt, Alarmer).

Herkunft: Ringas et al. (Makerplot-GUI als Referenz); Bedienbarkeit

Verifikation: Inspektion — HMI-Konzept; Mockup

F-421 — Bedienhandlungen mit Bestätigung **[MUSS]**

Sicherheitsrelevante Bedienhandlungen (Test starten, Zündung auslösen, Abschaltung) müssen zweistufig ausgeführt sein (z. B. "Arm" + "Execute") und vor Ausführung eine definierte Bestätigung erfordern.

Herkunft: Bedienpraxis; Fehlbedienungsvermeidung

Verifikation: Inspektion — HMI-Flow

F-422 — Rollen- und Rechtssystem **[SOLL]**

Das System soll zwischen Bediener- und Administratorrechten unterscheiden. Sicherheitsrelevante Parameter und Sequenzdefinitionen sollen nur mit erhöhten Rechten änderbar sein.

Herkunft: Bedienpraxis; Konfigurationsschutz

Verifikation: Inspektion — Rechtekonzept

4.1.4.d Fernsteuerung

F-430 — Vollständige Fernbedienbarkeit [MUSS]

Der gesamte Testbetrieb muss vom Kontrollstand aus ferngesteuert durchführbar sein. Während des aktiven Testbetriebs (Pressurisieren, Heißtest, initiale Abkühlphase) muss kein Personal im Container oder im direkten Gefahrenbereich anwesend sein.

Herkunft: Aufgabenstellung; Project Atlas; MoHyPer; Sicherheit

Verifikation: Analyse — Betriebskonzept; Inspektion — Schnittstellen

F-431 — Kommunikationsverbindung Prüfstand ↔ Kontrollstand [MUSS]

Die Kommunikation zwischen Prüfstand und Kontrollstand muss über eine zuverlässige, latenzarme Verbindung erfolgen. Physikalische Ausführung (Kabel, Funk, redundante Pfade) in AP 4/7.

Herkunft: Ringas et al. (Ethernet + analog redundant); Aufgabenstellung

Verifikation: Analyse — Kommunikationsarchitektur

F-432 — Verhalten bei Kommunikationsausfall [MUSS]

Bei Ausfall der Kommunikationsverbindung während des aktiven Testbetriebs muss das System selbsttätig in den Sicherheitszustand Safe übergehen: Verbrennung stoppen, Hauptventile schließen, Tanks entspannen. Der Übergang muss unabhängig von der Steuerungssoftware am Kontrollstand erfolgen.

Herkunft: Fail-safe-Prinzip; Fernsteuerung

Verifikation: Analyse — FMEA-Kommunikationsausfall

4.1.4.e Betriebszustände und Statussignalisierung**F-440 — Definierte Betriebszustände [MUSS]**

Das System muss mit einem endlichen, dokumentierten Satz von Zuständen arbeiten. Vorgesehen sind fünf Betriebszustände (Idle, Access, Pre-Test, Test, Post-Test) und zwei Sicherheitszustände (Hold als weicher Abbruch, Safe als harter Abbruch). Undefinierte Systemzustände sind ausgeschlossen. Übergänge zwischen Zuständen müssen an klar definierte, prüfbare Bedingungen geknüpft sein.

Herkunft: Prozessleittechnik-Standard; Ringas et al.

Verifikation: Inspektion — Zustandsdiagramm

F-441 — Statussignalisierung an der Konsole [MUSS]

Der aktuelle Betriebszustand muss am HMI jederzeit eindeutig erkennbar angezeigt werden. Farbcodierung gemäß DIN EN 60073 (grün = Normal-/Bereitzustand, gelb = Warnung, rot = Alarm/Gefahr).

Herkunft: DIN EN 60073; Bedienpraxis

Verifikation: Inspektion — HMI-Konzept

F-442 — Zustand Access [MUSS]

Der Zustand Access ist der einzige Betriebszustand, in dem sich Personal am aufgebauten Prüfstand aufhalten darf. In ihm sind die Tanks befüllbar, das System ist drucklos, und der Personenzugang ist auf die für die Tätigkeit erforderliche Anzahl begrenzt. Aufdrücken und Zünden müssen in diesem Zustand strukturell gesperrt sein, sodass sie nicht allein durch eine Bedienhandlung ausgelöst werden können.

Herkunft: Betriebskonzept; F-430 und F-500 (Trennung von Handhabung und Testbetrieb)

Verifikation: Analyse — Zustandsdiagramm und Verriegelungs-Matrix; Inspektion — Sperrmechanismus

F-443 — Quittierung nach Sicherheitszuständen [MUSS]

Der Rücksprung aus einem Sicherheitszustand in den Normalbetrieb darf ausschließlich nach manueller Quittierung durch den Operator am Kontrollstand erfolgen. Eine selbsttätige Rückkehr nach Wegfall der auslösenden Bedingung ist ausgeschlossen. Aus dem Zustand

Safe führt der Weg zurück grundsätzlich über Idle einschließlich Entleeren und Spülen; ein unmittelbarer Rücksprung in einen scharfen Zustand ist nicht zulässig.

Herkunft: Fail-safe-Prinzip; Prozesssicherheit; F-440

Verifikation: Analyse — Zustandsübergangsbedingungen; Inspektion — HMI-Flow

4.1.5 Sicherheit und Umweltschutz (Funktionen)

Die folgenden Anforderungen beschreiben, was das System an Sicherheits- und Umweltschutzfunktionen leisten muss. Normkonformitätsanforderungen ("wonach nachgewiesen wird") sind in Sektion 4.2 zusammengefasst.

4.1.5.a Perimeter und Personen

F-500 — Abwesenheit im Gefahrenbereich [MUSS]

Während der Testbereitschafts-, Heißtest- und initialen Abkühlphase darf sich kein Personal im definierten Gefahrenbereich aufhalten. Der Gefahrenbereich ist je Betriebsphase zu definieren und gegen unberechtigten Zutritt zu sichern.

Herkunft: F-430 (Fernsteuerung); Sicherheitspraxis Raketenprüfstände

Verifikation: Analyse — Gefahrenbereichsdefinition; Betriebskonzept

F-501 — Externe Gefahrensignalisierung [MUSS]

Der aktive Testbetrieb muss für umstehende Personen außerhalb des Kontrollstands eindeutig signalisiert werden. Mindestens: rote Warnleuchte und akustisches Signal bei aktivem Test; grüne Signalisierung für "Bereich frei". Farbcodierung gemäß DIN EN 60073.

Herkunft: Bedienfragen Kröger (21.04.2026); DIN EN 60073; Sicherheitspraxis

Verifikation: Inspektion — Signalgeber-Konzept; Platzierung

F-502 — Sichtbare Mindestabstände / Absperrung [MUSS]

Das System muss durch mobile Absperrmaßnahmen so abgegrenzt werden, dass der Mindestabstand zum Triebwerk (axial, radial) für alle Betriebsphasen eingehalten wird. Mindestabstände werden in AP 8 bestimmt und im Betriebskonzept dokumentiert.

Herkunft: Sicherheitspraxis; DGUV; Abgrenzung gegen den Fragmentschutz nach F-542

Verifikation: Analyse — Gefahrenbereichsberechnung; Inspektion — Absperrkonzept

F-503 — Zutrittssicherung mit physischer Freigabe [MUSS]

Der Übergang aus dem Zustand Access in die Zustände Pre-Test und Test muss an eine physische, nicht softwareseitig überbrückbare Freigabe gebunden sein, die nur außerhalb des Gefahrenbereichs erteilt werden kann. Die Freigabe muss so ausgeführt sein, dass sie sich nicht gleichzeitig innerhalb und außerhalb des Gefahrenbereichs befinden kann, und sie muss für jede im Zustand Access anwesende Person einzeln vorliegen. Sensorik und Videoüberwachung nach F-320 und F-322 ergänzen diese Freigabe, ersetzen sie nicht, da eine Person übersehen werden kann, eine fehlende physische Freigabe hingegen nicht.

Herkunft: F-500; Sicherheitspraxis (Lockout-Tagout); Unabhängigkeit von Sensorik

Verifikation: Analyse — Freigabelogik; Inspektion — Verriegelungskonzept

4.1.5.b HTP-Handling

F-510 — HTP-kompatible Materialien nachgewiesen [MUSS]

Alle medienberührenden Materialien im HTP-Pfad müssen durch Literaturnachweis oder Hersteller-Freigabe als HTP-kompatibel dokumentiert sein. Nicht-kompatible Materialien sind konstruktiv ausgeschlossen.

Herkunft: MIL-PRF-16005F; HTP-Handbücher (Ventura et al., FMC)

Verifikation: Inspektion — Werkstoffmatrix mit Quellennachweis

F-511 — Reinigung vor Inbetriebnahme (clean for HTP service) [MUSS]

Vor Erstbefüllung mit HTP und nach jeder Demontage im HTP-Pfad muss eine dokumentierte Reinigungsprozedur durchgeführt werden (Entfettung, Passivierung, Rückspülung, Finalspülung mit VE-Wasser). Reinigungsnachweise sind Bestandteil der Systemdokumentation.

Herkunft: HTP-Handlingpraxis; MIL-PRF-16005F; MoHyPer

Verifikation: Inspektion — Reinigungsprozedur; Nachweisformular

F-512 — Not-Quench / Verdünnungsreserve HTP [MUSS]

Das System muss im Fehlerfall (HTP-Leckage, unkontrollierte Zersetzung, Überhitzung) eine ausreichende Wassermenge zur sofortigen Verdünnung bereithalten bzw. aktiv applizieren können. Zielverdünnung: HTP auf < 10 % Konzentration.

Herkunft: HTP-Sicherheitspraxis

Verifikation: Analyse — Verdünnungsrechnung; Inspektion — Quench-Konzept

F-513 — Notdusche und Augenspülung [MUSS]

Am Einsatzort muss eine Notdusche mit Augenspülung verfügbar sein, die den Anforderungen der DIN EN 15154 entspricht. Wasserversorgung über externen Frischwasseranschluss (F-260) oder dedizierte Reserve.

Die Notdusche ist an der Außenseite der Tankzone zu installieren, frostgeschützt und in unmittelbarer Reichweite der Befüllungs- und Wartungspositionen. Die Wasserversorgung erfolgt über den externen Frischwasseranschluss nach F-260. Die interne Wasserreserve nach F-261 kommt als Rückfallebene nicht in Betracht, da sie für die Spülung des HTP-Medienpfades nach F-205 vorgehalten wird und die von DIN EN 15154 geforderte Durchflussmenge über die geforderte Dauer nicht bereitstellen kann. Die Verfügbarkeit der externen Frischwasserversorgung ist damit Voraussetzung für jede Handhabung von HTP und Bestandteil der Standort-Checkliste nach B-162.

Herkunft: DIN EN 15154; MoHyPer; GefStoffV

Verifikation: Inspektion — Einrichtung und Versorgung

F-514 — Temperaturüberwachung HTP mit Alarmierung [MUSS]

Die HTP-Tanktemperatur muss mit gestuften Alarmschwellen überwacht werden. Voralarmschwelle: Kühlmaßnahmen + Operator-Benachrichtigung. Hauptalarmschwelle: automatische Druckentlastung und Verdünnung.

Herkunft: HTP-Zersetzungsverhalten (exotherm); F-209

Verifikation: Analyse — Alarmschwellen- und Eskalationskonzept

4.1.5.c Treibstoff- und Explosionsschutz

F-520 — Explosionsschutzkonzept [MUSS]

Für Bereiche mit möglicher explosionsfähiger Atmosphäre (Treibstofftankbereich, Leitungsbereiche) muss ein Explosionsschutzkonzept erstellt werden (Zonenklassifikation gemäß ATEX 1999/92/EG). Betriebsmittel in diesen Zonen müssen ATEX 2014/34/EU entsprechen.

Herkunft: ATEX 1999/92/EG und 2014/34/EU; TRBS 2152

Verifikation: Analyse — Explosionsschutzdokument

F-521 — Aktive Containerbelüftung [MUSS]

Die Zonen mit möglicher explosionsfähiger Atmosphäre müssen aktiv belüftet werden, um den Aufbau kritischer Gaskonzentrationen zu verhindern. Die Belüftung ist je Zone getrennt auszuführen, da die Zonen durch gasdichte Trennwände voneinander abgeschlossen sind und eine gemeinsame Belüftung Medien zwischen den Zonen verschleppen würde. Die Belüftungsrate ist je Zone so zu dimensionieren, dass bei definierter Leckage-Rate die UEG-Schwelle nicht überschritten wird. Serienmäßige Zwangsbelüftungsöffnungen der Containerhülle sind in die Auslegung einzubeziehen.

Herkunft: MoHyPer; ATEX; TRGS

Verifikation: Analyse — Belüftungsrechnung je Zone (Luftwechsel, Leckageannahme); Inspektion — Zuordnung der Öffnungen zum Zonenplan

F-522 — Erdung und Potentialausgleich [MUSS]

Der gesamte Prüfstand muss bei Aufbau am Einsatzort mit dem Erdpotential verbunden sein (separate Erdungsspieße oder Fundamentterder). Alle leitfähigen Anlagenteile müssen in den Potentialausgleich eingebunden sein.

Herkunft: DIN VDE 0100-540; TRBS 2153; F-227

Verifikation: Inspektion — Erdungskonzept; Messung Übergangswiderstand

F-523 — Vermeidung elektrischer Zündquellen im Medienpfad [MUSS]

Im Medienpfad downstream der Treibstofftanks dürfen keine elektrischen Komponenten ohne ATEX-Freigabe installiert sein. Sensoren in diesen Bereichen müssen eigensicher ausgeführt oder außerhalb der Medienberührung angeordnet sein.

Herkunft: F-402; ATEX

Verifikation: Inspektion — Komponentenliste mit ATEX-Freigaben

4.1.5.d Druckgerätesicherheit

F-530 — Überdruckabsicherung systemweit [MUSS]

Jeder Druckraum (HTP-Tank, Treibstofftank, Druckgas-Hochdruck/Zwischendruck/Niederdruck, Sammelbehälter je Medienklasse gemäß F-262) muss gegen unzulässigen Überdruck abgesichert sein (Sicherheitsventil, Berstscheibe oder Kombination). Abblaspfade müssen in sichere Bereiche geführt sein.

Herkunft: DGRL 2014/68/EU; F-208, F-226, F-245

Verifikation: Analyse — Ventilauslegung je Druckraum; Inspektion — Abblaskonzept

F-531 — Nachweisführung Druckgeräte [MUSS]

Alle Druckbehälter und Druckgeräte müssen mit Herstellerdokumentation (Konformitätserklärung, Prüfbescheinigung, Werkstoffzeugnis) belegt sein. Eigenentwickelte Druckbehälter müssen durch eine befähigte Stelle geprüft und abgenommen sein.

Herkunft: DGRL 2014/68/EU; BetrSichV; Ringas et al.

Verifikation: Inspektion — Dokumentationsakte

F-532 — Wiederkehrende Prüfungen [MUSS]

Für alle überwachungsbedürftigen Anlagen müssen wiederkehrende Prüfungsintervalle im Betriebskonzept festgelegt und durchführbar sein (Zugänglichkeit, Prüfanschlüsse).

Herkunft: BetrSichV §16, Anhang 2

Verifikation: Inspektion — Prüfkonzept; Konstruktionsreview Zugänglichkeit

4.1.5.e Brand- und Notfallschutz

F-540 — Branddetektion [MUSS]

Branddetektion muss im Triebwerksbereich und im Treibstoffnahen Containerbereich vorhanden sein (siehe F-321). Detektion muss in das Alarm- und Verriegelungssystem integriert sein.

Herkunft: Brandschutz; VdS 2095; F-321

Verifikation: Inspektion — Meldekonzept

F-541 — Aktives Löschsystem [MUSS]

Der Prüfstand muss über ein aktives Löschsystem verfügen, das im Brandfall automatisch ausgelöst wird. Löschmittel und -konzept sind unter Berücksichtigung der Brandlasten (Kohlenwasserstoff-Treibstoffe, HTP-Zersetzungsrisiko) auszuwählen; Wasser als primäres Löschmittel, kompatibel mit HTP-Verdünnung.

Herkunft: Bedienfragen Kröger (21.04.2026); Brandschutz; HTP-Kompatibilität

Verifikation: Analyse — Brandlast- und Löschkonzept; Inspektion

F-542 — Schutzschale gegen Fragmentwurf [MUSS]

Zwischen Triebwerk und sicherheitskritischen Systemkomponenten (Fluidsystem, Elektrik, Steuerung) muss eine passive Schutzschale angeordnet sein, die im Fehlerfall Fragmente zurückhält und die Thermostrahlung des Heißgasstrahls abschirmt. Auslegender Lastfall ist das Bersten der Brennkammer infolge Deflagration; dieser Fall ist als Maximum Credible Event begründet, eine Massendetonation angesammelten Gemischs ist begründet ausgeschlossen. Die Funktion der Schale ist die Verhinderung einer Eskalation, also der Schutz des HTP-Tanks vor einem Versagen am Triebwerk. Ein Containment der Druckwelle wird ausdrücklich nicht gefordert und ist nicht Gegenstand der Auslegung; die Druckwelle kann die Anbindung der Schale an den Rahmen bemessen, nicht die Wandstärke. Der Personenschutz erfolgt nicht über die Schale, sondern über Fernbedienung, Räumung und Mindestabstand nach F-430, F-500 und F-502.

Herkunft: Sicherheitspraxis Prüfstände; Referenzstände Project Atlas und MRETS; eigene Auslegung des Fragmentlastfalls

Verifikation: Analyse — Fragmentlastfall und Wandstärkennachweis; Inspektion — Schattengeometrie gegen Zonenplan

F-543 — Fluchtwege und Evakuierung [MUSS]

Jede betretbare Zone muss im Gefahrenfall unmittelbar ins Freie verlassen werden können. Die Erschließung erfolgt je Zone über eine eigene, nach außen aufschlagende Tür; die Zonentrennwände sind gasdicht und nehmen nach B-113 keine Durchgänge auf. Ein zweiter Ausgang je Zone ist nicht vorgesehen, da sich Personal ausschließlich im Zustand Access und dort nach dem Betriebskonzept mit begrenzter Personenzahl im Container aufhält und die Türen mittig im jeweiligen Quergang liegen, sodass der Weg ins Freie innerhalb der Zone kurz bleibt. Die abschließende Festlegung der erforderlichen Fluchtwegzahl erfolgt im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nach S-110 und des Explosionsschutzdokuments nach F-520. Fluchtwege müssen im Alarmfall beleuchtet und eindeutig markiert sein.

Herkunft: ArbStättV; DGUV; Zonenkonzept nach B-111 und B-113

Verifikation: Inspektion — Layout und Turlage im Zonenplan

F-544 — Persönliche Schutzausrüstung verfügbar [MUSS]

Am Einsatzort muss die für HTP- und Treibstoffhandhabung erforderliche PSA vorgehalten werden (HTP-beständige Schutzkleidung, Gesichtsschutz, Handschuhe, ggf. Atemschutz). Vorhaltung und Zustandsprüfung sind im Betriebskonzept geregelt.

Herkunft: PSA-Verordnung (EU) 2016/425; GefStoffV; HTP-Handlingpraxis

Verifikation: Inspektion — PSA-Konzept

4.1.5.f Freigabebedingung, Verriegelung, Not-Aus**F-550 — Freigabebedingung Frischwasser [MUSS]**

Der Übergang in die Betriebszustände Pre-Test und Test (F-440) darf nur bei nachgewiesener aktiver Frischwasserversorgung zulässig sein (Druckschalter am externen Anschluss F-260). Bei Ausfall während dieser Zustände geht das System in den Sicherheitszustand Safe über. Da die Notdusche nach F-513 und die Verdünnungsreserve nach F-512 ebenfalls an den externen Anschluss gekoppelt sind, ist die Wasserverfügbarkeit auch in den Zuständen Voraussetzung, in denen HTP gehandhabt wird; die Zuordnung zu den einzelnen Zustandsübergängen erfolgt in der Verriegelungs-Matrix nach F-552.

Herkunft: Bedienfragen Kröger (21.04.2026); F-541 setzt Wasser voraus

Verifikation: Analyse — Verriegelungs-Matrix; Inspektion — Verschaltung

F-551 — Freigabebedingung Gasdetektion [MUSS]

Der Übergang in Pre-Test und Test darf nur zulässig sein, wenn die Gasdetektion betriebsbereit ist und alle Messwerte unter der Voralarmschwelle liegen. Überschreitung einer Voralarmschwelle in Pre-Test oder Test: Operator-Warnung. Überschreitung der Hauptalarmschwelle: automatischer Übergang in den Sicherheitszustand Safe.

Herkunft: F-320; ATEX; Sicherheitspraxis

Verifikation: Analyse — Verriegelungs-Matrix

F-552 — Verriegelungs-Matrix (Gesamt) [MUSS]

Eine dokumentierte Verriegelungs-Matrix muss alle Übergänge zwischen Betriebszuständen an prüfbare Bedingungen knüpfen (Druck, Temperatur, Gas, Füllstand, Kommunikation, Personenfreigabe). Jede Verriegelung muss einzeln geprüft und nachgewiesen werden.

Herkunft: IEC 61511 (Grundlagen); Prozesssicherheit

Verifikation: Analyse — Verriegelungs-Matrix; Testprotokolle pro Verriegelung

F-553 — Not-Aus, drahtgebunden [MUSS]

Ein drahtgebundener, handbetätigter Not-Aus-Kreis (hardwired, unabhängig von der Steuerungssoftware) muss das System unmittelbar in den sicheren Zustand überführen: Hauptventile schließen, Druckentlastung einleiten, Zündung entregen. Not-Aus-Stationen müssen sowohl am Kontrollstand als auch an den Zugängen des Prüfstands vorhanden und in Reihe geschaltet sein, sodass auch ein Leitungsbruch zur Auslösung führt. Die Entriegelung einer ausgelösten Station darf ausschließlich vor Ort und von Hand möglich sein; die Rückkehr in den Betrieb erfolgt anschließend über die Quittierung nach F-443. Funktionskategorie gemäß DIN EN ISO 13849-1; PL-Bestimmung in AP 4/8.

Herkunft: DIN EN ISO 13849-1; Sicherheitspraxis; Ringas et al.

Verifikation: Analyse — Funktionskategorie; Inspektion — Hardware-Verschaltung

F-554 — Automatische Abschaltung [MUSS]

Das System muss bei definierten Fehlerbildern automatisch in den Sicherheitszustand Safe übergehen: Brandalarm, Hauptalarm Gas, Hauptalarm HTP-Temperatur, Kommunikationsausfall über Schwellwert, Überdruck außerhalb Soll, Sensorfehler in kritischen Kanälen. Fehlerbilder, die den Prüfstand selbst nicht gefährden, führen nach dem Abbruchkonzept in F-555 stattdessen in den Zustand Hold. Auslöseschwellen und Sensorfehler-Handling in AP 4/8.

Herkunft: Fail-safe-Prinzip; F-432, F-514, F-551

Verifikation: Analyse — FMEA; Verriegelungs-Matrix

F-555 — Zweistufiges Abbruchkonzept [MUSS]

Die Reaktion auf Fehler und Grenzwertverletzungen muss zweistufig ausgeführt sein. Der weiche Abbruch (Hold) beendet die laufende Tätigkeit, hält den Prüfstand jedoch scharf, also die Tanks befüllt und unter Aufdruck. Der harte Abbruch (Safe) entschärft zusätzlich, also drucklos und anschließend entleert. Trennkriterium ist ausschließlich, ob der Prüfstand selbst noch sicher ist, nicht die Schwere des auslösenden Ereignisses. Jedem Fehlerbild ist in der Verriegelungs-Matrix nach F-552 genau eine Stufe zuzuordnen. Eine manuelle Not-Aus-Betätigung nach F-553 führt unabhängig vom Auslösegrund immer zum harten Abbruch, da die vom Bediener wahrgenommene Gefahr dem System nicht bekannt ist.

Herkunft: Prozesssicherheit; Betriebskonzept; Vermeidung unnötigen Medienverlusts bei beherrschbaren Abweichungen

Verifikation: Analyse — Fault-Reaktionsmatrix je Fehlerbild; Inspektion — Zustandsdiagramm

F-556 — Fehlerunterscheidung durch die Steuerung [MUSS]

Die Steuerung muss Fehlerbilder nicht allein anhand einzelner Schwellwerte, sondern zusätzlich anhand von Änderungsraten und der Korrelation mehrerer Messgrößen unterscheiden können. Erforderlich ist dies, weil dasselbe Signalbild verschiedene Ursachen mit unterschiedlicher Sicherheitsrelevanz haben kann: ein absinkender Tankaufdruck kann sowohl auf einen erschöpften Gasvorrat als auch auf eine Leckage hindeuten, und beide Fälle verlangen unterschiedliche Abbruchstufen nach F-555. Die Bewertung muss zusätzlich den aktuellen Betriebszustand einbeziehen, da dasselbe Ereignis je Zustand unterschiedlich zu bewerten ist. Diese Auswertung ist der übergeordneten Steuerungsebene zuzuordnen;

der drahtgebundene Sicherheitskreis nach F-553 bleibt davon unberührt und bewusst einfach.

Herkunft: F-310, F-403, F-552, F-555; Vermeidung von Fehlauflösungen

Verifikation: Analyse — Anforderungen an Abstrakte und Auswertelogik; Inspektion — Steuerungsarchitektur

4.1.5.g Umweltschutz

F-560 — Keine Einleitung in Umwelt oder öffentliches Netz [MUSS]

Verbrauchte Medien (Spülwasser mit Treibstoff- oder HTP-Resten, Kondensate, Löschwasser nach Einsatz) dürfen weder in das öffentliche Abwassernetz noch in die Umwelt eingeleitet werden. Sammlung und Entsorgung gemäß F-262 und F-263.

Herkunft: § 3 WHG (Verdünnungsverbot); AbwV; AVV

Verifikation: Inspektion — Sammelkonzept

F-561 — Rückhaltung bei Leckage [MUSS]

Leckagen flüssiger Medien im Container (HTP, Treibstoff, Spülwasser) müssen durch Auffangmaßnahmen (Auffangwanne, beständige Bodenauskleidung) zurückgehalten werden, sodass keine unkontrollierte Freisetzung in die Umwelt erfolgt.

Herkunft: AwSV; WHG

Verifikation: Analyse — Rückhaltevolumen-Rechnung; Inspektion — Containerauskleidung

F-562 — Abgasemissionen dokumentiert [SOLL]

Die zu erwartenden Abgasemissionen des Triebwerks (Art und Mengen) sollen je Treibstoff grob abgeschätzt und dokumentiert werden. Quantitative Grenzwerte werden nicht vorgegeben; die Dokumentation dient der Bewertung von Einsatzorten und Genehmigungen.

Herkunft: BImSchG (informativ); Dokumentationszweck

Verifikation: Analyse — Emissionsabschätzung

F-563 — Lärmemissionen [SOLL]

Die während eines Heißtests zu erwartenden Schalldruckpegel sollen abgeschätzt und dokumentiert werden. Die Auswahl von Einsatzorten muss die örtlich zulässigen Immissionsrichtwerte berücksichtigen.

Herkunft: BImSchG; TA Lärm

Verifikation: Analyse — Schallpegelabschätzung; Betriebskonzept

4.1.6 Schnittstellen

4.1.6.a Triebwerk ↔ Prüfstand

F-600 — Mechanische Triebwerksschnittstelle [MUSS]

Die mechanische Schnittstelle zum Triebwerk muss so gestaltet sein, dass unterschiedliche Triebwerkskonfigurationen innerhalb des Schub-Envelopes (1 kN bis 5 kN) montiert werden können. Anschlusspattern und Bauraum müssen dokumentiert und für Triebwerksentwickler als Schnittstellen-Kontrollzeichnung (ICD) verfügbar sein.

Herkunft: Aufgabenstellung (Infrastruktur für wechselnde Triebwerke)

Verifikation: Inspektion — Interface Control Document (ICD)

F-601 — Fluidische Triebwerksschnittstellen [MUSS]

Die Fluidanschlüsse zum Triebwerk (HTP-Zufuhr, Treibstoffzufuhr, ggf. Kühlmittel, Pilot-/Spülgas) müssen als definierte Standardanschlüsse ausgeführt sein. Anschlussspezifikation (Typ, Nennweite, Druckstufe, Dichtungsmaterial) ist Teil des ICD.

Herkunft: Multi-Triebwerks-Kompatibilität; Ringas et al.

Verifikation: Inspektion — ICD

F-602 — Signalische Triebwerksschnittstellen [MUSS]

Die Signalschnittstellen zum Triebwerk (Zündsignal, triebwerksseitige Sensoren wie p_c, T_c, ggf. Injektor-Drücke) müssen über definierte Stecker und Signalpegel ausgeführt sein. Mindestens unterstützt: analoge Messgrößen, digitale Zündauslösung.

Herkunft: F-106 (Zündinfrastruktur); F-310/311

Verifikation: Inspektion — ICD; Steckerbelegungsplan

4.1.6.b Prüfstand ↔ Kontrollstand**F-610 — Datenverbindung [MUSS]**

Zwischen Prüfstand und Kontrollstand muss eine Datenverbindung für Mess-, Steuer- und Statusdaten existieren. Physikalische Ausführung (drahtgebunden, redundanz-fähig) in AP 7.

Herkunft: F-430, F-431; Aufgabenstellung

Verifikation: Inspektion — Schnittstellenspezifikation

F-611 — Videoverbindung [MUSS]

Videosignale vom Prüfstand müssen zum Kontrollstand übertragen werden. Übertragung muss so latenzarm sein, dass sicherheitsrelevante Sichtkontrolle in Echtzeit möglich ist.

Herkunft: Aufgabenstellung; F-322

Verifikation: Analyse — Latenzspezifikation; Inspektion

F-612 — Energieversorgung Kontrollstand [MUSS]

Die Energieversorgung zwischen Prüfstand und Kontrollstand muss geklärt sein (getrennt je System, gemeinsame Speisung, Redundanz). Ausführung in AP 5/7.

Herkunft: Aufgabenstellung

Verifikation: Inspektion — Energiekonzept

F-613 — Sicherheitsverbindung (hardwired) [MUSS]

Ergänzend zur Datenverbindung (F-610) muss eine drahtgebundene, softwareunabhängige Sicherheitsverbindung existieren, über die mindestens der Not-Aus (F-553) aus dem Kontrollstand ausgelöst werden kann. Ausführung unabhängig vom Haupt-Datenpfad.

Herkunft: F-553; Ringas et al. (zwei dedizierte Analogleitungen); Aufgabenstellung

Verifikation: Inspektion — Hardware-Verschaltung

4.1.6.c Prüfstand ↔ Standortversorgung**F-620 — Elektrische Energieversorgung [MUSS]**

Das System muss über eine Schnittstelle zur externen elektrischen Energieversorgung verfügen (gängige CEE-Drehstromanschlüsse). Der erforderliche Nennstrom ist gegen eine Leistungsbilanz aller Verbraucher nachzuweisen und im Betriebskonzept als Standortanforderung zu dokumentieren. Alternativ autarker Betrieb mit eigener Energieversorgung (siehe B-140).

Herkunft: Aufgabenstellung (autarker Betrieb vs. GSE)

Verifikation: Inspektion — Elektrokonzert; Analyse — Leistungsbilanz

F-621 — Frischwasserschnittstelle [MUSS]

Externe Frischwasserversorgung über standardisierte Schnittstelle gemäß F-260. Kopplung mit Freigabebedingung gemäß F-550.

Herkunft: F-260, F-550

Verifikation: Inspektion — Schnittstellenspezifikation

F-622 — Druckgasschnittstelle (extern) [MUSS]

Das System muss eine Schnittstelle zur externen Druckgasversorgung bereitstellen, über die die gesamte N₂-Versorgung bezogen wird. Eine containerinterne Flaschenbatterie existiert nicht; die Flaschenbatterie nach F-242 ist externes Ground Support Equipment und

verbleibt auf dem Zugfahrzeug. Mitgeführte Flaschenbatterie und standortseitige Druckgasversorgung sind alternative Quellen, die in dieselbe Schnittstelle S1 nach F-624 münden; ein Parallelbetrieb beider Quellen ist nicht vorgesehen. Wird die Standortversorgung genutzt, gehört die zur Anpassung des standortabhängigen Druckniveaus erforderliche Druckminderstufe zum GSE und nicht zur Containerinstallation. Dieser Anpassstufe ist ein Handabsperrventil vorzuschalten; eine Anordnung hinter der Anpassstufe würde einen zusätzlichen absperzbaren Abschnitt mit anstehender Druckquelle erzeugen.

Herkunft: Designentscheidung 27.04.2026, präzisiert durch die Auslegung des Druckgasstrangs vom 29.07.2026 (Flaschenbatterie als externes GSE, Handabsperrventil vor der Anpassstufe); Gewichtsreduktion gegenüber interner Flaschenbatterie; MoHyPer-Praxis

Verifikation: Inspektion — Schnittstellenspezifikation; R&I

F-623 — entfällt mit V5. Eine Schnittstelle zur externen Druckluftversorgung besteht nicht. Die Druckluft wird nach F-264 containerintern erzeugt; die zuvor vorgesehene externe Bereitstellung ist mit der Auslegung der Technikzone aufgehoben worden.

F-624 — Standort-Schnittstellenblock [MUSS]

Die externen Versorgungsschnittstellen (CEE-Stromanschluss nach F-620, Frischwasseranschluss nach F-621, N₂-Druckgasanschluss nach F-622) sind in einem konsolidierten Schnittstellenblock an der Container-Außenseite zusammenzufassen. Der Block ist so ausgeführt, dass die am Standort verfügbaren Versorgungspfade Strom, Wasser und N₂ zentral und in einer definierten Anschlussfolge angeschlossen werden können. Nicht belegte Anschlüsse müssen im Ruhezustand verschlossen und dicht bleiben. Für die Druckgasschnittstelle S1 gilt zusätzlich: Nennweite DN 12, ausgeführt für den Zwischendruck von 60 bar mit einem Auslegungsdruck von mindestens 68 bar, der sich aus der Erwärmung eingesperreten Gases auf 60 °C ergibt; umzusetzen ist die nächsthöhere handelsübliche Druckstufe. Der Auslegungsdruck folgt aus dem Zwischendruck nach F-244; wird dieser nach Vorliegen der Reglerkennlinie abgesenkt, bleibt die höhere Druckstufe zulässig. Die Zuleitung ist als Umbilical mit einer Länge von maximal 15 m ausgeführt. Der Abschnitt zwischen S1 und dem ersten pneumatischen Ventil muss ein Entlüftungsventil enthalten, damit der in diesem Abschnitt liegende Filter drucklos geöffnet werden kann. Materialwahl, Ausführung und Schutzart sind in AP 5/6 zu konkretisieren.

Herkunft: Designentscheidung Meeting 07.05.2026; Auslegung des Druckgasstrangs vom 29.07.2026 (Umbilical DN 12 mit gemeinsamer Schnittstelle S1, Entlüftungsventil vor dem Filter); Vereinfachung der Aufbauprozedur (B-120); GSE-Strategie B-140/B-141

Verifikation: Inspektion — Anschlussblock-Spezifikation; R&I; Analyse — Aufbauprozedur-Vereinfachung

4.1.6.d Transport-Schnittstellen

F-630 — Mechanische Schnittstelle Container ↔ Anhänger [MUSS]

Der Container muss mit dem Anhänger formschlüssig und lastgerecht verbindbar sein (ISO-Containerecken oder äquivalente Sonderlösung bei Leichtbau-Alternativen). Die Verbindung muss Transportlasten (Beschleunigung, Vibration) und Betriebsreaktionskräfte (Schub, F-104) aufnehmen.

Herkunft: ISO 1496; F-104; Betreuer-Feedback (Leichtbau-Alternativen)

Verifikation: Analyse — Verbindungsauslegung

F-631 — Mechanische Schnittstelle Anhänger ↔ Zugmaschine [MUSS]

Der Anhänger muss mit einer handelsüblichen Zugmaschinen-Kupplung verbindbar sein. Kupplungstyp (Kugelpfropf BE / Maulkupplung C1E o. ä.) hängt von der final gewählten Fahrerlaubnisklasse ab.

Herkunft: Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026); StVZO

Verifikation: Inspektion — Anhängerspezifikation

4.2 Sicherheitstechnische Compliance-Anforderungen

Die folgenden Anforderungen benennen Normen und Richtlinien, deren Einhaltung nachzuweisen ist. Sie korrespondieren zu den funktionalen Safety-Anforderungen in 4.1.5 und ergänzen diese um die formale Nachweispflicht.

4.2.1 Druckgeräte

S-100 — DGRL 2014/68/EU [MUSS]

Alle Druckgeräte und Baugruppen (HTP-Tank, Treibstofftank, Druckgasflaschen, Sammelbehälter je Medienklasse, Druckleitungen) müssen gemäß Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU kategorisiert, ausgelegt und mit Konformitätsnachweisen dokumentiert sein.

Herkunft: Scope: F-208, F-226, F-243, F-262, F-530, F-531

Verifikation: Dokumentation — Kategorisierungsmatrix; CE-Konformitätserklärungen

S-101 — BetrSichV — Überwachungsbedürftige Anlagen [MUSS]

Der Prüfstand muss die Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung für überwachungsbedürftige Anlagen erfüllen. Prüfpflichten vor Inbetriebnahme und wiederkehrend sind zu dokumentieren.

Herkunft: Scope: F-531, F-532, B-123

Verifikation: Inspektion — Prüfkonzept gemäß BetrSichV §14 und §16

S-102 — TPED 2010/35/EU [MUSS]

Transportable Druckgeräte (insbesondere N₂-Flaschenbatterie) müssen der Richtlinie 2010/35/EU entsprechen und die entsprechende π-Kennzeichnung tragen.

Herkunft: Scope: F-242, F-243

Verifikation: Dokumentation — Herstellerzertifikate

4.2.2 Gefahrstoffe und HTP

S-110 — Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) [MUSS]

Der Umgang mit HTP und den Treibstoffen muss den Anforderungen der GefStoffV entsprechen. Eine Gefährdungsbeurteilung nach §6 GefStoffV ist Bestandteil des Betriebskonzepts.

Herkunft: Scope: F-510 ff.; F-520 ff.; B-151

Verifikation: Dokumentation — Gefährdungsbeurteilung; Betriebsanweisungen

S-111 — Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) [MUSS]

Einschlägige TRGS sind einzuhalten, insbesondere TRGS 727 (elektrostatische Entladungen), TRGS 509 und TRGS 510 (Lagerung) sinngemäß für die HTP-Tankhaltung.

Herkunft: Scope: F-227, F-522, B-105

Verifikation: Analyse — TRGS-Compliance-Matrix

S-112 — HTP-Grade-Spezifikation [SOLL]

Das verwendete HTP soll einer dokumentierten Spezifikation entsprechen, bevorzugt MIL-PRF-16005F oder vergleichbar (Reinheit, Stabilisatorgehalt).

Herkunft: Scope: F-200, F-510, F-511

Verifikation: Dokumentation — Liefer- und Analysezertifikat je Charge

4.2.3 Explosionsschutz

S-120 — ATEX 1999/92/EG — Betreiberpflichten [MUSS]

Für Bereiche mit möglicher explosionsfähiger Atmosphäre ist ein Explosionsschutzdokument nach Richtlinie 1999/92/EG zu erstellen, einschließlich Zonenklassifikation.

Herkunft: Scope: F-520, F-521, F-523

Verifikation: Dokumentation — Explosionsschutzdokument

S-121 — ATEX 2014/34/EU — Geräteanforderungen [MUSS]

Alle elektrischen und nicht-electrischen Betriebsmittel in klassifizierten Ex-Zonen müssen gemäß Richtlinie 2014/34/EU zugelassen sein (Gerätekategorie passend zur Zone).

Herkunft: Scope: F-523

Verifikation: Dokumentation — Gerätezertifikate; ATEX-Kennzeichnung

S-122 — TRBS 2152 / 2153 [MUSS]

TRBS 2152 Teil 1–3 (gefährliche explosionsfähige Atmosphäre) und TRBS 2153 (elektrostatische Entladungen) sind einzuhalten.

Herkunft: Scope: F-227, F-521, F-522

Verifikation: Analyse — TRBS-Compliance-Matrix

4.2.4 Elektrotechnik und EMV**S-130 — DIN VDE 0100-540 [MUSS]**

Erdungs- und Potentialausgleichsanlage des Prüfstands ist gemäß DIN VDE 0100-540 auszuführen. Übergangswiderstände sind messtechnisch nachzuweisen.

Herkunft: Scope: F-522

Verifikation: Messung — Erdungsprotokoll

S-131 — DIN EN 60073 [MUSS]

Anzeigeelemente (Warnleuchten, HMI-Statusanzeigen) sind gemäß DIN EN 60073 farblich eindeutig codiert.

Herkunft: Scope: F-441, F-501

Verifikation: Inspektion — HMI- und Signalisierungs-Review

S-132 — EMV-Richtlinie 2014/30/EU [MUSS]

Elektrische und elektronische Komponenten müssen der EMV-Richtlinie 2014/30/EU entsprechen. Das Gesamtsystem muss in seiner Betriebsumgebung betriebssicher sein.

Herkunft: Scope: F-332, F-333

Verifikation: Dokumentation — Konformitätserklärungen; ggf. System-EMV-Analyse

4.2.5 Funktionssicherheit und Steuerung**S-140 — DIN EN ISO 13849-1 [MUSS]**

Sicherheitsbezogene Teile der Steuerung (insbesondere Not-Aus-Kreis, automatische Abschaltung) sind gemäß DIN EN ISO 13849-1 auszulegen. Der erforderliche Performance Level wird über Risikobeurteilung ermittelt (AP 4/8).

Herkunft: Scope: F-553, F-554

Verifikation: Analyse — Risikobeurteilung; PL-Bestimmung; Verifikation

S-141 — IEC 61511 — Leitfaden SIS (informativ) [SOLL]

Die Konzeption des Verriegelungs- und Abschaltsystems soll sich an IEC 61511 orientieren. Eine vollständige SIL-Zertifizierung ist für diese Konzeptarbeit nicht erforderlich.

Herkunft: Scope: F-552, F-553, F-554

Verifikation: Analyse — methodische Übernahme der IEC-61511-Grundstruktur (Safety Lifecycle light)

4.2.6 Brand- und Notfallschutz**S-150 — Brandschutz — anerkannte Regeln der Technik [MUSS]**

Brandschutzmaßnahmen (Detektion, Löschung, Abschottung) sind nach anerkannten Regeln der Technik auszuführen (u. a. VdS 2095; DIN 14461 ff. sofern anwendbar). Finale Normenauswahl in AP 8.

Herkunft: Scope: F-540, F-541

Verifikation: Analyse — Brandschutzkonzept mit Normenverweis

S-151 — DIN EN 15154 [MUSS]

Notduschen- und Augenspül-Einrichtungen müssen den Anforderungen der DIN EN 15154 (Teile 1–5) entsprechen.

Herkunft: Scope: F-513

Verifikation: Dokumentation — Produktdaten der Einrichtung

4.2.7 Umwelt und Wasser

S-160 — WHG / AwSV [MUSS]

Der Umgang mit wassergefährdenden Stoffen muss dem Wasserhaushaltsgesetz und der AwSV entsprechen. Rückhaltemaßnahmen sind gemäß AwSV zu dimensionieren.

Herkunft: Scope: F-560, F-561

Verifikation: Analyse — WGK-Einstufung je Stoff; Rückhaltevolumen-Nachweis

S-161 — Abwasserverordnung (AbwV) [MUSS]

Eine Einleitung anfallender Medien in das öffentliche Abwassernetz ist ausgeschlossen. Verdünnungsverbot gemäß §3 Abs. 3 WHG ist zu beachten.

Herkunft: Scope: F-560

Verifikation: Inspektion — Betriebskonzept

S-162 — AVV / KrWG [MUSS]

Entsorgung anfallender Abfälle (verbrauchte Medien, Filter, Kontaminationen) muss gemäß Abfallverzeichnis-Verordnung und Kreislaufwirtschaftsgesetz über zertifizierte Entsorgungsfachbetriebe erfolgen.

Herkunft: Scope: F-263

Verifikation: Dokumentation — Entsorgungskonzept; Nachweise nach Einsatz

S-163 — BImSchG / TA Lärm [SOLL]

Schall- und ggf. Luftemissionen sollen unter Berücksichtigung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und der TA-Lärm bewertet werden. Die konkrete Genehmigungssituation ist standortabhängig.

Herkunft: Scope: F-562, F-563, B-162

Verifikation: Analyse — Immissionsabschätzung; Standort-Checkliste

4.2.8 Transport und Container

S-170 — ADR — Gefahrguttransport Straße [MUSS]

Der Transport von Druckgasflaschen und ggf. Gebinden mit VE-Wasser muss gemäß ADR erfolgen. HTP und Treibstoffe werden grundsätzlich nicht im befüllten Zustand transportiert (B-105).

Herkunft: Scope: B-101, B-105

Verifikation: Dokumentation — Transport-Checkliste; Beförderungspapiere

S-171 — ISO 668 / ISO 1496 — Container [MUSS]

Bei Ausführung als Standard-Seecontainer sind ISO 668 (Abmessungen) und ISO 1496 (Festigkeit) einzuhalten. Bei Leichtbau- oder Sonderausführung sind äquivalente mechanische Nachweise zu erbringen.

Herkunft: Scope: B-100, F-630

Verifikation: Dokumentation — Container-Zertifikat oder äquivalenter Nachweis

S-172 — StVZO [MUSS]

Die Kombination Plattform + Anhänger muss in Deutschland straßenverkehrszulassungsfähig sein. Erforderliche Zulassungs- und Kennzeichnungsnachweise sind zu führen.

Herkunft: Scope: B-101, B-102, B-104, F-631

Verifikation: Dokumentation — Zulassung; ggf. Einzelabnahme

S-173 — EN 12195 — Ladungssicherung [MUSS]

Die Transportsicherung der Innenkomponenten muss gemäß EN 12195 ausgelegt sein.

Herkunft: Scope: B-106

Verifikation: Analyse — Ladungssicherungs-Nachweis

4.2.9 Arbeitsschutz und Personal

S-180 — Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) [MUSS]

Arbeitsbereiche (Containerinnenraum bei Servicearbeiten, Kontrollstand) müssen der ArbStättV entsprechen (Fluchtwege, Beleuchtung, Mindestabmessungen).

Herkunft: Scope: F-543, B-110

Verifikation: Inspektion — Layout-Review

S-181 — PSA-Verordnung (EU) 2016/425 [MUSS]

Bereitgestellte PSA muss der PSA-Verordnung entsprechen (CE-Kennzeichnung, geeignete Kategorie, HTP- und Treibstoffbeständigkeit).

Herkunft: Scope: F-544

Verifikation: Dokumentation — PSA-Produktdaten

S-182 — DGUV Regeln und Informationen [MUSS]

Einschlägige DGUV-Regelwerke sind einzuhalten (druckführende Anlagen, Gefahrstoffe, elektrische Anlagen, PSA). Konkrete DGUV-Schriften in AP 8.

Herkunft: Scope: B-151, F-544

Verifikation: Analyse — DGUV-Compliance-Matrix

4.3 Betriebliche Anforderungen

Betriebliche Anforderungen beschreiben Bedingungen für Transport, Aufbau, Betrieb und Personal. Sie sind teils qualitativer Natur; Feinwerte werden in den zugehörigen Arbeitspaketen ergänzt.

Grundsatz für die Auslegung: Primäres Ziel ist ein funktionaler mobiler Prüfstand. Nebenziele (z. B. minimale Fahrerlaubnisklasse) sind Designtreiber, keine harten Grenzen (vgl. Betreuer-Feedback Kranich, 21.04.2026).

4.3.1 Mobilität und Transport

B-100 — Integration in 20-ft-Plattform [MUSS]

Das Gesamtsystem muss in einer Plattform mit den Außenabmessungen eines Standard-20-ft-Containers (6,058 m × 2,438 m × 2,591 m, ISO 668) oder vergleichbaren Leichtbau-Alternativen mit gleichwertiger Schnittstelle zu Anhänger und Kran integriert werden.

Herkunft: Aufgabenstellung; Betreuer-Feedback (Leichtbau-Alternativen zulässig)

Verifikation: Inspektion — Layout

B-101 — Transport auf Anhänger [MUSS]

Das Gesamtsystem (Plattform + Inhalt ohne Betriebsmedien) muss auf einem handelsüblichen Straßenanhänger transportierbar sein. Die Kombination Anhänger + Plattform muss in Deutschland zulassungsfähig sein (StVZO).

Herkunft: Aufgabenstellung; StVZO

Verifikation: Inspektion — Anhängerkombination; Zulassungskonzept

B-102 — Fahrerlaubnisklasse BE als Designziel [SOLL]

Die Kombination Anhänger + Plattform (ohne Betriebsmedien) soll ein zulässiges Gesamtgewicht von 3.500 kg nicht überschreiten. Dies ist die anhängerseitige Bedingung der Fahrerlaubnisklasse BE; die fahrzeugseitige Bedingung an Anhängelast und zulässige Gesamtzugmasse ist in B-160 erfasst. Das Ziel ist eingehalten, der Nachweis erfolgt über das Gewichtsbudget. Die Bewertung der nächsthöheren Klasse C1E entfällt damit.

Herkunft: Exposé; Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026) — Designtreiber, nicht harte Grenze

Verifikation: Analyse — Gewichtsbudget; Trade-Off BE vs. C1E

B-103 — Container-Alternativen bewerten [MUSS]

Alternativen zum Standard-20-ft-Stahlcontainer (Leichtbau-Container, Wohncontainer, Sonderbau) sind im Rahmen der Konzeption zu recherchieren und zu bewerten. Kriterium: Zugewinn an Nutzlast für den Innenausbau bei gleicher äußerer Nutzung.

Die Bewertung ist abgeschlossen. Verglichen wurden neun Bauweisen vom Standard-Seecontainer über Sandwich-Shelter bis zum Sonderbau nach eigenem Lastenheft. Maßgebend ist nicht der Werkstoff, sondern die Tragfähigkeitsspezifikation: das Leergewicht folgt der ausgelegten Nutzlast. Gewählt ist ein Lagercontainer in 20-ft-Baulänge mit 1.270 kg Leergewicht als einziges recherchiertes Serienprodukt mit ISO-Außenmaßen, ISO-Eckbeschlägen, Typenzertifikat und einem Leergewicht innerhalb des Hüllenbudgets. Die verworfenen Alternativen sind mit Begründung dokumentiert.

Herkunft: Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026)

Verifikation: Analyse — Alternativenvergleich Container-Bauweisen, erledigt

B-104 — Anhängerspezifikation bei > 3,5 t (bedingt) [MUSS]

Falls das Gewichtsbudget BE nicht eingehalten werden kann, sind die resultierenden Zusatzanforderungen an den Anhänger explizit zu dokumentieren und in die Auslegung einzuplanen (z. B. Maulkupplung, Druckluft- oder Hydraulikbremsen, zGG-Zulassung, Auflaufbremse, Achskonfiguration). Der Bedingungsfall ist nicht eingetreten; das Gewichtsbudget hält die Grenze nach B-102 ein. Die Anforderung bleibt als dokumentierte Rückfallebene bestehen.

Herkunft: Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026)

Verifikation: Analyse — Anhänger-Spezifikationsliste

B-105 — Transport ohne Betriebsmedien [MUSS]

HTP und Treibstoffe werden grundsätzlich nicht im befüllten Zustand transportiert. Vor jedem Transport müssen HTP- und Treibstoffpfad vollständig entleert und gemäß F-205 bzw. F-224 gespült sein. Druckgas (N₂-Flaschen) wird gemäß ADR transportiert.

Herkunft: F-201; F-223; ADR

Verifikation: Inspektion — Transport-Checkliste im Betriebskonzept

B-106 — Transport-Sicherung der Innenkomponenten [MUSS]

Alle Innenkomponenten (Tanks, Leitungen, Sensorik, Aktorik, Elektrik) müssen transportsicher befestigt sein, sodass die zu erwartenden Transport-Belastungen keine Schäden oder Setzungen verursachen. Lastannahmen gemäß EN 12195.

Herkunft: Transportpraxis; MoHyPer

Verifikation: Analyse — Transport-Lastannahmen; Inspektion — Befestigungskonzept

4.3.2 Container und Plattform

B-110 — Zugänglichkeit im Betrieb [MUSS]

Alle Komponenten, die regelmäßig bedient, geprüft oder gewartet werden müssen, sind im aufgestellten Zustand zugänglich. Schnittstellen (F-260, F-620 ff.) müssen von außen erreichbar sein, ohne den Container betreten zu müssen.

Herkunft: Bedien- und Wartungspraxis

Verifikation: Inspektion — Layout-Review

B-111 — Innenraumaufteilung [MUSS]

Der Plattform-Innenraum ist funktional in Zonen zu gliedern (z. B. Tank-/Medienzone, Technikzone, Triebwerkszone). Die Zoneneinteilung muss die Anforderungen aus 4.1.5 (Blast Shield, Ex-Schutz, Rückhaltung) berücksichtigen.

Herkunft: F-542, F-520, F-561; MoHyPer (Tankraum + Technikraum)

Verifikation: Inspektion — Zonenplan

B-112 — Rangierbarkeit am Einsatzort [SOLL]

Die Plattform soll am Einsatzort ohne Kran oder Gabelstapler im beladenen Zustand rangierbar sein. Umgesetzt über feste Containerräder mit Bremse und Twistlock-Anbindung, die nach dem Absetzen mit den Hubstützen an den vier unteren Eckbeschlägen angesetzt werden. Die Rangierbarkeit gilt für harte, ebene Böden. Rangier- und Testkonfiguration sind einander ausschließende Zustände: die Rollen sind vor dem Test zu entfernen, da der Container für den Testbetrieb nach B-134 reibschlüssig auf dem Untergrund stehen muss.

Herkunft: Aufgabenstellung (autarke Rangierbarkeit)

Verifikation: Analyse — Rangierkonzept; Inspektion — Aufbauprozedur

B-113 — Öffnungen in der Containerhülle [MUSS]

Anzahl und Lage der Öffnungen in der Containerhülle sind auf das nach Herstellerangabe statisch zulässige Maß zu begrenzen. Die Verwendung eines Serienprodukts stützt sich auf dessen Typenzertifikat; zusätzliche Wandausschnitte heben diese Grundlage auf. Jede Öffnung ist gegen ihren Nutzen abzuwägen. Jede betretbare Zone ist über eine eigene Öffnung von außen zu erschließen, da die Zonentrennwände gasdicht auszuführen sind und keine Durchgänge aufnehmen.

Herkunft: Herstellerangabe zur zulässigen Zahl der Einbauten; Zonenkonzept nach B-111; F-520, F-543

Verifikation: Inspektion — Öffnungsplan gegen Herstellerangabe; Analyse — Zonenerschließung

4.3.3 Aufbau, Abbau und Inbetriebnahme**B-120 — Definierte Aufbauzeit [SOLL]**

Der Prüfstand soll so ausgelegt sein, dass der Aufbau am Einsatzort (ab Anlieferung bis Testbereitschaft) innerhalb von zwei Arbeitstagen abschließbar ist. Diese Zielzeit ist als weiches Ziel zu verstehen; sie dient als Auslegungs-Richtwert für die Aufbauprozedur und ist anhand der konkreten Prozedur in AP 5/6 zu validieren. Rahmenbedingungen: ausreichend befestigter Untergrund (B-133), Zugang zu Medien gemäß Standort-Schnittstellenblock (F-624). Personalstamm und Schichtmodell sind nicht Teil dieser Anforderung.

Herkunft: Praktikabilität mobiler Einsatz; Designentscheidung Meeting 07.05.2026 (2-Tage-Ziel im Kontext zweiwöchiger Testkampagnen)

Verifikation: Analyse — Aufbaukonzept mit Zeitabschätzung; Validierung in AP 5/6

B-121 — Definierter Abbau und Abreise [SOLL]

Der Abbau nach Abschluss einer Testkampagne soll in einem zur Aufbauzeit (B-120) vergleichbaren Zeitrahmen abschließbar sein, einschließlich Entleerung, Spülung und Sicherung aller Fluidpfade (F-205, F-224, B-105). Wie B-120 ist dies ein weiches Ziel.

Herkunft: B-120; Transportregime

Verifikation: Analyse — Abbaukonzept

B-122 — Dokumentierte Aufbau- und Inbetriebnahmeprozedur [MUSS]

Aufbau, Inbetriebnahme (einschließlich Funktions- und Dichtheitsprüfung), Testbetrieb und Abbau müssen als dokumentierte Prozeduren vorliegen. Die Prozeduren sind Bestandteil des Betriebskonzepts.

Herkunft: BetrSichV; Qualitätssicherung

Verifikation: Inspektion — Betriebskonzept

B-123 — Funktions- und Dichtheitsprüfung vor Testfreigabe [MUSS]

Vor der ersten Testfreigabe nach einem Aufbau muss eine dokumentierte Funktions- und Dichtheitsprüfung aller Fluid- und Druckpfade durchgeführt werden (z. B. Druckproben mit Inertgas, Funktionsprüfung Aktorik, Kalibrier-Check der Messkette). Ergebnis ist Freigabebedingung-Voraussetzung.

Herkunft: DGRL; BetrSichV; F-550 ff.

Verifikation: Inspektion — Prüfprotokollvorlage

4.3.4 Betriebsumgebung**B-130 — Einsatz-Umgebungstemperatur [MUSS]**

Der Prüfstand muss in einem Umgebungstemperaturbereich von 0 °C bis +35 °C betriebsfähig sein. Außerhalb dieses Bereichs ist der Betrieb nur mit zusätzlichen Maßnahmen (aktive Klimatisierung, Heizung, Sonderprozedur) zulässig; diese werden in AP 6 konkretisiert.

Herkunft: Mitteleuropäische Einsatzbedingungen; HTP-Temperaturgrenze (F-209)

Verifikation: Analyse — Klima- und Heizlastrechnung

B-131 — Klimatisierung Innenraum [MUSS]

Der Plattform-Innenraum muss in den sicherheitskritischen Zonen (insbesondere HTP-Tankbereich) aktiv klimatisiert werden, sodass die HTP-Temperaturgrenze gemäß F-209 unter allen zulässigen Umgebungsbedingungen eingehalten wird.

Herkunft: F-209; MoHyPer (temperaturkontrollierte Tankzone)

Verifikation: Analyse — Klimarechnung; Inspektion — Klimakonzept

B-132 — Witterungsbeständigkeit und Wetterfenster [MUSS]

Der Prüfstand muss im Außenbetrieb gegen Niederschlag, Wind und UV-Strahlung beständig sein. Der Heißtest-Betrieb ist zulässig innerhalb definierter Wind- und Witterungsfenster (z. B. maximale Windgeschwindigkeit, Ausschluss bei Starkregen/Gewitter). Grenzen in AP 5.

Herkunft: Einsatzpraxis Raketenprüfstände; Sicherheit

Verifikation: Analyse — Betriebsgrenzen; Inspektion — Witterungsausrüstung

B-133 — Untergrundanforderungen [MUSS]

Der Aufstellort muss einen Untergrund bereitstellen, der die statische Last des Prüfstands und die dynamischen Reaktionskräfte aus Heißtests (F-104) ohne unzulässige Setzung aufnimmt. Anforderungen an Bodenpressung, Ebenheit und Mindestabstände sind im Betriebskonzept zu dokumentieren.

Herkunft: F-104; Sicherheitspraxis

Verifikation: Analyse — Bodenpressungsrechnung

B-134 — Container-Verankerung gegen Schubreaktion [MUSS]

Der abgesetzte Container muss gegen die Reaktionskräfte des Heißtests (siehe F-104) reibschlüssig gesichert sein. Der Sicherheitsbeiwert γ ist auf $\gamma \geq 2,0$ anzusetzen. Im Nennfall (1 kN, trockener Untergrund mit $\mu \geq 0,3$) trägt das Eigengewicht des Containers die Schubreaktion mit ausreichender Sicherheit. Im Envelope-Fall (5 kN) wird γ ohne zusätzliche Maßnahmen nicht erreicht; erforderlich sind Antirutschmatten unter den vier Eckbeschlägen, die den wirksamen Reibbeiwert anheben. Auf nachgiebigem Untergrund sind zusätzlich Lastverteilplatten einzusetzen; in diesem Fall liegt die maßgebende Gleitfläche zwischen Platte und Untergrund, der wirksame Reibbeiwert ist dann standortabhängig und nach B-162 vor dem Betrieb zu prüfen. Erdanker sind nicht vorgesehen: auf befestigtem Untergrund sind sie nicht setzbar, auf nachgiebigem Untergrund wegen der ausreichenden Reibung nicht erforderlich.

Herkunft: Designentscheidung 27.04.2026, fortgeschrieben 25.08.2026; F-104; EN 12195-1

Verifikation: Analyse — Standsicherheits- und Reibungsnachweis; Inspektion — Standort-Checkliste

B-135 — Absetz-Konzept Container [MUSS]

Vor dem Heißtest muss der Container vom Anhänger abgehängt und auf den Untergrund abgesetzt werden, sodass die Schubreaktion definiert in den Boden eingeleitet wird. Das Absetzen erfolgt mittels manuell bedienter Hubstützen an den vier Containerecken. Die Stützen müssen den Container aus eigener Kraft anheben und absenken können, da der Anhänger blattgefedert ist und keine absenkable Ladefläche bietet; der erforderliche Hub folgt aus der Ladeflächenhöhe des Anhängers. Die Stützen sind so auszuführen, dass sie sich in Lasteinheiten von höchstens 25 kg zerlegen lassen und damit von einer Person nach LasthandhabV gehandhabt werden können. Nach dem Absetzen steht der Container auf dem Untergrund; die Stützen werden entfernt und im Zugfahrzeug mitgeführt.

Herkunft: Designentscheidung 27.04.2026; B-101; Trade-Off Hydraulik vs. manuelle Pfosten

Verifikation: Inspektion — Hubsystem-Spezifikation; Analyse — Aufbauprozedur und Bedienkräfte

4.3.5 Energie und Autarkie**B-140 — Autarker Betrieb [MUSS]**

Das System muss auch ohne externe Ground-Support-Infrastruktur betreibbar sein. Im autarken Betrieb muss es mit eigener Energieversorgung (Generator oder Akku), eigener Wasserreserve (F-261) und mitgeführtem Druckgas aus der Flaschenbatterie nach F-242 arbeiten können, für eine definierte Kampagnendauer (Feinwert AP 5).

Das System muss in Verbindung mit einem definierten GSE-Set (mobiles Stromaggregat, N₂-Druckgasflaschen-Batterie, interne Wasserreserve nach F-261) ohne ortsfeste Infrastruktur betreibbar sein. „Autarker Betrieb“ bezeichnet den Betrieb ohne Anschluss an stationäre Versorgungsnetze; das GSE-Set ist Teil der mobilen Infrastruktur und wird mitgeführt. Die Kampagnendauer im autarken Betrieb (Feinwert AP 5) bezieht sich auf diesen Modus. Wasser für die Sicherheits- und Brandschutzfunktionen nach F-512, F-513 und F-541 wird nicht mitgeführt, sondern am Einsatzort bereitgestellt; es ist wie die Betriebsmedien ein extern bereitgestelltes Verbrauchsmittel

Herkunft: Aufgabenstellung; Designentscheidung 27.04.2026 (kein interner Generator, keine interne N₂-Flaschenbatterie als Primärquelle)

Verifikation: Analyse — Autarkie-Betriebsszenario; Leistungs- und Ressourcenbilanz

B-141 — Betrieb mit Standortversorgung [MUSS]

Das System muss alternativ mit externer Infrastruktur betrieben werden können (externe Stromversorgung F-620, Wasser F-621, Druckgas F-622). Im GSE-gestützten Betrieb dürfen interne Ressourcen entsprechend reduziert gefahren werden. Die Druckluftversorgung ist nach F-264 in jedem Betriebsmodus containerintern und damit nicht Teil der GSE-Schnittstelle.

Herkunft: Aufgabenstellung

Verifikation: Analyse — GSE-Betriebsszenario

B-142 — Vergleich autark vs. GSE [MUSS]

Beide Betriebsvarianten sind in Nutzwertanalyse-Form zu vergleichen (Aufbauzeit, Personalbedarf, Medienreichweite, Kosten-Komplexitäts-Tradeoff). Ergebnis fließt als Empfehlung in die Thesis ein.

Herkunft: Aufgabenstellung

Verifikation: Analyse — Nutzwertanalyse

4.3.6 Personal und Qualifikation**B-150 — Personalstamm pro Testbetrieb [SOLL]**

Ein aktiver Testbetrieb soll mit einem definierten Mindest-Personalstamm durchführbar sein (Richtgröße 2–3 Personen: Operator Kontrollstand, Safety-/Ansprechverantwortlicher, Support Prüfstand außerhalb Gefahrenbereichs). Rollenaufteilung in AP 5.

Herkunft: Betriebspraxis Hochschulumfeld; Ringas et al.

Verifikation: Analyse — Rollen- und Aufgabenverteilung

B-151 — Qualifikationsanforderungen [MUSS]

Für den Umgang mit dem Prüfstand müssen Mindestqualifikationen festgelegt werden (Einweisung nach BetrSichV/GefStoffV, HTP-spezifische Schulung, Sachkunde nach DGUV für druckführende Systeme, ggf. Sachkunde ATEX). Nachweispflicht ist Teil des Betriebskonzepts.

Herkunft: BetrSichV; GefStoffV; DGUV

Verifikation: Inspektion — Qualifikationskatalog

B-152 — Einsatz durch Studierende [SOLL]

Das System soll so gestaltet sein, dass es nach angemessener Einweisung durch Studierende (Master-Niveau) unter Aufsicht des qualifizierten Personals bedient werden kann. Bedienkomplexität und Fehlertoleranz sind entsprechend auszulegen.

Herkunft: Hochschulumfeld; Ringas et al.

Verifikation: Analyse — Bedienkonzept; User-Error-Analyse

4.3.7 Einsatzvarianten und Zugmaschine

B-160 — Optionen Zugmaschine [MUSS]

Im Rahmen der Konzeption sind Optionen für die Zugmaschine zu bewerten, insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Integration eines Kontrollstands im Zugfahrzeug (AP 7). Die Bewertung umfasst zulässiges Gesamtgewicht, Nutzlast, zulässige Anhängelast, zulässige Gesamtzugmasse, Stützlast, Kupplungstyp und die Eignung des Innenraums für eine Kontrollstand-Integration. Bindende Größe für die Fahrerlaubnisklasse nach B-102 ist die zulässige Gesamtzugmasse, nicht die Anhängelast allein.

Herkunft: Betreuer-Feedback Kranich (21.04.2026)

Verifikation: Analyse — Fahrzeugoptions-Bewertung

B-161 — Kontrollstand-Variante [MUSS]

Der Kontrollstand ist in zwei Varianten zu konzipieren und zu bewerten: separater Kontrollstand (zusätzlicher kleiner Container oder mobile Einheit) und integriert in das Zugfahrzeug. Ergebnis als Empfehlung in der Thesis.

Herkunft: Aufgabenstellung (Kap. 7); Betreuer-Feedback

Verifikation: Analyse — Nutzwertanalyse Kontrollstand-Varianten

B-162 — Verfügbarkeit an wechselnden Standorten [MUSS]

Das System muss an wechselnden Standorten aufgebaut und betrieben werden können. Standort-Anforderungen (Untergrund, Medien, Abstände, behördliche Freigaben) sind in einer Standort-Checkliste zu dokumentieren, die vor Einsatz abgearbeitet wird.

Herkunft: Aufgabenstellung (Mobilität); Exposé

Verifikation: Inspektion — Standort-Checkliste im Betriebskonzept

A.16 Standort-Checkliste nach B-162

Standort-Checkliste nach B-162

TERRA Concept — Konzeptioneller Entwurf eines mobilen Prüfstands für Raketentriebwerke bis 5 kN Schub

Die Checkliste ist vor jedem Einsatz abzuarbeiten. Sie prüft, ob der vorgesehene Aufstellort den Betrieb des Prüfstands zulässt, und legt zugleich fest, welche Ausrüstung für die Kampagne mitzuführen ist. Die vorliegende Fassung entspricht der Konzeptebene der Arbeit. Vor dem ersten Einsatz ist sie gegen den konkreten Standort zu detaillieren und um die zugehörigen Prozeduren zu ergänzen. Standortabhängige Größen sind hier als Randbedingung geführt und nicht festgelegt.

Drei Punkte sind mit K.-o. gekennzeichnet. Fehlt eine dieser Zusagen, findet die Kampagne nicht statt. Die Spalte Erfüllt nimmt den Vermerk ja, nein oder n. z. auf. Jede Zeile mit dem Vermerk nein ist in der Spalte Befund zu begründen. Die Auswertung am Ende bestimmt die Betriebsart und daraus die Beladung der Fahrzeuge.

Standort		Kampagne	
Datum der Prüfung		Geplanter Testzeitraum	
Bearbeiter		Sicherheitsverantwortlicher	

Nr.	Prüfpunkt	Kriterium und Sollwert	Anforderung	Erfüllt	Befund und Bemerkung
1 Untergrund und Tragfähigkeit (F-104, B-133, B-134, Abschnitt 9.3)					
1.1	Untergrundart	Art und Zustand dokumentiert. Beton, Asphalt, Schotter oder verdichteter Boden. Ebenheit im Bereich der vier Eckbeschläge	B-133	ja / nein / n. z.	
1.2	Tragfähigkeit	Flächenpressung von rund 210 kPa über die vier Eckbeschläge ohne unzulässige Setzung aufnehmbar	B-133	ja / nein / n. z.	
1.3	Antirutschmatten	Unter allen vier Eckbeschlägen vorgesehen. Rechenwert des Reibbeiwerts 0,6 nach VDI 2700 Blatt 14 und 15	B-134	ja / nein / n. z.	
1.4	Lastverteilplatten	Bedarf geprüft. Bei Einsatz liegt die maßgebende Gleitfläche zwischen Platte und Untergrund. Der wirksame Reibbeiwert ist dann am Aufstellort zu prüfen	B-134	ja / nein / n. z.	
2 Stellfläche und Zufahrt (B-100, B-135, S-172, Abschnitt 9.3)					
2.1	Zufahrt für das Gespann	Fahrweg für eine Breite von 2.438 mm zuzüglich Rangiermaß befahrbar. Tragfähigkeit für eine Anhängerlast von 3.500 kg gegeben	B-101	ja / nein / n. z.	
2.2	Stellfläche Container	Grundfläche 6.058 × 2.438 mm zuzüglich Arbeitsraum. Bereich vor der Hecköffnung für den Abgasstrahl frei	B-100	ja / nein / n. z.	
2.3	Stellfläche Zugfahrzeug	Innerhalb des vom Umbilical zugelassenen Radius von 15 m. Das Flaschengestell verbleibt auf dem Fahrzeug	F-624	ja / nein / n. z.	
2.4	Stellfläche zweites Fahrzeug	Abstellmöglichkeit für das zweite Fahrzeug und den Kontrollstand außerhalb des Gefahrenbereichs	Abschnitt 9.2	ja / nein / n. z.	
2.5	Handhabungsmittel	Kran mit einer Hebenutzlast ab 6.500 kg und einem Seilwinkel ab 60° oder Stapler mit einer Gabellänge ab 2 m. Für den Einsatz von Rollen harter und ebener Boden	B-135	ja / nein / n. z.	

Nr.	Prüfpunkt	Kriterium und Sollwert	Anforderung	Erfüllt	Befund und Bemerkung
3 Versorgung (B-140, B-141, Abschnitte 8.1 und 8.2)					
3.1	Elektrische Energie	CEE-Anschluss 400 V bei 16 A mit rund 11 kW gegen einen Bedarf von 6,8 bis 7,7 kW. Andernfalls Stromaggregat 10 kVA im mitgeführten Equipment	F-620	ja / nein / n. z.	
3.2	Sicherheitstechnisches Wasser	Versorgung für Notdusche mit 50 l/min, Augendusche mit zusätzlich 14 l/min, Verdünnungsreserve und Berieselung zugesagt. Standortseitig oder durch einen Dienstleister in Gebinden. Nicht mitführbar und Freigabebedingung für Pre-Test und Test K.-o.	F-513, F-550	ja / nein / n. z.	
3.3	Druckgas Stickstoff	Verfügbarkeit, Druckniveau, Entnahmestelle, Anschlussart und Möglichkeit der Dauerentnahme geklärt. Anpassstufe im mitgeführten Equipment danach bemaßt. Andernfalls Flaschenbatterie in Regel- oder Vollbestückung	F-622	ja / nein / n. z.	
3.4	Betriebsmedien	Bereitstellung und Menge von HTP und Treibstoff je Kampagne festgelegt. Daraus folgt der Druckgasbedarf und die Zahl der Flaschen K.-o.	B-105	ja / nein / n. z.	
3.5	Druckluft	Keine Standortanforderung. Die Erzeugung erfolgt containerintern über den mitgeführten Kompressor	F-264	ja / nein / n. z.	
3.6	Interne Wasserreserve	Tank mit 50 l vor der Anreise befüllt. Nachfüllmöglichkeit am Standort geklärt	F-261	ja / nein / n. z.	
4 Gefahrenbereich und Absperrung (F-500, F-502, Abschnitt 11.1)					
4.1	Gefahrenbereich	Der nach F-502 in der Detailauslegung festgelegte Mindestabstand ist am Aufstellort darstellbar. Ein Wert wird auf Konzeptebene nicht vorgegeben	F-502	ja / nein / n. z.	
4.2	Absperrung	Mobile Absperrmaßnahmen vorhanden. Der Zutritt ist während der Zustände Pre-Test und Test gesichert	F-500, F-503	ja / nein / n. z.	
4.3	Benachbarte Einrichtungen	Bebauung, Verkehrswege und unbeteiligte Personen im Umfeld erfasst und bewertet	Abschnitt 11.1	ja / nein / n. z.	
4.4	Entfernung zur nächsten Hilfe	Rettungsdienst und Feuerwehr benannt. Alarmierungsweg und Zufahrt für Einsatzfahrzeuge festgelegt	Abschnitt 11.1	ja / nein / n. z.	
4.5	Wetterfenster	Grenzen für Wind und Witterung für den Testtag festgelegt. Ausschluss bei Starkregen und Gewitter	B-132	ja / nein / n. z.	
4.6	Umgebungstemperatur	Erwarteter Bereich zwischen 0 °C und 35 °C. Außerhalb nur mit zusätzlichen Maßnahmen	B-130	ja / nein / n. z.	
5 Kontrollraum und Leitungswege (B-161, Abschnitte 10.1 und 10.3)					
5.1	Standortseitiger Kontrollraum	Vorhanden und zur Nutzung freigegeben. Andernfalls wird die mitgeführte Bedieneinheit aufgebaut	B-161	ja / nein / n. z.	

Nr.	Prüfpunkt	Kriterium und Sollwert	Anforderung	Erfüllt	Befund und Bemerkung
5.2	Leitungsweg	Verlegeweg für die Datenleitung frei, gegen Beschädigung gesichert und innerhalb der verfügbaren Länge	Abschnitt 10.3	ja / nein / n. z.	
5.3	Energieversorgung Kontrollstand	Getrennt von der Versorgung des Prüfstands sichergestellt. Batterie, Netzteil, standortseitiger Anschluss oder eigenes Aggregat	Abschnitt 10.3	ja / nein / n. z.	
6 Entsorgungsweg (F-262, F-263, S-161, S-162)					
6.1	Entsorgungsfachbetrieb	Beauftragt und terminiert. Abholung der Transportgebinde nach Abschluss der Kampagne zugesagt K.-o.	F-263, S-162	ja / nein / n. z.	
6.2	Transportgebinde	Geeignete Gebinde für beide Sammelbehälter am Standort verfügbar. HTP-Seite und Treibstoffseite getrennt	F-262, F-263	ja / nein / n. z.	
6.3	Standortseitiger Entsorgungspfad	Für die entleerten Sammelbehälter geklärt. Eine Einleitung in die Umwelt oder in das Abwassernetz ist ausgeschlossen	S-161	ja / nein / n. z.	
7 Erdung (F-522)					
7.1	Anschlusspunkt	Fundamenterde oder standortseitige Erdungsanlage vorhanden. Auf Beton sind Erdungsspitze nicht setzbar	F-522	ja / nein / n. z.	
7.2	Übergangswiderstand	Vor der Betriebsfreigabe gemessen und dokumentiert. Alle leitfähigen Anlagenteile im Potentialausgleich	F-522	ja / nein / n. z.	
8 Behördliche Freigaben und Betreiberpflichten (S-110, S-120, S-163, Abschnitt 11.4)					
8.1	Explosionsschutzdokument	Für diesen Standort erstellt oder fortgeschrieben. Bei wechselnden Standorten je Standort fortzuschreiben	S-120, F-520	ja / nein / n. z.	
8.2	Gefährdungsbeurteilung	Nach § 6 GefStoffV für diesen Standort vorliegend	S-110	ja / nein / n. z.	
8.3	Immissionsrechtliche Lage	Schall- und Luftemissionen bewertet. Genehmigungslage am Standort geklärt	S-163	ja / nein / n. z.	
8.4	Zustimmung des Betreibers	Schriftlich vorliegend. Nutzungsumfang, Zeitraum und mitbenutzbare Infrastruktur benannt	B-162	ja / nein / n. z.	
8.5	Qualifikation des Personals	Nachweise für die drei Rollen vorliegend. Einweisung, HTP-Schulung, Sachkunde Druck und gegebenenfalls Explosionsschutz	B-150, B-151	ja / nein / n. z.	

Auswertung

Die Auswertung folgt aus den Abschnitten 1 bis 8 und ist die Grundlage der Beladung nach Abschnitt 9.2 der Arbeit.

Betriebsart	autarker Betrieb / Betrieb mit Standortversorgung / gemischter Betrieb
Stromaggregat	wird mitgeführt / entfällt, Versorgung nach 3.1 zugesagt
Flaschenbestückung	Regelbestückung vier Flaschen / Vollbestückung sechs Flaschen / entfällt, Versorgung nach 3.3 zugesagt
Anpasssstufe Druckgas	wird mitgeführt und ist auf das Druckniveau nach 3.3 bemaßt / entfällt
Gebinde Betriebsmedien	werden mitgeführt / werden angeliefert
Lastverteilplatten	erforderlich nach 1.4 / nicht erforderlich
Kontrollstand	mitgeführte Bedieneinheit / standortseitiger Kontrollraum nach 5.1

Freigabe

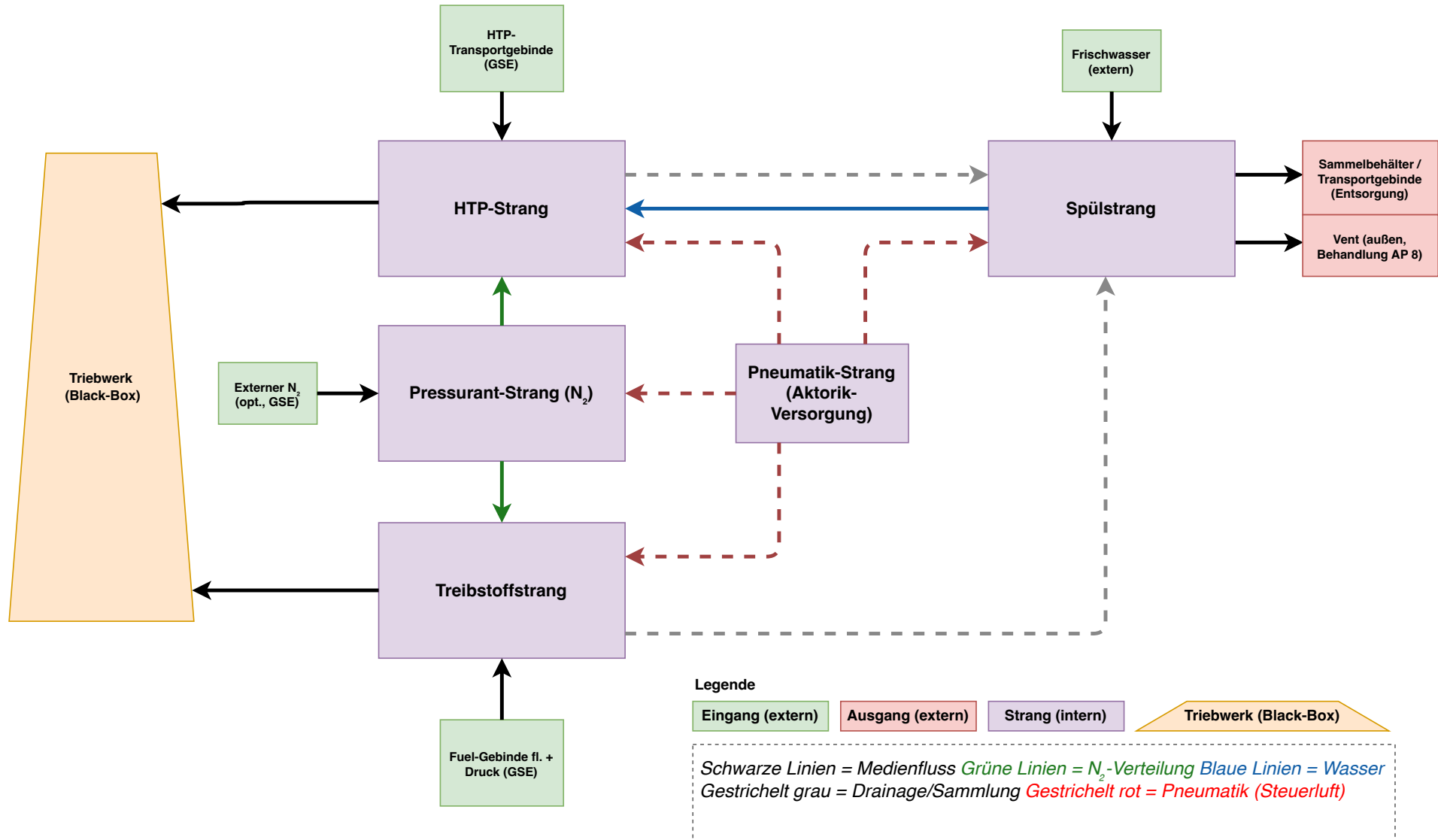
Mit der Unterschrift wird bestätigt, dass alle Prüfpunkte abgearbeitet sind und die drei K.-o.-Punkte 3.2, 3.4 und 6.1 zugesagt vorliegen. Die Freigabe ersetzt weder die Gefährdungsbeurteilung noch das Explosionsschutzdokument. Beide sind Betreiberpflicht und Voraussetzung dieser Prüfung.

Datum		Sicherheitsverantwortlicher	
--------------	--	------------------------------------	--

A.17 R&I-Fließbilder

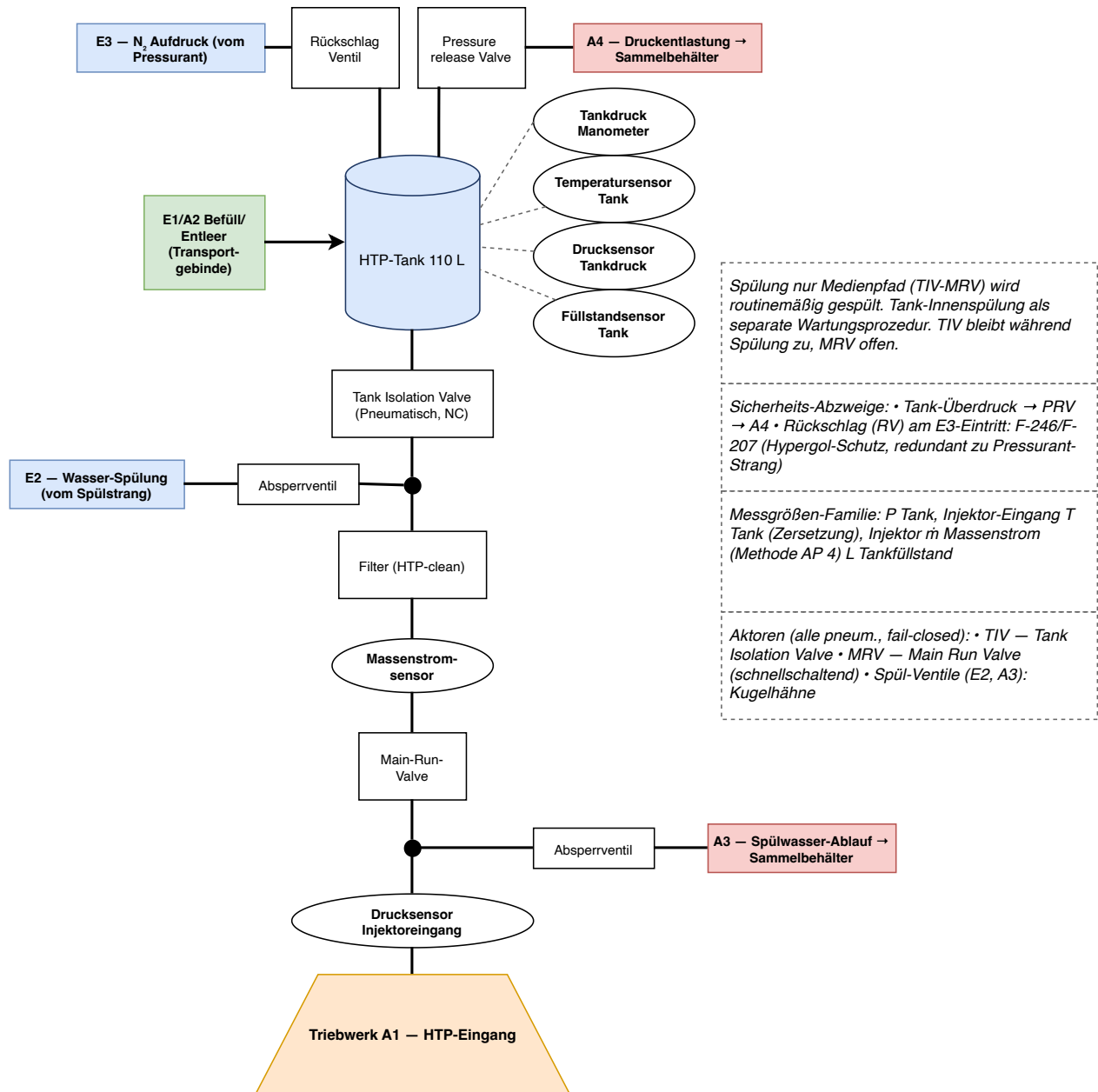
TERRA R&I— Übersicht der Stränge und Schnittstellen

Stand: 29.04.2026 — Konzept-Grundgerüst, Detaillierung in AP 3



HTP-Strang — Konzept-R&I

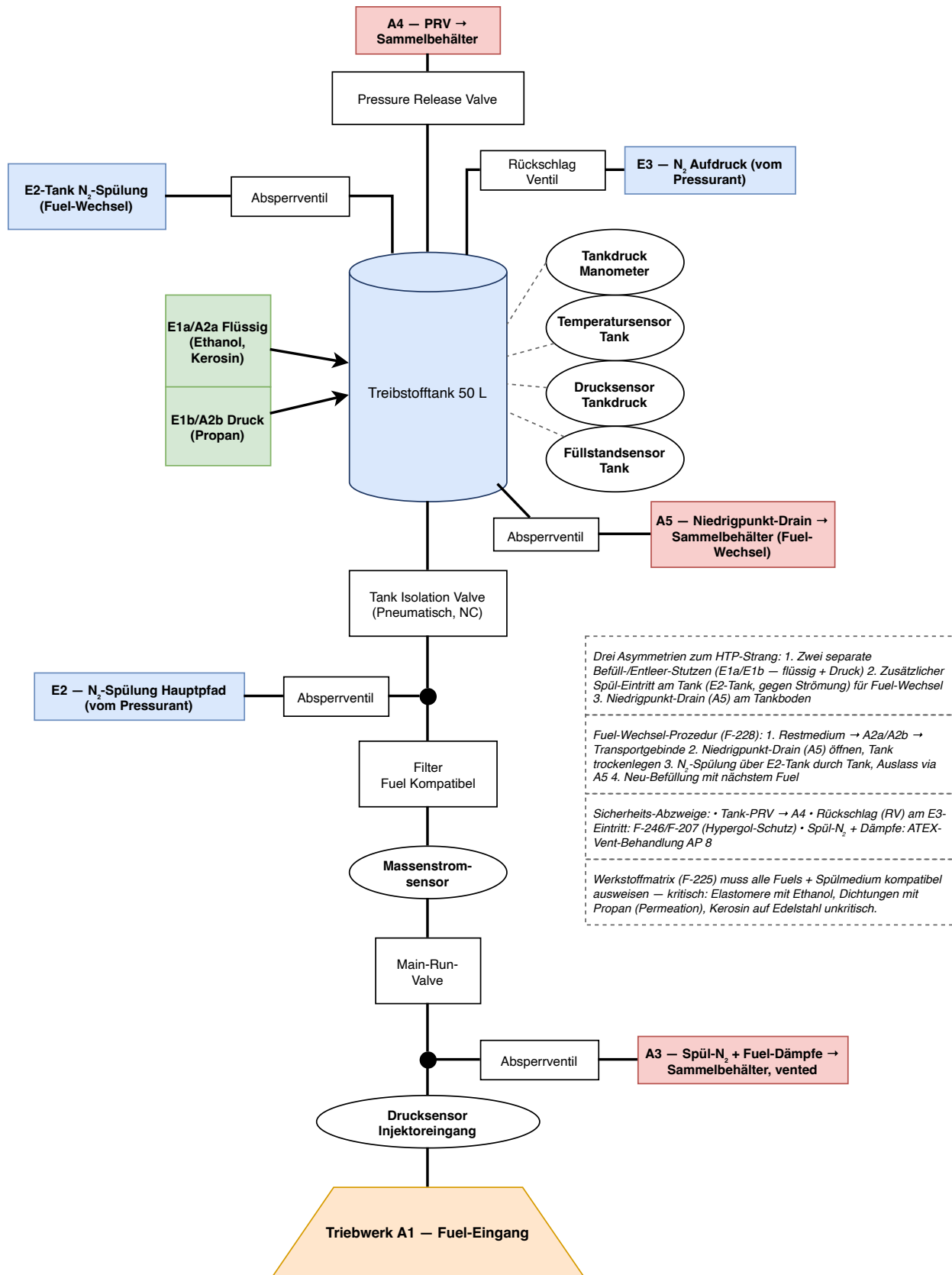
HTP 90 % | Tank 110 L | $\dot{m}_{\text{max}} \approx 421 \text{ g/s}$ @ 5 kN | Tankdruck $\leq 39 \text{ bar}$
 | Spülmedium: Wasser



Fuel-Strang — Konzept-R&I

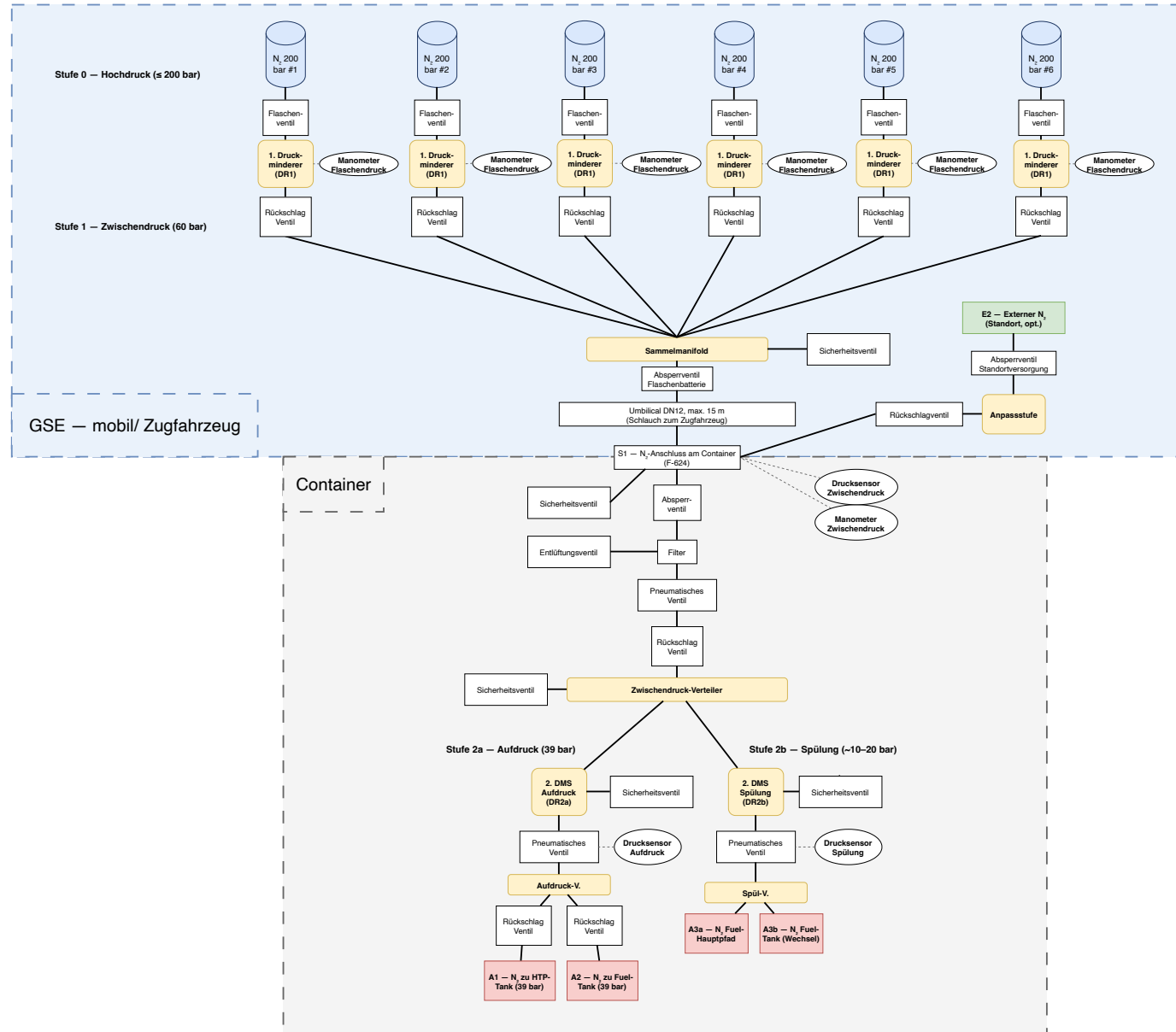
Multi-Fuel: Ethanol (Lead) | Kerosin | Propan | Tank 50 L |

Spülmedium: N₂



Pressurant-Strang (N₂) – Konzept-R&I

Druckkaskade: 200 bar → Zwischendruck 60 bar → Aufdruck /
Spülung (~10–20 bar) | F-242, F-243, F-244, F-247



Hochdruck-Abschnitt so kurz wie möglich: Druckminderer jeweils direkt an der Flasche. Der Hochdruckabschnitt endet an DR1 – containerseitig ist kein Bauteil für mehr als den Zwischendruck ausgelegt.

F-247 erzwingt zwei getrennte Regelpfade Aufdruck/Spülung – daher zwei parallele zweite Druckminderstufen.

Rückschläge an "beiden" Seiten der Aufdruck- verteilung: hier am Verteiler (RVA1/RVA2), plus tankseitig im HTP- und Fuel-Strang. Single-Failure-Toleranz für F-246/F-207.

Spülpfad ohne Rückschläge nach Verteiler: Absperrventile am T-Stück Spül-Eintritt im Fuel-Strang übernehmen die Trennung.

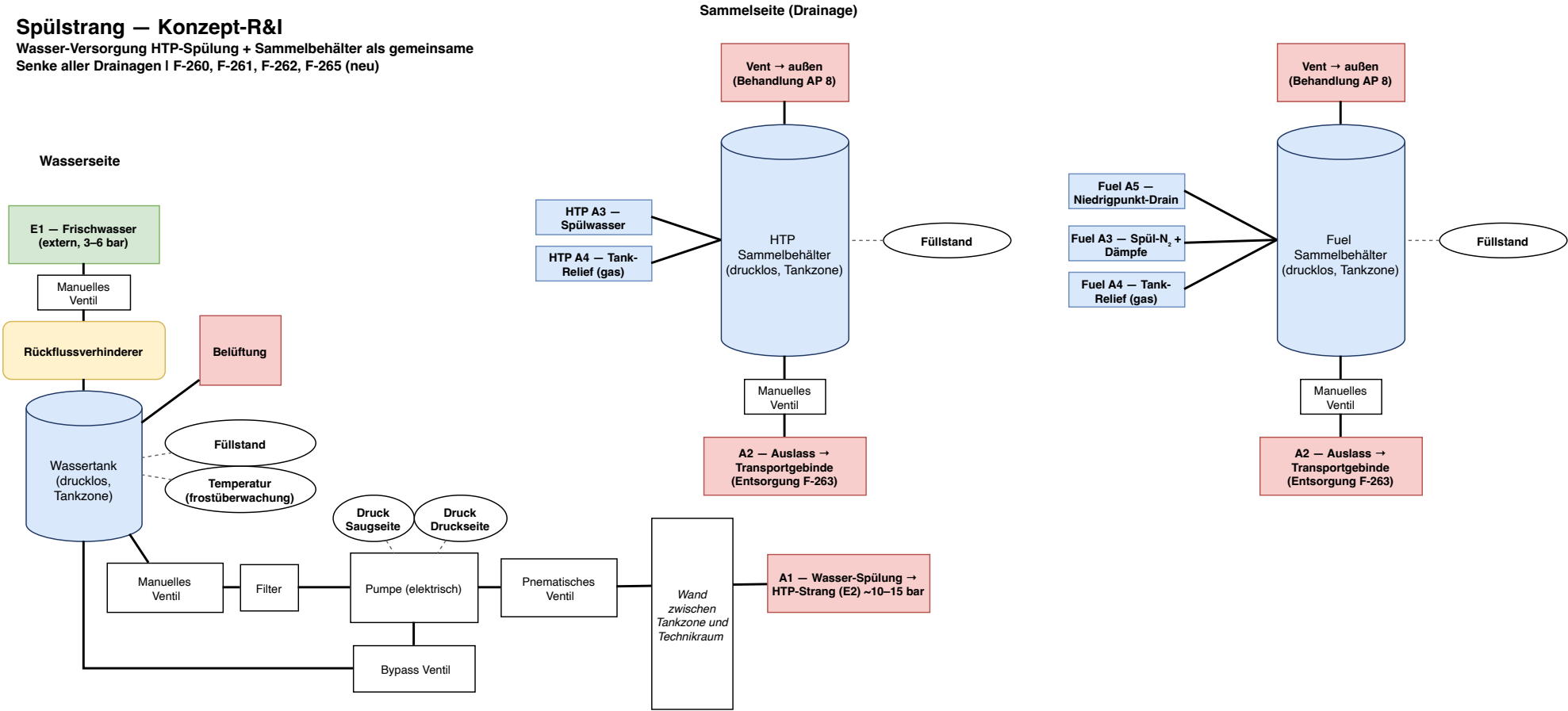
Externer N₂ (E2): Druckniveau standortabhängig, Anpass-Stufe gehört zum GSE, nicht in den Container (siehe Standort-Checkliste, AP 5). Flaschenbatterie und Standortleitung münden in dieselbe Schnittstelle S1.

Manometer an jeder Flasche – der Operator liest den Flaschendruck im Access-Zustand ab und bestätigt ihn. Drucksensoren nur containerseitig, für Interlocks.

Offen für AP 3: Spüldruck final (10–20 bar) • Pufferbehälter zwischen DR2b und Aufdruck-Verteiler (Reguliere) • Vent-Platz aller PRV: gemeinsam vs. einzeln • Aufdruck 39 bar vs. gerechnet 33,8 bar (F-241)

Spülstrang — Konzept-R&I

Wasser-Versorgung HTP-Spülung + Sammelbehälter als gemeinsame
Senke aller Drainagen | F-260, F-261, F-262, F-265 (neu)



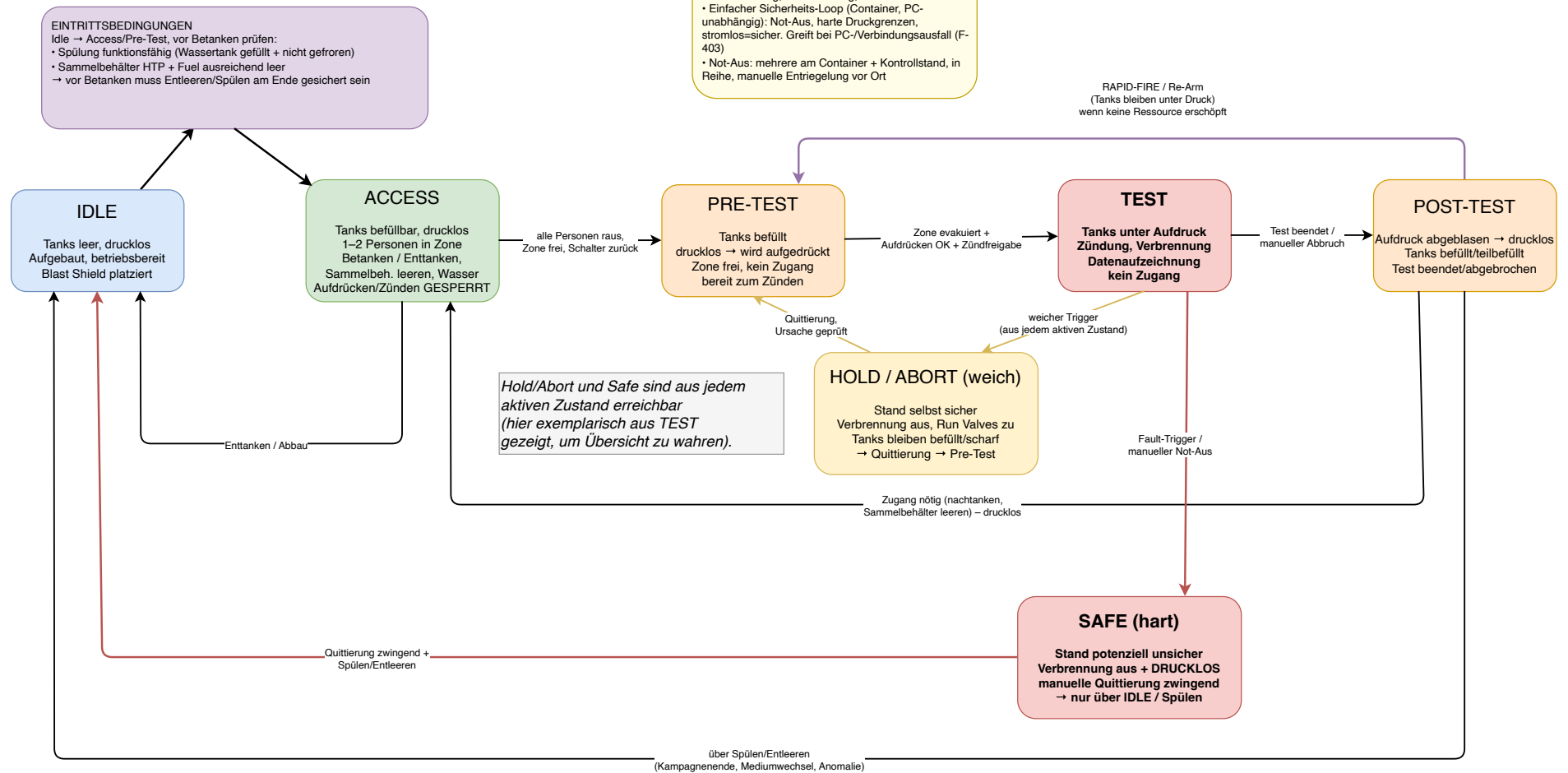
Wasserseite — Variante (a) festgelegt: Tank in Reihe mit externem Anschluss, Spülung läuft "immer" aus dem Tank. Externer Anschluss dient nur dem Auffüllen. Tank bleibt drucklos.

Druckerhöhung über elektrische Pumpe im Technikraum (nicht N₂-aufgedrückt). ATEX-konsistent mit Architekturentscheidung W4, PRV nach Pumpe → zurück in Tank, nicht in Sammelbehälter (Reserve schonen).

Sammelbehälter-Konstraint: • Drucklos → Gas-Inputs gehen durch und oben über Vent raus (kein Druckaufbau) • Werkstoff: alle Medien + verdünntes HTP (Edelstahl 316L, HTP-clean prepped) • Volumen: Kampagne × Reserve, Wert AP 3 • Vent-Behandlung: Aktivkohle/Wäscher TBD AP 8

A.18 Zustandsdiagramm

TERRA – AP4 Steuerungs- & Sicherheitslogik (Zustandsmaschine)



FAULTS

HTP-Strang
 H1 Tankdruck > Hold-Schwelle → HOLD (abregeln)
 H2 Tankdruck > harte Grenze → SAFE
 H3 Massenstrom-Abweichung (Test) → SAFE
 H4 Injektordruck-Einbruch (Test) → SAFE

Fuel-Strang (analog HTP, im Test gleich streng)
 F1 Tankdruck > Hold-Schwelle → HOLD
 F2 Tankdruck > harte Grenze → SAFE
 F3 Massenstrom-Abweichung (Test) → SAFE
 F4 Injektordruck-Einbruch (Test) → SAFE

N₂-Strang
 N1 Flaschendruck < Min (Stillstand) → HOLD (Tausch)
 N2 Aufdruck zu niedrig (Stillstand) → HOLD
 N3a Aufdruck fällt langsam, Flasche leert (Test) → HOLD
 N3b Aufdruck bricht plötzl. ein, Flasche voll (Test) → SAFE
 N4 Aufdruck zu hoch → HOLD → SAFE bei extrem
 Trennung: Rate + Korrelation P-Flasche/P-Aufdruck

Quergrößen
 Spannungsversorgung außer Toleranz / Ausfall → SAFE (immer; Totalausfall = stromlos=sicher, HW-seitig)
 Umgebung (p, T, Feuchte) → nur Logging, kein Abort
 Person vor Zündung → blockiert Pre-Test → Test
 Person in Zone im Test → HOLD | physischer Not-Aus → SAFE
 Sammelbehälter-Füllstand → Statusanzeige, kein Abort; nur echte Obergrenze blockiert Re-Arm

A.19 Datenblätter

Technische Beschreibung LAGERCONTAINER

Die nachstehende Beschreibung bezieht sich auf die Ausführung und Ausstattung neuer Standard-Container.

Abmessungen und Gewichte:

		Type					
		LC 6'	LC 8'	LC 9'	LC 10'	LC 15'	LC 20'
Außen	Länge (mm)	1.980	2.438	2.931	2.991	4.550	6.058
	Breite (mm)	1.970	2.200	2.200	2.438	2.200	2.438
	Höhe (mm)	1.910	2.260	2.260	2.591	2.260	2.591
Innen	Länge (mm)	1.800	2.275	2.770	2.831	4.387	5.898
	Breite (mm)	1.860	2.106	2.106	2.344	2.106	2.344
	Höhe (mm)	1.730	2.050	2.050	2.376	2.050	2.376
Türöffnung	Breite (mm)	1.850	2.070	2.070	2.310	2.070	2.310
	Höhe (mm)	1.690	1.945	1.945	2.280	1.945	2.280
	Gewicht (kg) – HB*	450	630	690	825	915	1270
	Gewicht (kg) – SB**	515	725	785	935	1.075	1.495
	Ladevolumen (m³)	6,66	9,82	12	15,76	18,94	32,85

* Lagercontainer mit Holzboden

** Lagercontainer mit Stahlboden

Staplertaschen:

Abstand-mittig (mm)	950		2.050
Lichtes Maß Breite x Höhe (mm)	245x70	355x105	

Tragfähigkeit:*

max. Nutzlast (kg)	2.000	3.500	8.500	10.000	5.000	10.000
max. Bodenbelastung (kg/m²)	600	750	1.500	1.500	550	750
max. Hebenutzlast bei 1,5g (kg)	-	2.300	5.600	6.500	3.350	6.500
max. Stapelgewicht (kg)	-	6.500	13.250	15.400	9.500	17.000
Charakteristische Schneelast am Boden (kg/m²): s _k gemäß EN 1991-1-3	S _k = 2,5 kN/m² (250 kg/m²) Formbeiwert $\mu = 0,8$ ($s = \mu_1 \cdot S_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$ (200 kg/m²))					
max. Punktlast in der Dachmitte (30x30cm; kg)	150					
Stapelung **	nicht stapelbar	max. 3 hoch				

* Tragfähigkeit gemäß statischer Berechnung und DNV GL-Typ- Zertifikat

** Die gestapelten Container dürfen nur mit der max. zulässigen Hebelast beladen werden! Zur Stapelung sind die speziellen CTX- Zentrierelemente (Stacking Cones) erforderlich.

Die Niveaugleichheit der Auflageflächen ist Voraussetzung für den einwandfreien Stand der Container.

Bei Gefahr von starkem Wind ist eine entsprechende Verankerung notwendig (Abspannen mit Stahlseilen, etc.)

Boden:

Rahmenkonstruktion:	verschweißte Stahlprofile, 2 bis 3 mm stark Bodenquerträger aus U-Profil vorderer Bodenträger nach Außen geneigt
Staplertaschen:	Stahlprofile 2,5 mm stark
Fußboden:	- Holzboden beschichtete Schichtholzplatten 21 mm stark wasserbeständig Abdichtung mit elastischem Dichtungsmittel - Stahlboden Tränenblech genietet, Grundstärke 3 mm, Tränenmuster 1 mm Blechstöße silikoniert

Corner Cast:

	- verschweißte Containerecken, Außenmaße gemäß ISO-Norm Stärke 6 mm (außer LC 6' - Kranösen aus verschweißtem Stahlprofil 10 mm stark)
--	--

Dach:

Rahmenkonstruktion:	- verschweißte Stahlprofile 2,5 bzw. 3 mm stark - Wetterschenkel am vorderen Dachträger
Deckung:	- selbsttragendes, quergesicktes Blech 1,2 mm stark

Ecksäulen:

	- vordere Ecksäule: 3 mm starkes Stahlprofil - hintere Ecksäule: 2 mm starkes Stahlprofil
--	--

Wände:

	- vertikalgesicktes Stahlblech 1,2 mm stark - 4 Zwangsbelüftungsöffnungen unter dem Dachrahmen angeordnet
--	--

Türen:

	Doppelflügeltür, mit umlaufender Spezial-Gummidichtung Öffnungsradius ca. 270°
Verkleidung:	horizontalgesicktes Stahlblech 1,2 mm stark
Verriegelung:	- spezielle Verriegelungsmechanismen - aus verzinktem Rohr und Haltewinkel, mit integrierten Kunststoff- Gleitbuchsen
Befestigung:	mittels verzinkten und geschmiedeten Scharnieren am Türblatt angeschweißt
Einbruchsicherung:	Baustahl mit Materialstärke 6,0 mm angeschweißt an LC-Türe, in Containerfarbe

Handling:

mit Stapler:	Gabellänge min. 2 m, Gabelbreite min. 20 cm
mit Kran:	Winkel zw. Hebeseil und Horizontale min. 60°

Lackierung:*

	umweltfreundliches kombiniertes Beschichtungssystem mit hoher Witterungsbeständigkeit
Vorbehandlung:	Entfettung und Zinkphosphatierung mittels Tauchverfahren
Grundierung:	kathodische Tauchlackierung (Farbton grau) mit Durchschnittsschichtstärke 20µm (mind. 15µm).
Decklackierung (außen):	hochwertige Pulverbeschichtung auf Polyesterbasis (Fassaden- Qualität) mit Durchschnittsschichtstärke 70 µm (mind. 60µm)

* Mit dem angewendeten Lackierverfahren werden RAL-ähnliche Farbtöne erreicht. Für Farbabweichungen im Vergleich zu den RAL-Tönen übernehmen wir keine Gewähr.

Optionen:

	Type					
	LC 6'	LC 8'	LC 9'	LC 10'	LC 15'	LC 20'
Lackierung nach CTX-RAL-Karte ¹	■	■	■	■	■	■
Boden Stahlriffelblech 3 + 1 mm	■	■	■	■	■	■
Sicherheitspaket	■	■	■	■	■	■
Elektroinstallation (wahlweise stirn- oder längsseitig)		■	■	■	■	■
2. Doppelflügeltüre stirnseitig ²		■	■	■	■	■
Sektionaltor ³				■		■
Fenster (inkl. Fenstergitter) ⁴		■ ⁵	■ ⁵	■	■ ⁵	■
Türe 875 x 2.125 (mm) ⁴				■		■
Reduzierter Staplertaschenabstand ⁶						■ (950 mm)
Regal		■	■	■	■	■
Lüftungsgitter		■	■	■	■	■

¹ Farbsammlung RAL Classic

² keine Statik und kein DNV GL-Zertifikat verfügbar

³ kein DNV GL-Zertifikat verfügbar

⁴ max. 1 Einbaute pro Stirnseite möglich

max. 2 Einbauten pro Längsseite möglich

pro Längsseite nur eine Ecksäulenposition möglich

Abstand zwischen den Einbauten mindestens zwei volle Sicken (ca. 450mm)

⁵ nur im Erdgeschoß möglich

⁶ Manipulation mit dem Stapler nur leer möglich

Elektroinstallation:

Ausführung:	Aufputz
Technische Daten:	- versenkter CEE-Außenanschluss über Stecker/Steckdose - Spannung 230 V / 400 V - 50 Hz; 3/5-polig; 32 A - Schaltplan im Verteilerkasten beigelegt - Verteilerkasten AP, einreihig mit integrierten Steckdosen - 2 x Steckdosen, 1 x Starkstromsteckdose (GB-Elektrik ohne Funktion) - FI Schalter 40A/0,03A 2-polig⁸ / 40A/0,03A, 4-polig, Type A X - LS Schalter ⁷ 16A, 4-polig – Starkstromsteckdose 400 V - LS Schalter ⁷ 10/13A, 2-polig – Steckdosen 230 V – Licht - 1 Stk. LED-Anbauleuchte mittig - Aufputz-Feuchtraum-Schalter im Türbereich
Optional:	Steckdosen: - FR-Elektrik 13A - GB-Elektrik 13A - CH-Elektrik 10A - IT-Elektrik 10A

⁷ Auslösecharakteristik C

⁸ Länderspezifisch mit 63A / 0,03 A, 2-polig (230 V) Type A

Erdung:	Erdungsleiter aus verzinktem Flacheisen und Kreuzklammer. Die Schutzerdung des Containers übernimmt der Käufer/Mieter am Aufstellort.
Sicherheitshinweis:	Die Container können über die vorhandenen CEE-Steckvorrichtungen elektrisch miteinander verbunden werden. Bei der Festlegung der Anzahl der Container, die elektrisch miteinander verbunden werden können, ist der zu erwartende Dauerstrom in den Verbindungsleitungen zu berücksichtigen. Die Inbetriebnahme der Container muss von einem Elektrofachmann durchgeführt werden. Die Schutzgeräte (FI & LS) sind für eine minimale Lufttemperatur von -25°C ausgelegt. Anleitung für Montage, Inbetriebnahme, Anwendung und Instandhaltung der Elektroinstallation wird im Verteilerkasten mitgeliefert und ist zu beachten!

Fenster:

Ausführung:	- Kunststoff-Fenster mit Isolierverglasung; Farbe: weiß - Einhand-Dreh-/Kippbeschlag - Fensterabmessungen (Stockmaße): 945 x 1.200 mm - OHNE Rollläden ACHTUNG: Die eingebaute Isolierverglasung ist für eine Seehöhe bis 1.100 m geeignet. Über 1.100 m muss ein Druckausgleich durchgeführt werden.
Fensterparapet:	LC 10' / LC 20': 870 mm LC 8' / LC 9' / LC 15': 770 mm
Optional:	- Fenster mit Fenstergitter

Türen:

Ausführung:	- rechts oder links angeschlagen - Türblatt aus beidseitig verzinkten Blechen mit 40 mm Isolierung - Stahlzarge mit dreiseitig umlaufender Dichtung - Abmessungen:
	Baurichtmaße 875 x 2.125 mm
	Lichte Durchgangsmaße 811 x 2.065 mm

Sektionaltor:

Ausführung:	- Doppelwandige Stahlkassette mit PU-Schäumung – Kassettendicke 42 mm - Verzinkte Beschläge, Zarge, Laufschienen und Verbindungsschiene - Manuelle Öffnung per Drehgriff und Profilzylinder - Einbruchhemmende Schnäpperverriegelung - Liches Maß (Breite x Höhe): 2.100 x 2.070 mm
Farbton:	- Außen: RAL 5010 / 7035 / 9010 - Innen: RAL 9002

Zertifizierungen:

Produktion Statik Verriegelungsstangen Gummidichtungen Güteüberwachung	ISO 9001:2015 CAE Simulation & Solution GmbH GL-Produktionsabnahme Zertifikat GL-Produktionsabnahme Zertifikat DNV GL Typen-Zertifikat
--	--

Hinweise:

- Behördliche und gesetzliche Auflagen betreffend Lagerung, Aufstellung und Benützung der Container sind vom Kunden zu beachten.

Technische Änderungen, Druck-, Satzfehler sowie Irrtümer vorbehalten.

Technische Beschreibung

PremiumLine Körper-Notdusche mit Augendusche, für Über-Tür-Montage Aufputz

- inklusive oberem und unterem Wasseranschluss 3/4-Zoll-IG für den Einbau in Zirkulationsleitungen, Stopfen 3/4-Zoll aus Edelstahl
- Wandflansch mit vier Befestigungsbohrungen aus Edelstahl, poliert, Wasseranschluss 3/4-Zoll-IG
- integrierte PremiumLine Sicherheits-Augendusche mit zwei Brauseköpfen 45°
- Anschlussrohr aus Edelstahl für eine einfache Montage und Ausrichtung der Dusche, poliert, Wasseranschluss 3/4-Zoll-AG
- Kugelhahn 1/2-Zoll aus Edelstahl, mit PUSH-Hebel-Bedienung, DIN-DVGW geprüft und zugelassen
- Bedienplatte aus Edelstahl, poliert, Länge 130 mm, mit großem Signal "PUSH", langnachleuchtend gemäß DIN 67510
- integrierter automatischer Mengenregulator 14 Liter / Minute für ein normgerechtes Strahlbild bei einem vorgegebenem Arbeitsbereich von 1,5 bis 5 bar Fließdruck
- breitstrahlende Hochleistungsbrauseköpfe aus Edelstahl, poliert, 45° abgewinkelt, mit Kunststoffsprühplatte, verkalkungsarm, inkl. Gummischutz und dichtschießendem Staubdeckel mit Klappmechanismus, montiert über Verteilergabel
- Hinweisschild für Augendusche nach DIN EN ISO 7010 und ASR A1.3, selbstklebende PVC-Folie, Abmessungen 100 x 100 mm, Erkennungsweite 10 Meter
- zwei Verbindungsrohre 3/4-Zoll aus Edelstahl, poliert, Gesamtlänge 1500 mm
- Wandflansch in T-Ausführung mit 4 Befestigungsbohrungen aus Edelstahl, poliert, Wasseranschluss 3/4-Zoll-IG
- Anschluss-Adapter aus Edelstahl, poliert, mit integriertem automatischen Mengenregulator 50 Liter / Minute für ein normgerechtes Strahlbild bei einem vorgegebenen Arbeitsbereich von 1,5 bis 3 bar Fließdruck
- Verbindungsrohr 3/4-Zoll aus Edelstahl, poliert, Länge 75 mm
- Kugelhahn 3/4-Zoll aus Edelstahl, mit Zugstangenbetätigung, DIN-DVGW geprüft und zugelassen
- Zugstange mit Ringgriff aus Edelstahl, poliert, Länge 700 mm
- Führungshalter für Zugstange aus Edelstahl, poliert
- Verbindungsrohr 3/4-Zoll aus Edelstahl, poliert, Länge 500 mm
- Wandflansch mit 4 Befestigungsbohrungen aus Edelstahl, poliert
- Wandduscharm 3/4-Zoll aus Edelstahl, poliert, Ausladung 525 mm
- Hochleistungsduschkopf aus Edelstahl, poliert, mit verbessertem Strahlbild, korrosionsbeständig, weitestgehend verkalkungs- und wartungsfrei, sehr robust, selbst entleerend
- Hinweisschild für Körper-Notdusche nach DIN EN ISO 7010 und ASR A1.3, selbstklebende PVC-Folie, Abmessungen 150 x 150 mm, Erkennungsweite 15 Meter
- Anbringungshöhe 810 mm (± 100 mm)
- gemäß BGI/GUV-I 850-0, DIN 1988 und DIN EN 1717
- gemäß ANSI Z358.1-2014, DIN EN 15154-1:2006, DIN EN 15154-2:2006 und DIN EN 15154-5:2019
- DIN-DVGW geprüft und zugelassen

Fabrikat: B-SAFETY oder gleichwertig
Artikel-Nr.: BR 871 095

Technische Daten

Mindestfließdruck:	1,5 bar	<u>Technische Daten Augendusche:</u>	
Betriebsdruck:	1,5 bis 3 bar	Mindestfließdruck:	1,5 bar
Volumenstrom Körperdusche:	50 Liter / Minute	Betriebsdruck:	1,5 bis 5 bar
Wasseranschluss:	3/4-Zoll-IG	Volumenstrom:	14 Liter / Minute
Abmessungen (H x B x T):	1625 x 940 x 535 mm		

Normenkonformität

- ANSI Z358.1-2014
- DIN EN 15154-1:2006
- DIN EN 15154-2:2006
- DIN EN 15154-5:2019

Zulassungen

- DIN-DVGW, NW-0416CL0425
- DIN-DVGW, NW-0417CL0263





Technische Daten

Material

Elastomer-Compound aus Synthesekautschuk und Polyurethan

Maße

8 mm Dicke, Breite und Länge in Rollen und Platten nach gängigen Maßen oder nach Wunsch.

Gleitreibbeiwert

Messwert 0,86 μ

Wert gemäß VDI 2700 - Blatt 14, 0,82 μ

Praxisbezogener Rechenwert 0,6 μ

Maximalbelastung*

Bis 630 t/m² = 6,30 N/mm² bei 8 mm Dicke

Zugfestigkeit

Mindestens 0,60 N/mm²

Reißdehnung

Mindestens 60 %

Produkteigenschaften

- + Mehrfach verwendbar, langlebig, zugfest
- + Definierte Lastbereiche, verlässlicher Gleitreibbeiwert
- + Extremwettertauglich
- + Verschmutzungstolerant, leichte Entsorgung

Services

- + Berechnungsservice Sicherungsmethoden
- + Wissen und Beratung
- + Vertrauensbildung bei Kontrollen
- + Produktvarianten
- + Ihre Konditionen
- + Unterstützung bei Unterwegskontrolle

Eine Übersicht zu unseren Produkteigenschaften und Services finden Sie ab [\[Seite 18\]](#)

* In Anlehnung an DIN EN ISO 3386-2. Prüfmustergröße 60 x 60 mm

Climate 3000i

CL3000i-Set 26 WE

7733701735

Soweit auf das Produkt anwendbar, beruhen die nachfolgenden Angaben auf Anforderungen der Verordnungen (EU) 206/2012 und (EU) 626/2011.

Produktdaten	Symbol	Einheit	7733701735
Modellkennung der Inneneinheiten des Luftkonditionierers			7733701564
Modellkennung der Außeneinheit des Luftkonditionierers			7733701565
Schallleistungspegel in Innenräumen im Kühlbetrieb	L _{WA}	dB	54
Schallleistungspegel im Freien im Kühlbetrieb	L _{WA}	dB	62
Schallleistungspegel in Innenräumen im Heizbetrieb	L _{WA}	dB	54
Schallleistungspegel im Freien im Heizbetrieb	L _{WA}	dB	62
Kältemitteltyp			R32
Der Austritt von Kältemittel trägt zum Klimawandel bei. Kältemittel mit geringerem Treibhauspotenzial tragen im Fall eines Austretens weniger zur Erderwärmung bei als solche mit höherem Treibhauspotenzial. Dieses Gerät enthält Kältemittel mit einem Treibhauspotenzial von 675,000 kgCO ₂ eq. Somit hätte ein Austreten von 1 kg dieses Kältemittels 675,000 Mal größere Auswirkungen auf die Erderwärmung als 1 kg CO ₂ , bezogen auf hundert Jahre. Keine Arbeiten am Kältekreislauf vornehmen oder das Gerät zerlegen – stets Fachpersonal hinzuziehen.			
Arbeitszahl im Kühlbetrieb	SEER		7,4
Effizienzklasse Kühlbetrieb			A++
Energieverbrauch 132 kWh/Jahr, auf der Grundlage von Ergebnissen der Normprüfung. Der tatsächliche Verbrauch hängt von der Nutzung und vom Standort des Geräts ab.			
Auslegungslast P _{designc}	P _{designc}	kW	2,8
SCOP/A mittleres Klima	SCOP/A		4,1
Effizienzklasse Heizbetrieb, mittleres Klima			A+
Energieverbrauch 854 kWh/Jahr, auf der Grundlage von Ergebnissen der Normprüfung. Der tatsächliche Verbrauch hängt von der Nutzung und vom Standort des Geräts ab.			
Heizperiode mittel			Ja
Heizperiode wärmer			Ja
Heizperiode kälter			Ja
Auslegungslast mittleres Klima	P _{designh}	kW	2,5
Angegebenes Leistungsvermögen bei Bezugs-Auslegungsbedingungen		kW	2,9
Ersatzheizleistung bei Bezugs-Auslegungsbedingungen		kW	0,2
Kühlung			Ja
Heizung			Ja
Angegebene Leistung im Kühlbetrieb bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 35 °C	P _{dc}	kW	2,8
Angegebene Leistung im Kühlbetrieb bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 30 °C	P _{dc}	kW	2,1
Angegebene Leistung im Kühlbetrieb bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 25 °C	P _{dc}	kW	1,4
Angegebene Leistung im Kühlbetrieb bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 20 °C	P _{dc}	kW	1,0
Angegebene Leistungszahl bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 35 °C	EER _d		3,6
Angegebene Leistungszahl bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 30 °C	EER _d		5,2
Angegebene Leistungszahl bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 25 °C	EER _d		9,0
Angegebene Leistungszahl bei Raumlufttemperatur 27(19) °C und Außenlufttemperatur 20 °C	EER _d		15,2
Angegebene Leistung im Heizbetrieb (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur -7 °C	P _{dh}	kW	2,2
Angegebene Leistung im Heizbetrieb (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur 2 °C	P _{dh}	kW	1,4
Angegebene Leistung im Heizbetrieb (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur 7 °C	P _{dh}	kW	0,9

Climate 3000i

CL3000i-Set 26 WE

7733701735

Produktdaten	Symbol	Einheit	7733701735
Angegebene Leistung im Heizbetrieb (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur 12 °C	P _{dh}	kW	1,1
Angegebene Leistung im Heizbetrieb (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Bivalenztemperatur	P _{dh}	kW	2,2
Angegebene Leistung im Heizbetrieb (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Grenzwert der Betriebstemperatur	P _{dh}	kW	2,3
Angegebene Leistungszahl (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur -7 °C	COP _d		2,5
Angegebene Leistungszahl (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur 2 °C	COP _d		4,1
Angegebene Leistungszahl (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur 7 °C	COP _d		5,4
Angegebene Leistungszahl (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Außenlufttemperatur 12 °C	COP _d		6,9
Angegebene Leistungszahl (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Bivalenztemperatur	COP _d		2,5
Angegebene Leistungszahl (Heizperiode mittel) bei Raumlufttemperatur 20 °C und Grenzwert der Betriebstemperatur	COP _d		2,3
Bivalenztemperatur Heizung - mittel	T _{biv}	°C	-7
Betriebsgrenzwert-Temperatur Heizung - mittel	T _{ol}	°C	-15
Leistung bei zyklischem Intervall-Kühlbetrieb	P _{cycc}	kW	-
Leistung bei zyklischem Intervall-Heizbetrieb	P _{cyh}	kW	-
Minderungsfaktor Kühlbetrieb	C _{dc}		0,3
Leistungszahl bei zyklischem Intervall-Kühlbetrieb	EER _{cycc}		-
Leistungszahl bei zyklischem Intervall-Heizbetrieb	COP _{cycc}		-
Minderungsfaktor Heizbetrieb	C _{dh}		0,3
Andere elektrische Betriebszustände als Aktiv-Modus: Aus-Zustand	P _{OFF}	kW	0,0
Andere elektrische Betriebszustände als Aktiv-Modus: Bereitschaftszustand	P _{SB}	kW	0,0
Andere elektrische Betriebszustände als Aktiv-Modus: Temperaturregler aus	P _{TO}	kW	0,0
Andere elektrische Betriebszustände als Aktiv-Modus: Kurbelwannenheizung	P _{CK}	kW	0,0
Leistungssteuerung: fest eingestellt			Nein
Leistungssteuerung: abgestuft			Nein
Leistungssteuerung: variabel			Ja
Nenn-Luftdurchsatz innen		m ³ /h	520
Nenn-Luftdurchsatz außen		m ³ /h	1850



ATEX Zone 2, Explosion Proof Split Unit Air Conditioners

(Technical cooling/heating, plug and play, pre-filled with R32 or R410A refrigerant)

Explosion Safety	CE Ex II 3G ; Ex ec h ic nC IIC T3 Gc (ready for all gasgroups IIA/IIB/IIC)
------------------	---

Atexxo Manufacturing, explosion proof air conditioners (ATEX) developed for technical cooling and 24/7 operation. These split units are designed for safe use in zone 2 gas/vapor explosive atmospheres, suitable for all gas groups including hydrogen. ATEX Zone 2 is the European equivalent for US, NEC Class 1 Division 2 equipment. (C1D2)

The units have integrated heat pump function for both heating and cooling. In hot climates only the cooling mode can be selected. The Explosion Proof Air conditioners and ATEX split units are equipped with European approved R-32 refrigerant, with **zero** Ozon depletion potential (ODP) and a low global warming potential (GWP) of just 675. The units can be delivered with R32 or R410A refrigerant.

Conversion to ATEX explosion proof is in line with Atexxo's philosophy of providing excellent explosion protection while maintaining all features of the original product. This makes the ATEX Air conditioners easy to install and operate.

The sets consist of ATEX approved outdoor-, EX rated indoor unit and explosion proof wireless remote controller.

Benefits:

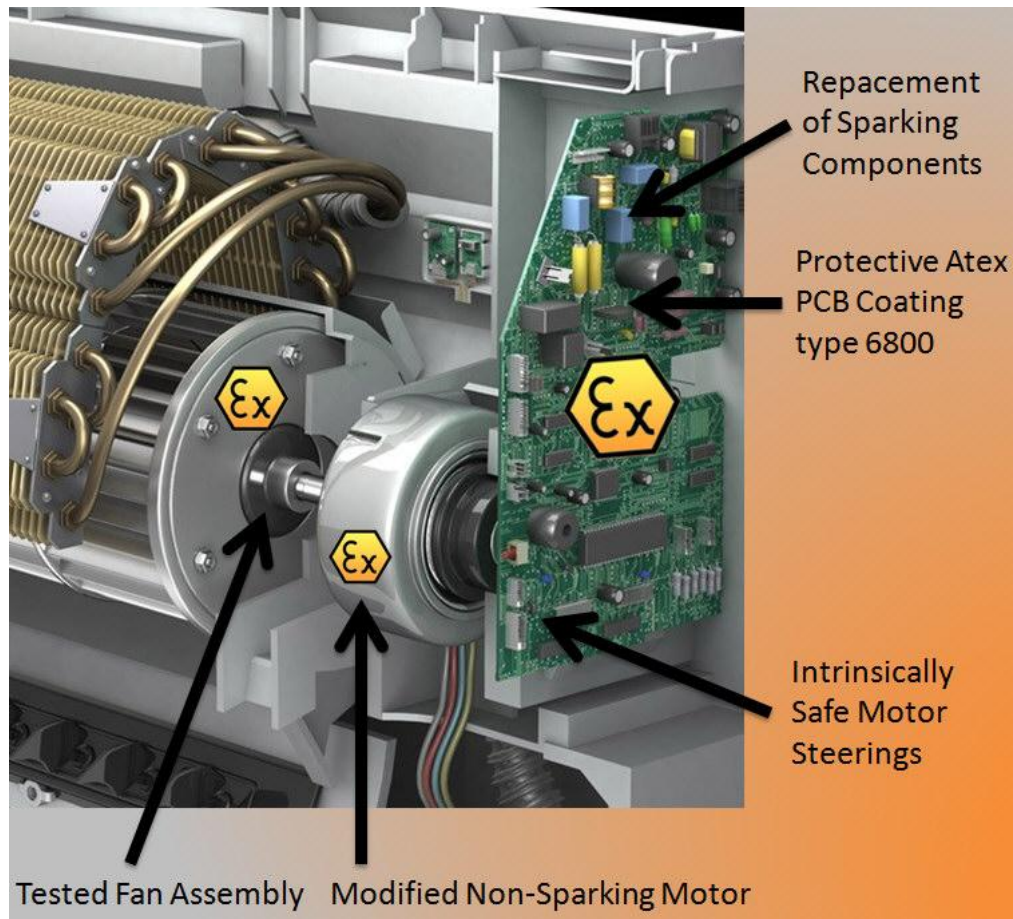
- 50/60Hz power rating
- **Online controller via app**
- Easy to install and operate
- ATEX Zone 2 Classified (Zone 22 on request)
- R32 or R410A refrigerant
- Standard "Blue Fin" anti-corrosion treatment

Applications:

- Technical Cooling / Heating
- Chemical plants and ships
- Offshore oil platforms
- Battery rooms
- Storage of hazardous goods
- Analyzer cabinets

Safe Operations in ATEX Hazardous Zone 2 Classified Areas

Using multiple explosion protective measures to ensure safe operations in hazardous environments. Conversion to ATEX explosion safe is in line with Atexxo's philosophy of providing excellent explosion protection while maintaining nearly all features of the original product. This makes the ATEX Air Conditioners easy to install and operate.



The above picture demonstrates some of the protective anti-explosion measures intergraded in Atexxo's indoor units. All modifications are according to safety standards, well documented and tested. Standard units are available from Daikin, other brands can be delivered on request.



Please contact us for other capacities and or configurations e.g. multi-split systems or chillers.

Technical information

Voltage:	200-240 Volt AC (wider input range on request)
Frequency :	50/60 Hz
Type Split Unit :	FTXM = wall indoor unit
Refrigerant:	R32 or R410A
ATEX: for IIA / IIB / IIC	Unit Assessment Certificate: ATEX Zone 2, II 3G; Ex ec h ic nC IIC T3 Gc (IECEx certification on request)

Table below; Ordering information Atexxo Explosion Proof Air Conditioners Split AC Units

ATEX Split Units Atexxo Manufacturing Order Number	ATEX Zone	Cooling Capacity	Heating Capacity	Refrigerant	Dimension indoor unit HxWxD (mm) Weight (kg)	Dimension outdoor unit HxWxD (mm) Weight (kg)
AIR-EX-FTXM-20	Zone 2	7.000 BTU / 0.6RT / 2.0kW	2.5 kW	R32	294x811x272, 10kg	550x765x285, 32 kg
AIR-EX-FTXM-25	Zone 2	9.000 BTU / 0.7RT / 2.5kW	2.8 kW	R32	294x811x272, 10kg	550x765x285, 32 kg
AIR-EX-FTXM-35	Zone 2	12.000 BTU / 1.0RT / 3.5kW	4.0 kW	R32	294x811x272, 10kg	550x765x285, 32 kg
AIR-EX-FTXM-42	Zone 2	15.000 BTU / 1.3RT / 4.2kW	5.4 kW	R32	294x811x272, 10kg	735x825x300, 47 kg
AIR-EX-FTXM-50	Zone 2	18.000 BTU / 1.5RT / 5.0kW	5.8 kW	R32	300x1040x295, 14kg	735x825x300, 47 kg
AIR-EX-FTXM-60	Zone 2	20.000 BTU / 1.7RT / 6.0kW	7.0 kW	R32	300x1040x295, 14kg	735x825x300, 47 kg
AIR-EX-FTXM-71	Zone 2	24.000 BTU / 2.0RT / 7.1kW	8.2 kW	R32	300x1040x295, 14kg	734x870x320, 56 kg
AIR-EX-FTXM-20-R410A	Zone 2	7.000 BTU / 0.6RT / 2.0kW	2.5 kW	R410A	294x811x272, 10kg	550x765x285, 32 kg
AIR-EX-FTXM-25-R410A	Zone 2	9.000 BTU / 0.7RT / 2.5kW	2.8 kW	R410A	294x811x272, 10kg	550x765x285, 32 kg
AIR-EX-FTXM-35-R410A	Zone 2	12.000 BTU / 1.0RT / 3.5kW	4.0 kW	R410A	294x811x272, 10kg	550x765x285, 32 kg
AIR-EX-FTXM-42-R410A	Zone 2	15.000 BTU / 1.3RT / 4.2kW	5.4 kW	R410A	294x811x272, 10kg	735x825x300, 47 kg
AIR-EX-FTXM-50-R410A	Zone 2	18.000 BTU / 1.5RT / 5.0kW	5.8 kW	R410A	300x1040x295, 14kg	735x825x300, 47 kg
AIR-EX-FTXM-60-R410A	Zone 2	20.000 BTU / 1.7RT / 6.0kW	7.0 kW	R410A	300x1040x295, 14kg	735x825x300, 47 kg
AIR-EX-FTXM-71-R410A	Zone 2	24.000 BTU / 2.0RT / 7.1kW	8.2 kW	R410A	300x1040x295, 14kg	734x870x320, 56 kg

Alle technischen Daten (Standard, Normal, Schaltgetriebe, 3500 kg)

Fahrzeuglänge	5.932 mm	5.932 mm	5.932 mm
Fahrzeughöhe	2.331 mm	2.331 mm	2.331 mm
Fahrzeugbreite	2.345 mm	2.345 mm	2.345 mm
Radstand	3.665 mm	3.665 mm	3.665 mm
Laderaumabmessungen			
Max. Laderaumlänge	3.375 mm	3.375 mm	3.375 mm
Laderaumhöhe	1.719 mm	1.719 mm	1.719 mm
Laderaubbreite max.	1.787 mm	1.787 mm	1.787 mm
Laderaubbreite min.	1.350 mm	1.350 mm	1.350 mm
Laderaumvolumen	9.000 l	9.000 l	9.000 l
Gewichte			
Leergewicht	2.143 kg	2.164 kg	2.164 kg
Zulässige Nutzlast	1.357 kg	1.336 kg	1.336 kg
Zulässiges Gesamtgewicht	3.500 kg	3.500 kg	3.500 kg
Lastzugsgesamtgewicht	5.500 kg	5.500 kg	5.500 kg
Aufbau			
Anzahl Türen	4	4	4
Anzahl der installierten Sitze	3	3	3
CO2 emission (combined operation)			
Verbrauch & Emissionen	8,1 l/100km	8 l/100km	8 l/100km
CO₂-Emissionen kombiniert	212 g/km	211 g/km	212 g/km
Abgasnorm	Euro 6e bis N1	Euro 6e bis N1	Euro 6e bis N1
Kraftstoffart	Diesel	Diesel	Diesel
Getriebe	6-Gang-Schaltgetriebe ECO	6-Gang-Schaltgetriebe ECO	6-Gang-Schaltgetriebe ECO

Gewichte

Zul. Gesamtgewicht	3.500 kg
Leergewicht mit Fahrer	2.276,59 kg
Tatsächliches Gewicht auf Vorderachse	1.304,10 kg
Tatsächliches Gewicht auf Hinterachse	897,50 kg
Zul. Gesamtzuggewicht	7.000 kg
Zul. Achslast vorn / hinten	1.800 kg / 2.250 kg
Zul. Anhängelast gebremst bei 12% / 8%	3.500 kg
Zul. Anhängelast ungebremst	750 kg
Stützlast	140 kg
Dachlast	300 kg

Außenabmessungen

Länge min. / Länge max.	5.986 mm / 5.986 mm
Breite min. / Breite max.	2.040 mm / 2.040 mm
Höhe max.	2.355 mm
Radstand	3.640 mm
Spurweite vorn min. / vorn max.	1.770 mm / 1.770 mm
Spurweite hinten min. / hinten max.	1.766 mm / 1.766 mm

Innenraumabmessungen

Kopfraum 1. Sitzreihe	1.203 mm
-----------------------	----------

Gepäckraum

Breite zwischen den Radkästen	Singlebereifung: 1.380,0 mm, Super-Singlebereifung: 1.283,0 mm, Zwillingsbereifung: 1.030,0 mm
Offener Gepäckraum - hinter der 1. SR	I

A.20 Schriftverkehr

Am 06.08.2026 schrieb Herr Kruse:

Eine Aussage über die Infrastruktur ist aktuell nicht ganz so einfach, da der Teststand in Trauen in naher Zukunft renoviert und umfangreich umgebaut wird. Ich versuche dennoch die Fragen so gut es geht zu beantworten.

- Der Untergrund am Prüfstand ist Beton. Aktuell hat der so einige Löcher und Risse. Dies wird aber mit Sicherheit nach der Renovierung nicht mehr der Fall sein, so dass dann eine große Ebene Fläche vorhanden ist.
- Bisher gab es in der Teströhre 230V Schuko und in einem Raum hinter der Teströhre 400V 16A Drehstrom. Um den Drehstrom sinnvoll nutzen zu könne, wurden bisher ca. 15m Kabel benötigt. Die Situation der Stromversorgung wird sich mit der Renovierung aber sicherlich verbessern.
- Es gibt einen großen Wasseranschluss für ein B-Schlauch. Dieser ist hauptsächlich für Brandbekämpfung gedacht. Kontaminiertes Spül- und Restwasser gab es AQUASONIC nicht, sodass alles Wasser in der Natur versickern konnte. Auf der linken Seite des Prüfstandgeländes , dort wo der Teststand hinkommt, sind mir keine geeigneten Abflüsse und Auffangwannen bekannt. Auf der rechten Seite, wo der fest installierte Prüfstand des DLR ist, ist die entsprechende Infrastruktur vorhanden. Ob sich hier mit der Renovierung etwas ändert, weiß ich aktuell nicht.
- Stickstoff ist nur auf der DLR Seite vorhanden. Für unseren Prüfstand muss dieser mitgebracht werden. Druckluft ist auch nicht vorhanden. Diese wird aber meistens eh aus dem Stickstoff runter geregelt.
- Die Meiste Zeit beim Aufbau des AQUASONIC Prüfstandes wird für das finden und beheben von Undichtigkeiten, da durch den Transport das System meist undicht wird. Dieses Problem ist bei einem Prüfstand im Container nicht ganz so groß sein. Der Aufbau der Computer im Bunker und das Verlegen der Kabel sind auch recht zeitaufwendig.
- Da der AQUASONIC Prüfstand nicht in einem Container ist und jedes Mal vollständig vor Ort aufgebaut werden muss behebt die Container Lösung bereits das größte Problem.

Am 17.08.2026 schrieb Herr Kruse:

- Auf der linken Teststand Seite ist nur der B-Anschluss. Auf der rechten Seite gibt es sicherlich noch mehr. Da kenne ich aber noch nichts Genaues.
- Ich hatte gerade kurz mit dem Prüfstandsleiter vom DLR telefoniert, er meinte, dass unser Prüfstand mit H2O2 tatsächlich auf die rechte Seite soll. Da dies die H2O2 Prüfstands Seite ist. Links ist für Hybridtriebwerke. Der Abstand vom Bunker zur Teströhre ist ca. 10 m.