

**Entwicklung und Validierung von  
1-D Modellen der LOX und LNG  
Versorgungssysteme eines  
Raketentriebwerkprüfstandes  
mittels Ecosim Pro / ESPSS**

**Development and Validation of  
1-D Models for the LOX and LNG  
Feedline Systems of a Rocket  
Engine Test Facility via Ecosim  
Pro / ESPSS**

Masterarbeit von  
cand. aer. Jonas Leitner  
IRS-21-S-111

Betreuer:  
Sebastian Klein / DLR  
Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,  
Institut für Raumfahrtantriebe**

**Institut für Raumfahrtsysteme,  
Universität Stuttgart**

April 2022



### Aufgabenstellung Masterarbeit

für Herrn Jonas Leitner

#### Entwicklung und Validierung von 1-D Modellen der LOX und LNG Versorgungssysteme eines Raketentriebwerkprüfstandes mittels Ecosim Pro / ESPSS

#### Development and Validation of 1-D Models for the LOX and LNG Feedline Systems of a Rocket Engine Test Facility via Ecosim Pro / ESPSS

##### Motivation:

Bei der Entwicklung von Raketentriebwerken ist der Betrieb von Forschungsprüfständen wie dem P8 am DLR Lampoldshausen unerlässlich. In der Testzelle 3 des P8 können Raketentriebwerke der 25kN Schubklasse, wie der Demonstrator LUMEN, getestet werden. Da der Betrieb des Prüfstandes sehr kostenintensiv und aufwändig ist, ist es sinnvoll Testkampagnen mit Hilfe von Simulationen zu unterstützen. Diese Simulationen sollen helfen das Verhalten des Prüfstandes vorherzusagen, um so das Auslösen von Redlines zu verhindern.

Das übergeordnete Ziel ist es die einzelnen Fahrleitungen des Prüfstandes gekoppelt mit dem Modell des Triebwerks zu simulieren. Dies soll eine präzise Vorhersage der Testläufe ermöglichen. Vor allem bei der Erstellung der Triebwerksregelung sind Simulationen ein wichtiges Werkzeug.

Als vorbereitende Arbeit sollen Modelle der Fahrleitungen (LOX, LNG) in Ecosim Pro simuliert und anschließend mit experimentellen Daten validiert werden, sofern diese vorhanden sind.

##### Aufgabenstellung:

- Literaturrecherche über die 1D Simulation von Fluidsystem mit besonderem Bezug auf die Anwendungsfälle Raumfahrt, Prüfstände und Kryotechnik
- Erlernen der Simulationssoftware Ecosim Pro mit ESPSS
- Modellierung der LOX und LNG Versorgungssysteme des Raketentriebwerkprüfstandes P8.3
- Validierung der Modelle mittels experimenteller Daten, sofern diese vorhanden sind
- Anfertigen einer Masterarbeit über die oben genannten Arbeiten
- Präsentation über die oben genannten Arbeiten

Betreuer/-in intern: Sebastian Klein

Bearbeitungsbeginn: 01.10.2021

Einzureichen spätestens: 01.04.2022

Prof. Dr. S. Schlechtriem  
(Verantwortlicher Hochschullehrer)

##### **Empfangsbestätigung:**

Ich bestätige hiermit, dass ich die Aufgabenstellung sowie die rechtlichen Bestimmungen und die Studien- und Prüfungsordnung gelesen und verstanden habe.

Unterschrift des/der Studierenden

**Rechtliche Bestimmungen:** Der/die Bearbeiter/in ist grundsätzlich nicht berechtigt, irgendwelche Arbeits- und Forschungsergebnisse, von denen er/sie bei der Bearbeitung Kenntnis erhält, ohne Genehmigung des/der Betreuers/in dritten Personen zugänglich zu machen. Bezüglich erreichter Forschungsleistungen gilt das Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (Bundesgesetzblatt I/ S. 1273, Urheberschutzgesetz vom 09.09.1965). Der/die Bearbeiter/in hat das Recht, seine/ihre Erkenntnisse zu veröffentlichen, soweit keine Erkenntnisse und Leistungen der betreuenden Institute und Unternehmen eingeflossen sind. Die von der Studienrichtung erlassenen Richtlinien zur Anfertigung der Bachelorarbeit sowie die Prüfungsordnung sind zu beachten.

**Professoren und Privatdozenten des IRS:**

Prof. Dr.-Ing. Stefan Fasoulas (Geschäftsführender Direktor) · Prof. Dr.-Ing. Sabine Klinkner (Stellvertretende Direktorin) ·

Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · (Stellvertretender Direktor) · Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · Prof. Dr. rer. nat. Reinhold Ewald ·

PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig · Hon. Prof. Dr. rer. nat. Christoph Nöldeke · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem ·

PD Dr.-Ing. Ralf Srama

## Erklärungen

Hiermit versichere ich, **Leitner, Jonas**, dass ich diese **Masterarbeit** selbstständig mit Unterstützung des Betreuers / der Betreuer angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die Arbeit oder wesentliche Bestandteile davon sind weder an dieser noch an einer anderen Bildungseinrichtung bereits zur Erlangung eines Abschlusses eingereicht worden.

Ich erkläre weiterhin, bei der Erstellung der Arbeit die einschlägigen Bestimmungen zum Urheberrecht fremder Beiträge entsprechend den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis<sup>1</sup> eingehalten zu haben. Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z.B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen etc.) enthält, habe ich diese Beiträge als solche gekennzeichnet (Zitat, Quellenangabe) und eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt. Mir ist bekannt, dass ich im Falle einer schuldhaften Verletzung dieser Pflichten die daraus entstehenden Konsequenzen zu tragen habe.

.....Lampoldshausen, 28.04.2022, Jonas Leitner

Ort, Datum, Unterschrift

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine **Masterarbeit** zum Thema:

Entwicklung und Validierung von 1-D Modellen der LOX und LNG Versorgungssysteme eines Raketentriebwerkprüfstandes mittels Ecosim Pro / ESPSS

in der Institutsbibliothek des Instituts für Raumfahrtssysteme ohne Sperrfrist öffentlich zugänglich aufbewahrt und die Arbeit auf der Institutswebseite sowie im Online-Katalog der Universitätsbibliothek erfasst wird. Letzteres bedeutet eine dauerhafte, weltweite Sichtbarkeit der bibliographischen Daten der Arbeit (Titel, Autor, Erscheinungsjahr, etc.).

Nach Abschluss der Arbeit werde ich zu diesem Zweck meinem Betreuer neben dem Prüfaxemplar eine weitere gedruckte sowie eine digitale Fassung übergeben.

Der Universität Stuttgart übertrage ich das Eigentum an diesen zusätzlichen Fassungen und räume dem Institut für Raumfahrtssysteme an dieser Arbeit und an den im Rahmen dieser Arbeit von mir erzeugten Arbeitsergebnissen ein kostenloses, zeitlich und örtlich unbeschränktes, einfaches Nutzungsrecht für Zwecke der Forschung und der Lehre ein. Falls in Zusammenhang mit der Arbeit Nutzungsrechtsvereinbarungen des Instituts mit Dritten bestehen, gelten diese Vereinbarungen auch für die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Arbeitsergebnisse.

.....Lampoldshausen, 28.04.2022, Jonas Leitner

Ort, Datum, Unterschrift

---

<sup>1</sup> Nachzulesen in den DFG-Empfehlungen zur „Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ bzw. in der Satzung der Universität Stuttgart zur „Sicherung der Integrität wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit Fehlverhalten in der Wissenschaft“

# Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Treibstoffleitungen vom LOX- und LNG-System des Prüfstands P8.3, am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Lampoldshausen, mit der Software EcosimPro in Verbindung mit der Bibliothek ESPSS modelliert. Der Prüfstand wird auf die relevanten Bestandteile vereinfacht und der Aufbau dargestellt. Die Testabläufe, die für die Validierung nötig sind, werden vorgestellt. Anschließend wird die Erstellung des Modells behandelt und die wichtigsten Vorgehensweisen erläutert. Mit Fertigstellen des Modells wird die Validierung anhand eines Vergleichs der Simulationsergebnisse mit den Sensordaten der Testläufe durchgeführt.

Als Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich folgende Aussagen festhalten: Die Modelle geben die realen Druckverläufe während des Betriebs mit dem Run Tank nahezu exakt wieder. Die Druckverläufe während der Konditionierung, können aufgrund einer hoch transienten zweiphasigen Strömung nicht exakt wiedergegeben werden, können jedoch erste Anhaltspunkte für eine Vorhersage des Drucks liefern.

Die Verläufe des Massenstroms während einer Speisung durch den Run Tank können, mit Abweichungen, vom Modell wiedergegeben werden. Das LOX-Modell weist einen leicht zu hohen Massenstrom auf, während der Massenstrom im LNG-Modell zu niedrig ist. Die Form und der Verlauf stimmen jedoch sehr gut überein.

Die Temperaturverläufe von Modell und Sensordaten unterscheiden sich in den relevanten Bereichen um weniger als  $\Delta T_{abs} = 2,7 \text{ K}$ .

Während der Konditionierung kann das Modell die realen Temperaturverläufe und die Verläufe des Massenstroms nicht korrekt wiedergeben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>iv</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>vi</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Technischer Hintergrund - Prüfstände</b>	<b>4</b>
2.1. Triebwerksprüfstände . . . . .	4
2.2. P8 . . . . .	6
2.2.1. P8.3 und LUMEN . . . . .	7
<b>3. Modellbildung</b>	<b>11</b>
3.1. EcosimPro . . . . .	11
3.1.1. Modellierungssprache und Schlüsselkonzepte . . . . .	11
3.1.2. Mathematisches Modell . . . . .	13
3.2. ESPSS - Bibliotheken . . . . .	14
3.2.1. FLUID PROPERTIES . . . . .	15
3.2.2. FLUID FLOW 1D . . . . .	15
3.2.3. TANKS . . . . .	24
3.2.4. Nicht ESPSS-Komponenten . . . . .	26
<b>4. Prüfstandaufbau und Testablauf</b>	<b>28</b>
4.1. Normierung . . . . .	28
4.2. Aufbau: LOX-System . . . . .	29
4.3. Aufbau: LNG-System . . . . .	32
4.4. Testablauf: LOX-System . . . . .	36
4.5. Testablauf: LNG-System . . . . .	38

<b>5. EcosimPro-Modell</b>	<b>40</b>
5.1. Modellübersicht LOX . . . . .	40
5.1.1. Hauptleitung . . . . .	41
5.1.2. Entlastungsleitung . . . . .	44
5.2. Modellübersicht LNG . . . . .	45
5.2.1. Hauptleitung . . . . .	46
5.2.2. Entlastungsleitung . . . . .	48
5.3. Wärmeübergang der Rohrleitungen . . . . .	49
5.3.1. Wärmeübergang mit der Umgebung . . . . .	49
5.4. Initialbedingungen . . . . .	53
5.5. Randbedingungen . . . . .	54
5.5.1. LOX-Becken und LNG-Fackel . . . . .	54
5.5.2. Bedruckungssystem . . . . .	54
5.5.3. Lagertank . . . . .	56
<b>6. Validierung</b>	<b>57</b>
6.1. LOX . . . . .	57
6.1.1. Druck . . . . .	57
6.1.2. Massenstrom . . . . .	61
6.1.3. Temperatur . . . . .	62
6.2. LNG . . . . .	65
6.2.1. Druck . . . . .	65
6.2.2. Massenstrom . . . . .	68
6.2.3. Temperatur . . . . .	69
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>72</b>
7.1. Zusammenfassung . . . . .	72
7.2. Ausblick - zukünftige Arbeiten . . . . .	73
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>74</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>i</b>
A.1. Gesamte Ecosim/ESPSS Modelle . . . . .	i
A.2. Parameter der Automatikventile . . . . .	iii
A.3. Wärmeübertragungskoeffizienten . . . . .	iv

# Nomenklatur

## Akronyme

Akronym	Benennung
1-D	eindimensional
ALM	Additive Fertigung („Additive Layer Manufacturing“)
AV	Automatikventil
CNES	französische Raumfahrtbehörde, Centre National d'Études Spatiales
DAE	differenzial-algebraische Gleichungen
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EL	EcosimPro Simulation Language
ESPSS	European Space Propulsion System Simulation
GH <sub>2</sub>	gasförmiger Wasserstoff
GHe	gasförmiges Helium
HV	Handventil
KV	Kontrollventil
LH <sub>2</sub>	flüssiger Wasserstoff
LNG	flüssiges Erdgas, englisch Liquefied Natural Gas
LOX	flüssiger Sauerstoff, englisch Liquid OXygen
LUMEN	liquid- Upperstage-DeMonstrator-ENgine
MTA	Maximum Transversal Algorithmus
MTB	Modular Turbopump Test Bench
NASA	National Aeronautics and Space Administration

## Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$D$	Durchmesser	$\text{m}$
$G$	flächenspezifischer Massenstrom	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$
$L$	Länge	$\text{m}$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$\text{J}/\text{s}$
$T$	Temperatur	$\text{K}$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/\text{kgK}$
$d$	Durchmesser	$\text{m}$
$f$	Frequenz	$\text{Hz}$
$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m}/\text{s}^2$
$h$	Enthalpie	$\text{J}/\text{kg}$
$h$	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
$l$	Länge	$\text{m}$
$m$	Masse	$\text{kg}$
$\dot{m}$	Massenstrom	$\text{kg}/\text{s}$
$p$	Druck	$\text{Pa}$
$r$	Radius	$\text{m}$
$t$	Zeit	$\text{s}$
$u$	Innere Energie	$\text{J}/\text{kg}$
$v$	Strömungsgeschwindigkeit	$\text{m}/\text{s}$
$x$	Massenanteil	-

## Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
$\Delta$	Differenz	-
$\varepsilon$	Emissionsgrad	-
$\zeta$	Druckverlustbeiwert	-
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/\text{m K}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\tau$	Zeitkonstante	s

# 1. Einleitung

Raketentriebwerke sind während ihrem Einsatz extremen thermischen und strukturellen Lasten ausgesetzt. 50% der fehlgeschlagenen Starts sind auf das Antriebssystem zurückzuführen [1]. Dazu tragen vor allem Phänomene wie hochfrequente Verbrennungsinstabilitäten bei, welche, aufgrund der hochkomplexen und nichtlinearen Natur von turbulenten Verbrennungsprozessen, schwer zu verstehen und vorherzusagen sind. Größte und zuverlässigste Quelle für die Verbesserung des Verbrennungsverhaltens sind experimentelle Daten von Testläufen mit maßstabstreuen Triebwerken. Mit diesen Problemen wurden auch die Entwickler des F-1 Triebwerks der Saturn V konfrontiert. Sie versuchten die auftretenden Verbrennungsinstabilitäten mittels, in die Brennkammer eingefügter, Baffles zu unterdrücken. Um die best mögliche Lösung zu finden, waren über 2000 Testläufe, mit den verschiedensten Bafflekonfigurationen, nötig. [2]

Ein Testlauf der ersten Stufe der Saturn V mit fünf F-1 Triebwerken ist in Abbildung 1.1 gezeigt. Der Prüfstand befindet sich am John C. Stennis Space Center in Mississippi in den USA und diente zum Testen der Raketenantriebssysteme für das Apollo-Programm.



Abbildung 1.1.: Prüfstand am John C. Stennis Space Center [3]

Die vom Triebwerksstart ausgelöste Druckwelle brachte sogar Scheiben in 30 *km* Entfernung zum Zerbersten. Dies verdeutlicht die extrem hohen Kräfte, die während eines

Testlaufs freigesetzt werden können und unterstreicht die Gefahr, die von unvorhergesehenen Testverläufen ausgehen kann.

Bis heute sind Testläufe an Prüfständen ein wichtiger Bestandteil des Entwicklungsprozesses eines jeden Triebwerks. Damit die Prüfstände wirtschaftlich, aber vor allem auch sicher für das Personal, die Infrastruktur und die Umgebung, betrieben werden können, ist das Prüfen der geplanten Testläufe mit Modellen des Prüfstands und des Triebwerks sinnvoll. So können die Betriebsbedingungen vorab, anhand unterschiedlicher Eingangsparameter, virtuell getestet und das Abbrechen, oder gar Fehlschlagen, eines Testlaufs vermieden werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Modellen der Treibstoffleitungen am Prüfstand P8.3 des DLR Lampoldshausen. Diese umfassen ein Modell des flüssigen Sauerstoff-Systems (englisch Liquid OXYgen, kurz LOX) und ein Modell des flüssigen Erdgas-Systems (englisch Liquefied Natural Gas, kurz LNG). Diese wiederum beinhalten jeweils die Modellierung des Run Tanks mit dem nötigen Leitungssystem bis zur Schnittstelle mit dem Prüfling. Ein Leitungssystem für die Konditionierung des Prüfstands, sowie eine Ableitung zum LOX-Becken oder der LNG-Fackel werden ebenfalls modelliert.

Das Modell soll zur Vorhersage wichtiger Betriebsgrößen, wie Druck, Massenstrom und Temperatur dienen, um so einen sicheren Prüfstandbetrieb zu ermöglichen. Anschließend wird eine Validierung anhand experimenteller Daten vorgenommen. Dies bedeutet ein Vergleichen der Simulationsergebnisse des Modells mit Sensordaten vom Prüfstand P8.3. Die verfügbaren Daten beschränken sich auf die Abnahmetests, in denen kein Triebwerk an der Prüflingsschnittstelle angeschlossen war.

Das System soll als Ganzes modelliert werden, um eine Systemanalyse zu ermöglichen. Dafür ist eine dreidimensionale Simulation, die auch die strömungsmechanischen Details beachtet, nicht zielführend, weshalb ein eindimensionaler Ansatz gewählt wird. Dieser wird mit der Software EcosimPro verfolgt, welche in Verbindung mit der Bibliothek „European Space Propulsion System Simulation“ (ESPSS) verwendet wird.

Auf die Einleitung folgend wird im zweiten Kapitel die Relevanz und Notwendigkeit von Prüfständen für den Entwicklungsprozess eines Raketentriebwerks behandelt. Es werden die unterschiedlichen Arten von Tests beschrieben und auf die Arbeiten am P8 am DLR Lampoldshausen eingegangen. Zum Abschluss des Kapitels wird ein Überblick über das LUMEN Projekt gegeben.

Im dritten Kapitel wird die Modellbildung beschrieben. Diese umfasst eine Erklärung der Funktionsweise von EcosimPro, samt Modellierungssprache und verwendeter Schlüssel-

konzepte. Es wird die Bibliothek ESPSS mit ihren Unterbibliotheken vorgestellt und die, für die Arbeit nötigen, Komponenten beschrieben.

In Kapitel vier wird zuerst die, für die Veröffentlichung der Daten notwendige, Normierung behandelt. Anschließend wird der Aufbau der Treibstoffleitungen am P8.3 gezeigt und die Testsequenz der verwendeten Testläufe beschrieben.

Das Ergebnis der Modellierung wird in Kapitel fünf beschrieben. Dies beinhaltet eine Modellübersicht über das LOX- und das LNG-System, mit verwendeten Komponenten und Parametern. Anschließend wird die Modellierung des Wärmeübergangs behandelt und die Initial- und Randbedingungen beschrieben.

In Kapitel sechs findet die Validierung statt. Es werden die Verläufe der Simulationsergebnisse des Modells mit den Sensordaten verglichen. Ein Vergleich wird für die Druckverläufe, Massenstromdaten und Temperaturwerte durchgeführt.

Im siebten Kapitel werden abschließend die Inhalte der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

## 2. Technischer Hintergrund - Prüfstände

In diesem Kapitel soll dem Leser ein genaueres Verständnis der Prüfstände, die in der Forschung und Entwicklung verwendet werden, vermittelt werden. Dazu wird zuerst auf die Notwendigkeit von Prüfständen eingegangen, sowie eine Einordnung der wichtigsten Testläufe während des Entwicklungsprozesses eines Raketentriebwerkes vorgenommen. Abschließend wird auf die Arbeit am DLR Lampoldshausen eingegangen, insbesondere auf den Prüfstand P8 und den dort verwendeten Testträger mit dem Namen Liquid-Upper-Stage-Demonstrator-Engine (kurz und im Folgenden LUMEN genannt).

### 2.1. Triebwerksprüfstände

Prüfstände aller Art werden dazu genutzt, die Bedingungen und die Umgebung des Triebwerks während Start und Flug möglichst realistisch zu simulieren. Dazu gehören Bodenprüfstände (wie der Prüfstand P5 am DLR Lampoldshausen), welche das Nachstellen des Starts ermöglichen, oder auch Höhenprüfstände (wie der Prüfstand P4), die eine Evakuierung auf wenige Millibar ermöglichen können, um die Flugbedingungen zu einem späteren Zeitpunkt der Mission, außerhalb der Erdatmosphäre, zu simulieren [4].

Um ein flugfähiges Triebwerk zu erhalten sind meist hunderte bis tausende Testläufe nötig. Beim Space Shuttle nahmen die Entwicklungs- und Qualifikationstest insgesamt 6 Jahre in Anspruch und bis zum Ende der Einsatzzeit wurden 2746 Test durchgeführt [1]. Dies liegt daran, dass Raketentriebwerke sehr hohen Belastungen ausgesetzt sind. Deshalb ist für Abweichungen vom nominellen Betrieb nur wenig Spielraum vorhanden. Die Tendenz zeigt, dass die Zuverlässigkeit eines Triebwerks stark mit der Anzahl der durchgeführten Testläufe korreliert. Je mehr Testläufe, desto höher ist die Zuverlässigkeit des Triebwerks [5]. Die Antriebe bestehen aus vielen verschiedenen Komponenten die zu Systemen und Untersystemen verbunden werden, z.B. Verbrennung und Einspritzung, Treibstoffförderung, Kühlung und Regelung.

Das Zusammenspiel dieser einzelnen Systeme und Untersysteme ist sehr schwer vorherzusagen und kann erst am Prüfstand getestet werden. Das Anfahren und Abschalten des Triebwerks sind Vorgänge, in denen das dynamische Verhalten der Systeme besonders zum Tragen kommt und welche nur durch eine ausreichende Menge an Tests erfolgreich kontrolliert werden können [1]. Der Prüfstand wird als Untersystem des Triebwerks gesehen und ersetzt die Umgebung des Trägersystems für das Triebwerk. Demnach muss er das Triebwerk mit Treibstoff und sekundären Fluiden, für z.B. das Spülen der Treibstoffleitungen, versorgen, es kontrollieren, regulieren und überwachen, sowie möglichst die Start- oder Flugbedingungen der Rakete nachbilden.

Ebenso muss die Prüfstandinfrastruktur mit einem Betrieb des Triebwerks zurechtkommen. Dies ist vorwiegend der heiße Abgasstrahl, aber auch eine Abführung der Massenströme der Treibstoffe muss ermöglicht werden. Die Prüfstände sind meist auf das Testen mit einem bestimmten Triebwerk zugeschnitten und werden für dieses neu geplant und entwickelt [1].

Der Entwicklungsprozess eines Trägersystems nimmt mehrere Jahre in Anspruch. Die Entwicklung des Space Transportation System „Space Shuttle“ der NASA begann 1972, der Erststart war 1981. Entwicklungsbeginn der Ariane 5 war 1988 und 1996 fand der erste Start statt [6]. Ein großer Anteil im Entwicklungsprozess sind die Analyse des Testbedarfs, die Planung der Prüfstände und Durchführung der Tests. Hierbei gibt es unterschiedliche Arten von Tests. Am Anfang des Prozesses werden Entwicklungstests durchgeführt. Begonnen wird dabei auf Komponentenebene (z.B. Injektor, oder Inducer der Turbopumpen). Anschließend finden Tests von Untersystemen (z.B. Brennkammer, Turbopumpen) statt. Danach wird das Triebwerk als Ganzes getestet. Abschließend werden Tests auf Stufenebene durchgeführt, welche das Triebwerk, die Treibstoffversorgung mit Tanks und die Elektronik beinhalten. Die Entwicklungstests sollen Fehler bei der Auslegung des Triebwerks aufdecken, die Überprüfung des Triebwerksdesigns ermöglichen, ein Kennenlernen der Funktionsweise des Triebwerks in allen Betriebsphasen erzielen und Abweichungen von den zuvor festgelegten Anforderungen identifizieren. Sie bilden die Basis für Strukturoptimierungen in dieser Phase [7]. Am Ende der Entwicklungstests ist das Triebwerksdesign unabänderlich festgelegt und die Qualifizierung beginnt. Die Qualifikationstests dienen dazu das endgültige Triebwerk zu testen und nachzuweisen, dass alle vorgeschriebenen Anforderungen erfüllt sind. Dazu gehören ein Leistungsnachweis, sowie Tests der Lebensdauer und Zuverlässigkeit. Dabei werden die Fragen, „Wie viele Betriebszyklen dauert es, bis erste Schäden am Triebwerk entstehen?“ und „Welche Alterungsprozesse finden statt und inwiefern beeinflussen diese die Leistung des Triebwerks?“, beantwortet [1]. Vor dem

Start einer Rakete finden Flugabnahmetest statt, die spezifische Funktionen überprüfen sollen und es ermöglichen das Triebwerk dann zum Flug freizugeben. Auch während der Betriebsphase eines Triebwerks finden noch Testläufe statt. Sie sollen, vor allem für Serienmodelle und wiederverwendbare Triebwerke, eine Erhöhung der Lebensdauer und des Leistungsspektrums erreichen, sowie helfen technische Fehler zu finden und somit Schäden zu vermeiden [7].

Eine weitere Testart, welche nicht direkt in die Auslegung eines Triebwerks, aber in den Entwicklungsprozess passt, ist die Erforschung neuer Technologien. Werden neue Technologien entdeckt, wie z.B. neue Werkstoffe, Fertigungsprozesse oder die Optimierung bereits vorhandener Komponenten, müssen diese erst getestet werden und einen ausreichenden Reifegrad erreichen, damit sie bei zukünftigen Triebwerksauslegungen berücksichtigt werden können. In den folgenden Abschnitten soll der Forschungsprüfstand P8 vorgestellt und das LUMEN-Projekt, welches im Zusammenhang mit dieser Arbeit steht, genauer erläutert werden.

## 2.2. P8

Der Forschungs- und Technologieprüfstand P8 des DLR Lampoldshausen wurde 1995 als Gemeinschaftsprojekt des DLR, der französischen Raumfahrtbehörde Centre national d'études spatiales (CNES), AIRBUS SPACE AND DEFENCE und Safran Aircraft Engines (bis 2015: SNECMA) ins Leben gerufen. Der Prüfstand soll dazu genutzt werden an der Verbrennung mit Hochdrucksystemen von Wasserstoff und Sauerstoff zu forschen. Es sollen bis zu 100 Versuchstage im Jahr mit 2 bis 4 Heißläufen pro Tag ermöglicht werden, sodass die Zeit zwischen den Testläufen nicht zu hoch ausfallen darf [8]. Deshalb wurde der Prüfstand P8 mit zwei identischen Testzellen ausgestattet, die sich ein gemeinsames Hochdruckversorgungssystem teilen. Dieses versorgt die Testzellen mit Flüssigwasserstoff (LH2) und -sauerstoff in einem weiten Temperaturspektrum (22 K bis 293 K), sowie mit den nötigen Hilfsmedien, wie gasförmiger und flüssiger Stickstoff, gasförmiges Helium und Kühlwasser. Seit der Inbetriebnahme wurden etwa 1400 Versuchstage durchgeführt und der dabei höchste Brennkammerdruck von 330 bar, konnte mit einer DLR Brennkammer erreicht werden. Der theoretisch maximal erreichbare Druck an der Prüflingsschnittstelle beträgt 360 bar [8].

Die Arbeiten am P8 beinhalten unter anderem die Begleitung der Entwicklung des Vinci-Triebwerks, aber auch Forschung an neuen Technologien für die Raumfahrt. Dazu gehört die additive Fertigung (ALM = Additive Layer Manufacturing), mit der der Gasgenera-

tor des PROMETHEUS Triebwerks gefertigt und am P8 getestet wurde. Mit mehr als 1300 Sekunden Testzeit, über zwei Testkampagnen verteilt, konnte die Leistung und das Verhalten des Gasgenerators im stationären Betrieb genau charakterisiert werden [9].

Forschung zur gestuften Verbrennung mit sowohl Wasserstoff als auch Methan wurde ebenfalls durchgeführt. Weiterhin wurden Versuche mit einem Laserzündsystem vorgenommen, welches mittels Laserpulsen ein Plasma erzeugt und so für die Zündung des Treibstoffs sorgt. Diese Systeme sollen für die Gewichtsreduktion von vor allem Oberstufen sorgen. [8][10]

Im Jahr 2013 wurde zusätzlich zur Versorgung mit Wasserstoff und Sauerstoff noch ein Erdgassystem hinzugefügt, welches den Prüfstand mit gasförmigem oder flüssigem Methan/Erdgas versorgt. Dies beinhaltet einen Lagertank und einen Run Tank (Tank der den späteren Tank im Trägersystem simuliert). Das LNG wird mit den bereits existierenden LH2 Leitungen zum Prüfstand geführt und mit dem GH2 System bedruckt [8].

### 2.2.1. P8.3 und LUMEN

Am 14. April 2021 wurde die Eröffnung einer dritten Testzelle P8.3 (siehe Abbildung 2.1) gefeiert. Diese soll es ermöglichen den Prüfstand P8 zu erweitern und nicht nur das Testen von Schubkammern, sondern auch Turbopumpentests und Testläufe pumpengeförderter Triebwerke ermöglichen. Die Erweiterung bietet dem DLR Lampoldshausen die Möglichkeit zukünftige Raumfahrtantriebe fast ausschließlich am eigenen Standort zu entwickeln. Die neue Testzelle wird Schlüsselement der Vorbereitung zukünftiger Trägersysteme. Sie soll zur Vorbereitung der neuen Generation wiederverwendbarer Flüssigkeitsrakentriebwerke dienen. [11]

Die Arbeiten am P8.3 decken das komplette Technology Readiness Level (TLR) Spektrum ab und reichen vom reinen Funktionsprinzip, über Testläufe für die Entwicklung, bis hin zur endgültigen Qualifikation. Die Testzelle P8.3 ermöglicht es, nicht nur einzelne Komponenten zu testen, sondern die Tests auf den Verbund aller Komponenten eines Triebwerks, mit Brennkammer, Turbopumpen und Tanks, zu erweitern [11]. Im Gegensatz zu den anderen beiden Testzellen am P8 ist die dritte Testzelle nicht mit einer Hochdruckversorgung, sondern mit einer Niederdruckversorgung ausgestattet. Dies erfordert den Einsatz einer Brennkammer in Kombination mit einem Turbopumpensystem, da sonst der notwendige Betriebsdruck für die Brennkammer nicht erreicht werden kann.

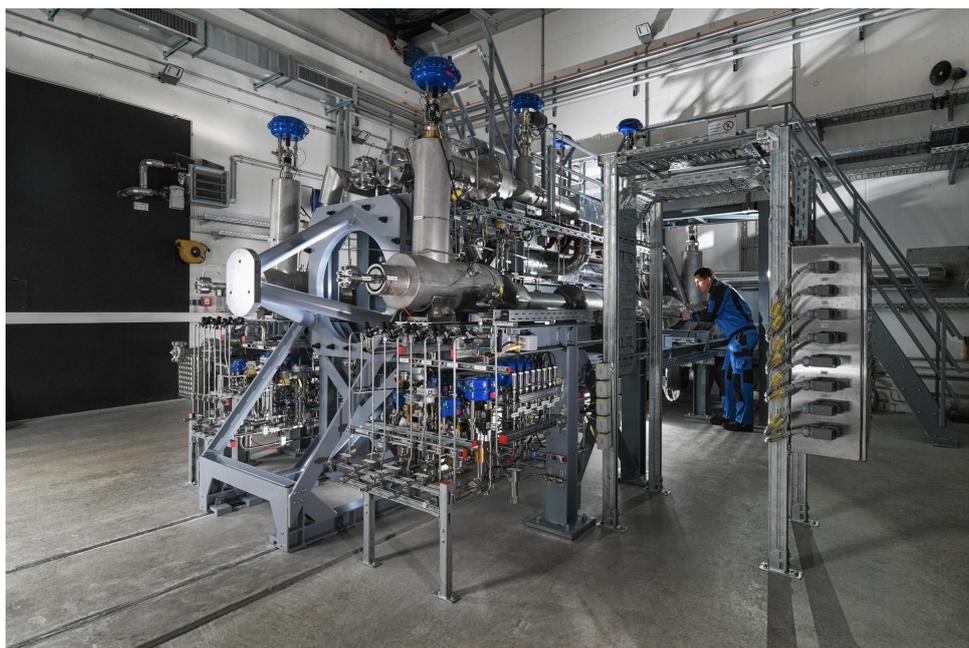
Die Erforschung eines solchen Komplettsystems wird mit dem Projekt LUMEN verfolgt (Schnittstelle zwischen dem Prüfstand P8.3 und dem LUMEN-Demonstrator siehe Abbildung 2.2). Das LUMEN-Projekt ist Bestandteil einer Kooperation der französischen



**Abbildung 2.1.:** Neue Testzelle P8.3 am Prüfstand P8 des DLR Lampoldshausen [11]

Raumfahrtbehörde CNES und dem DLR, welche ihren anfänglichen Fokus auf die Injektion und den Wärmetransfer der Verbrennung mit Methan legt und deren Ziel die Verbesserung der transienten Simulation der Triebwerke und Prüfstände ist [12]. Der Ablauf der Kooperation wurde in 4 Schritte aufgeteilt, die simultan auf beiden Partnerseiten ausgeführt werden. CNES verwendet die Software CARINS, das DLR hingegen nutzt die Software EcosimPro/ESPSS für die Modellierungen. Zunächst werden die beiden Programme auf Komponentenebene auf ihre Eignung verglichen, um festzustellen ob die Programme einen ähnlichen Funktionsumfang beinhalten. Dies soll eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichern. Im zweiten Schritt werden die existierenden Prüfstände am DLR Lampoldshausen modelliert, worunter auch die Modellierung des P8.3, welche diese Arbeit behandelt, fällt. In einem dritten Schritt sollen alle Triebwerke, die Bestandteil der Kooperation sind, LUMEN — ein Demonstratortriebwerk des DLR, BOREAS — ein Demonstratortriebwerk des CNES und PROMETHEUS — ein Projekt des CNES, ARIANE GROUP und der ESA, das als wiederverwendbares Triebwerk die langfristige Wettbewerbsfähigkeit europäischer Trägerraketen sichern soll [9], modelliert werden. Im letzten Schritt findet eine Kopplung der Modelle der Triebwerke und Prüfstände statt. [12]

Wie bereits erwähnt ist Gegenstand dieser Arbeit die Modellierung des Prüfstands P8.3 an dem der LUMEN Demonstrator getestet werden wird. Dieses Triebwerk ist für den Gebrauch ausschließlich in einer Prüfstandumgebung gedacht, weshalb der Begriff „Demonstratortriebwerk“ verwendet wird. Die Tanks am P8.3 können durch ihr Fassungsvermögen längere Testdauern mit Triebwerken höherer Schubklassen nicht unterstützen, weshalb ein



**Abbildung 2.2.:** Prüfstandsinfrastruktur am P8.3 mit Schnittstelle für den Prüfling [11]

kleinerer Maßstab aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoller ist. Das LUMEN Triebwerk ist in der 25kN Schubklasse angesiedelt, was als Optimum für die vorgesehene Verwendung gesehen wird [13]. Das Triebwerkssystem beinhaltet nicht wie bisher nur die Schubkammer sondern umfasst auch die „Modular Turbopump Test Bench“ (MTB). Diese ist durch einen modularen Aufbau gekennzeichnet, was Änderungen an den einzelnen Baugruppen (wie Pumpe, Lager, Welle und Dichtungen) vereinfacht und so das Testen auf Komponentenebene erleichtert [14].

In Verbindung mit den Turbopumpen steht auch die Auswahl der benutzten Treibstoffkombination, welche im Fall von LUMEN auf LOX mit LNG fiel, um vor allem die Entwicklung des PROMETHEUS-Triebwerks zu unterstützen, welches auf der selben Treibstoffkombination basiert, aber auch das Betreiben der Turbopumpen weniger anfällig zu machen [13]. Im flüssigen Zustand ( $T_{LOX} < 90\text{ K}$  und  $T_{LNG} < 110\text{ K}$ , bei Atmosphärendruck) haben LOX und LNG einen Dichteunterschied von etwa einem Faktor zwei, was zur Folge hat, dass die Turbopumpen mit ähnlichen Drehzahlen betrieben werden können. LH2 besitzt eine geringere Dichte (etwa um den Faktor 6) und wesentlich niedrigere Siedetemperatur ( $T_{LH2} < 21\text{ K}$ ) als LNG, was eine höhere Rotationsgeschwindigkeit der Turbopumpen erfordert und mehrere Inducer benötigt um Kavitation zu verhindern. Diese Turbopumpen sind tendenziell fehleranfälliger und bergen ein höheres Risiko. Eine Anforderung an das LUMEN Projekt war aber, dass die Turbopumpen eine komplette

Testkampagne ohne Wartung halten müssen, weshalb das Risiko für den Betrieb der Turbopumpen möglichst gering gehalten wurde [15]. Zusätzlich werden durch die ähnlicheren Siedetemperaturen von LOX und LNG im Vergleich zu LH2 die Anforderungen an die Vakuumisolierung gelockert.

Weiteres Designziel ist die hohe Wiederverwendbarkeit und eine möglichst lange Nutzung des Demonstratortriebwerks, was eine hohe Haltbarkeit der Unterkomponenten erfordert. Somit werden für kritische Bauteile der Turbopumpen nur ausgereifte Ansätze und Techniken genutzt [14].

Ein weiterer Aspekt ist das Voranbringen des Verständnisses von Triebwerkszyklen auf Systemlevel und das Vorhersagen des Verhaltens eines ganzen Triebwerkszyklus. Der Triebwerkszyklus von LUMEN wurde durch eine Zyklusanalyse auf den Expander Bleed Zyklus festgelegt. Diese Zyklusauswahl soll eine Vergleichbarkeit von LUMEN zu typischen Oberstufentriebwerken gewährleisten und das technische Risiko sowie die Kosten verringern. Außerdem wird durch den offenen Zyklus ein größerer Leistungsbereich der Turbopumpen ermöglicht. Der durch den offenen Zyklus bedingte niedrigere spezifische Impuls ist für ein Triebwerk im Prüfstandbetrieb weniger ausschlaggebend. [13]

In späteren Projektstufen soll das modulare System als Prüfstandumgebung für Komponenten und Triebwerkszyklen dienen und diese in Verbindung mit der hohen Wiederverwendbarkeit auf deren Haltbarkeit und Zuverlässigkeit testen [13]. Diese Wiederverwendbarkeit am Prüfstand ist der erste Schritt zur Entwicklung wiederverwendbarer europäischer Haupttriebwerke.

## 3. Modellbildung

In diesem Kapitel werden die Theoretischen Grundlagen für die Modellierung genauer beschrieben. Für die Erstellung der 1-D Modelle der Treibstoffzuleitungen für LNG und LOX des P8.3 wird die Software EcosimPro (Version 6.0.0) verwendet. Daher wird EcosimPro zuerst vorgestellt und anhand einiger Artikel die Verwendbarkeit von EcosimPro für diese Arbeit erörtert. Um zu zeigen wie EcosimPro arbeitet wird anschließend die Modellierungssprache und ihre Schlüsselkonzepte erläutert. Eine Übersicht über die hinzugezogene Bibliothek ESPSS samt ihrer Unterbibliotheken wird am Ende des Kapitels gezeigt.

### 3.1. EcosimPro

EcosimPro ist eine Software zum Modellieren von kontinuierlich-diskreten physikalischen Systemen. Sie ermöglicht mathematische Modellierung von komplexen Komponenten, die durch differenziell-algebraische Gleichungen charakterisiert werden. Es sind sowohl transiente, als auch stationäre Simulationen möglich. EcosimPro wird in vielen verschiedenen Bereichen angewendet. Dazu gehören Untersuchungen von Wasserhammer mit kryogenen Fluiden [16], Entwicklung von filmgekühlten Schubkammerkomponenten [17], sowie Analyse von Flüssigtreibstoffraketenantrieben [18]. Ebenfalls wird eine Untersuchung verschiedener Treibstoffe und unterschiedlicher Triebwerkszyklen durch EcosimPro/ESPSS ermöglicht [19] [20]. Diese Artikel zeigen die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Software, sodass EcosimPro in Verbund mit der Bibliothek ESPSS als geeignetes Mittel zur Erstellung der Modelle der Treibstoffleitungen für flüssigen Sauerstoff und flüssiges Erdgas bei kryogenen Temperaturen eingeordnet wird und die Verwendung gerechtfertigt ist.

#### 3.1.1. Modellierungssprache und Schlüsselkonzepte

EcosimPro beinhaltet seine eigene objektorientierte Modellierungssprache, genannt EcosimPro Simulation Language (EL), die es dem Nutzer ermöglicht seine eigenen Komponen-

ten und Bibliotheken zu entwerfen. ELs objektorientierter Ansatz bringt einige Vorteile gegenüber einer sequenziellen Programmierung. Daten und Verhalten sind in Komponenten, analog zu Klassen, verkapselt, was globale Daten minimiert und die interne Komplexität der Komponente verbirgt. Diese Komponenten beinhalten die mathematische Beschreibung der realen Komponenten, die sie verkörpern. Komponenten interagieren mit dem Modell mit öffentlichen (public) Parametern, Daten und Ports, während lokale Variablen, diskrete Ereignisse und Gleichungen nicht zugänglich für das Modell selbst sind (private). Der objektorientierte Ansatz ermöglicht ebenso das Wiederverwenden von Komponenten, sowie die Vererbung. So wird der Modellierungsaufwand reduziert, da gemeinsame Daten und Gleichungen von unterschiedlichen Komponenten geteilt werden können. EcosimPro transformiert die Gleichungen, die das Verhalten einer Komponente bestimmen so, dass sie mit passenden numerischen Methoden gelöst werden können. Dies bedeutet, dass die Reihenfolge, in der die Gleichung der Komponente aufgeprägt werden, keine Rolle spielt. Folglich können die Komponenten in jeder Situation, in der ihr Verhalten relevant ist, benutzt werden. EcosimPro löst Systeme von differenzial-algebraische Gleichungen (engl. DAEs) und gewöhnlichen Differenzialgleichungen (engl. ODEs). Diese Systeme von Gleichungen werden im „CONTINUOUS“-Block der Komponente gesammelt. Neben dem „CONTINUOUS“-Block unterstützt EcosimPro auch einen „DISCRETE“-Block, welcher es ermöglicht Diskontinuitäten eines sonst kontinuierlichen Systems zu berücksichtigen. Standardelemente heutiger Programmiersprachen, wie IF, WHILE, oder FOR Ausdrücken sind ebenfalls möglich. [21]

Es gibt fünf Schlüsselkonzepte, die die Arbeit mit EcosimPro charakterisieren. Wie bereits erwähnt werden Variablen, DAEs, ODEs und Diskontinuitäten, die eine reale physische Einheit, wie ein Ventil oder eine Leitung, darstellen, in **Komponenten** gekapselt. Komplexere Komponenten lassen sich aus einfacheren Subkomponenten, unter Verwendung eines weiteren Schlüsselkonzepts, der **Ports**, zusammenstellen. Ports definieren welche Variablen zwischen den Komponenten ausgetauscht werden. Ports haben verschiedene Zuordnungen. Es gibt thermale Ports, Fluidports, Kontrollports, Messports und elektrische Ports. Wichtig ist, dass diese Ports nur mit Ports der selben Zuordnung verbunden werden können (z.B. Fluidport mit Fluidport, oder Kontrollport mit Kontrollport). Der Nutzer kann in einer Bibliothek beliebig viele eigene Ports definieren und nutzen. Diese beiden Schlüsselkonzepte beschreiben das Modell. Um eine Simulation durchführen zu können reicht dies nicht aus. Aus dem Modell (in EcosimPro auch Schematic genannt, was etwa einem Bauplan entspricht) muss eine **Partition** erstellt werden. Die Partiti-

on repräsentiert das mathematische Modell der im Schematic verwendeten Komponenten und definiert die Kausalität des endgültigen Modells. Die Simulationsumgebung wird in einem weiteren Schlüsselkonzept definiert, dem **Experiment**. Dort werden Anfangsbedingungen und Randbedingungen, sowie die gewünschte Lösung, nach transientem oder stationärem Vorgehen, definiert. Der Integrationsalgorithmus, Startzeit, Endzeit und die Zeitschrittgröße werden ebenfalls im Experiment definiert. Das letzte Schlüsselkonzept sind **Bibliotheken**. In ihnen werden die Komponenten kategorisiert, abgespeichert und können von dort zur Erstellung von Schematics verwendet werden. [21]

### 3.1.2. Mathematisches Modell

Beim Erstellen einer Partition, also dem Generieren eines mathematischen Modells aus dem vorgegebenen Schematic, verwendet EcosimPro verschiedene Algorithmen, um die kontinuierlichen Gleichungen und diskreten Ereignisse zu transformieren. EcosimPro nutzt Graphentheorie um komplexe Modelle zu vereinfachen, sowie Unstetigkeiten und Redundantes zu erkennen. Als erstes verarbeitet EcosimPro alle linearen Gleichungen mit konstanten Koeffizienten, welche meist in physikalischen Netzwerken auftauchen, wie elektrischen oder Fluidsystemen. EcosimPro ist fähig redundante Gleichungen (also Linearkombinationen vorheriger Gleichungen, die keine zusätzliche Information zu den bereits eingefügten Gleichungen beinhalten) zu erkennen und zu eliminieren. Widersprüchliche Gleichungen, die eine Lösung verhindern, werden ebenfalls erkannt und resultieren in einer Fehlermeldung. Anschließend wird der „Maximum Transversal Algorithmus“ (MTA) auf alle Gleichungen angewendet. Der Algorithmus weist jeder Gleichung eine zu berechnende Variable zu und stellt sicher, dass keine der Gleichungen oder Variablen ohne entsprechende Zuweisung bleibt. Er garantiert, dass eine Lösung gefunden wird, sofern diese existiert. [22]

Im nächsten Schritt wird die Anzahl der zu lösenden Gleichungen mit der Anzahl der Variablen verglichen. Dieser Vergleich kann in 3 Arten von Ergebnissen resultieren. Es kann mehr Gleichungen als Variablen geben, weniger Gleichungen als Variablen und exakt gleich viele Variablen wie Gleichungen. Gibt es mehr Gleichungen als Variablen, ist das System überbestimmt und kann nicht gelöst werden. Ist die Anzahl der Gleichungen geringer als die der Variablen, werden die fehlenden Gleichungen durch Randbedingungen ergänzt. In der Regel werden Ports, die keine Verbindung zu einer anderen Komponente im Modell haben, also unverbunden sind, über eine Randbedingung bestimmt.

Für den Fall, dass es eine übereinstimmende Anzahl an Variablen und Gleichungen gibt,

schlägt EocsimPro dem Nutzer vor welche Variablen als Randbedingungen genutzt werden sollen. Diese Randbedingungen müssen nicht vom Nutzer übernommen werden. Er kann auch eigenständig bestimmen, welche Variablen als Randbedingung verwendet werden und EcosimPro überprüft diese anschließend auf Gültigkeit. Die exakte Gestaltung der Randbedingungen findet später im Experiment statt. Der zweite Fall (Auffüllen der Gleichungen mit Randbedingungen) ist dem dritten Fall äquivalent, sobald die nötigen Randbedingungen bestimmt worden sind. [22]

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, ist die Reihenfolge der Gleichungen die eine Komponente definieren unwichtig für den Nutzer. Dies wird als akausal bezeichnet und macht es möglich, dass der Nutzer die Gleichungen in willkürlicher Ordnung aufstellen kann. Damit EcosimPro mit diesen Gleichungen eine funktionierende Simulation erstellen kann, dürfen diese nicht ungeordnet bleiben. Sie müssen so sortiert werden, dass die Berechnung einer Variablen, vor der Benutzung dieser in einer weiteren Gleichung stattfindet. EcosimPro muss die Variablen sequenziell errechnen können. Hierbei ist es einfacher und sicherer zuerst den MTA-Algorithmus zu verwenden und anschließend die Gleichungen für die Berechnung zu sortieren, da Probleme bereits im MTA-Algorithmus erkannt werden können. Mit einer erfolgreichen Anwendung des MTA-Algorithmus ist garantiert, dass auch das Sortieren ohne Fehler gelingt. [22]

## 3.2. ESPSS - Bibliotheken

Die „European Space Propulsion System Simulation“ Software (kurz ESPSS) ist das Standardwerkzeug der ESA für die Entwicklung und Analyse von Raumfahrtantriebssystemen jeglicher Projektphasen. Weiterhin ist es das bevorzugte Werkzeug vieler europäischer Firmen und Einrichtungen im Sektor Raumfahrtantriebe und schafft so eine gemeinsame Plattform, die reibungslose Kommunikation und Austausch von Informationen und Daten ermöglichen soll. ESPSS beinhaltet eine Vielzahl an EcosimPro Bibliotheken, die als Werkzeug zur Definition und Analyse von komplexen, zweiphasigen Systemen in transienten oder stationären Zuständen genutzt werden können. Sie sind speziell auf die Simulation von Antriebssystemen von Raketen und Satelliten ausgelegt. [23]

In den folgenden Abschnitten soll ein Überblick über die, für diese Arbeit relevanten, Bibliotheken und deren Funktionsweise gegeben werden. Die wichtigsten Komponenten der jeweiligen Bibliotheken werden ebenfalls behandelt.

### 3.2.1. FLUID PROPERTIES

Die Bibliothek FLUID PROPERTIES dient zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von Fluiden. Verfügbar sind die meisten in der Raumfahrt gängigen Fluide - die Option benutzerdefinierte Fluide anzulegen ist vorhanden. Die Arbeitsfluide werden in drei Kategorien eingeteilt:

- Perfekte Gase, deren Eigenschaften durch Interpolieren aus 1D Tabellen ausgelesen werden
- Perfekte Flüssigkeiten, analog zu Perfekten Gasen
- Reale Fluide, deren Eigenschaften durch Interpolieren aus 2D Tabellen bestimmt werden und welche flüssige, überhitzte, überkritische und zweiphasige Strömungen berücksichtigen

Die FLUID PROPERTIES Bibliothek selbst enthält keine Komponenten, sondern bietet eine große Sammlung an Funktionen, die genutzt werden können, um Informationen über den thermodynamischen Zustand des Fluides zu erhalten. Diese Funktionen werden von den Komponenten der FLUID FLOW 1D Bibliothek aufgerufen und genutzt. [24]

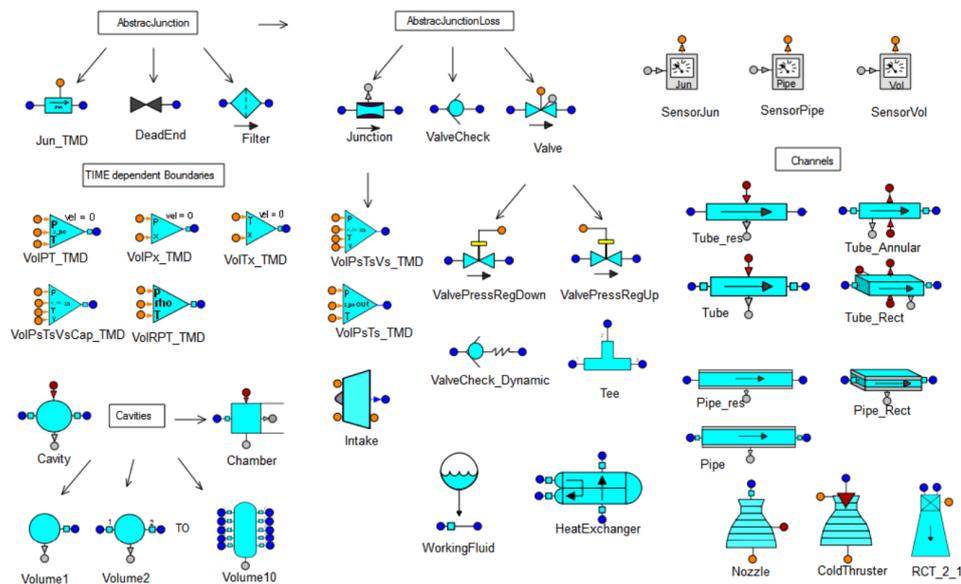
### 3.2.2. FLUID FLOW 1D

FLUID FLOW 1D ist eine Bibliothek, die die Simulation von zweiphasigen Systemen mit maximal zwei Fluiden ermöglicht. Dynamische Vermischung von „n“ Chemikalien aus einer Brennkammer können ebenfalls bearbeitet werden. Für jedes System muss ein Arbeitsfluid definiert werden. Dieses kann an jedem Punkt im System definiert und aus der Sammlung an Fluiden in der FLUID PROPERTIES Bibliothek ausgewählt werden. Die Bibliothek enthält Komponenten, wie z.B. Leitungen oder Ventile, um eindimensionale Fluidnetzwerke zu erstellen. Diese Komponenten werden in zwei grundsätzliche Arten eingeteilt. Es gibt resistive Komponenten, sowie kapazitive Komponenten. Resistive Komponenten erhalten die Zustandsvariablen (Druck, Dichte, Geschwindigkeit, chemische Zusammensetzung und Enthalpie) als Eingabe und geben die Flussvariablen (Volumen-, Massen- und Enthalpiestrom) als Rückgabewert aus. Die kapazitive Komponente ist das Gegenstück zur resistiven und erhält Flussvariablen als Eingabe und gibt die Zustandsvariablen zurück. Von einem rechnerischen Standpunkt aus bleibt die Aufteilung in zwei Klassen bestehen:

- C-Elemente (engl. capacitive) integrieren die Massen- und Energieerhaltungsgleichungen. Die Funktionen der FLUID PROPERTIES Bibliothek werden genutzt um den vollständigen thermodynamischen Zustand zu berechnen.
- M-Elemente (engl. momentum) errechnen explizit den Massenstrom zwischen C-Elementen

Um ein Fluidnetzwerk aufzubauen müssen kapazitive (C) und resistive (M) Komponenten alternierend aneinander gereiht werden (C — M — C). Zwei gleichartige Komponenten hintereinander führen zu einer Fehlermeldung und können nicht verarbeitet werden.

In Abbildung 3.1 sind die Komponenten der FLUID FLOW 1D Bibliothek gezeigt. Anzumerken ist hier, dass ein einfaches optisches Merkmal die Unterteilung in C- oder M-Elemente kennzeichnet. Ist zwischen Symbol der Komponente und den angrenzenden Fluidports ein hellblaues Quadrat, handelt es sich um C-Elemente. Ist kein solches Quadrat zu finden, ist es ein M-Element. Oben links und in der Mitte in Abbildung 3.1 sind mögliche M-Elemente, wie **Junction**, **DeadEnd** oder **Valve**, dargestellt. Oben auf der rechten Seite sind Sensoren, wie **SensorJun**, **SensorPipe** und **SensorVol**, die an die grauen Ports der anderen Komponenten angeschlossen werden können, um eine bestimmte Größe zu ermitteln. Unten links sind Komponenten, die ein bestimmtes Volumen simulieren, wie



**Abbildung 3.1.:** Übersicht über die Komponenten der Bibliothek FLUID FLOW 1D [24]

**Cavity**, **Volume1** und **Volume10**. Unten rechts befinden sich verschiedene Düsenkomponenten, wie **Nozzle** und **ColdThruster**. Darüber sind die **Pipe** und **Tube** Komponenten

in verschiedenen Ausführungen, z.B. als M-Element `Pipe_res`, als C-Element `Pipe` oder in rechteckiger Variation `Pipe_rect`. An den Stellen an denen das Modell in Verbindung mit der Umgebung tritt, können verschiedene Randbedingungen gesetzt werden. Möglich sind zum Beispiel Druck/Temperatur-Randbedingungen oder Druck/Gasmassenanteil-Randbedingungen ( in Abbildung 3.1 `VolPT_TMD` oder `VolPx_TMD` ). Gleichmaßen kann jeder kapazitiven Komponente eine Anfangsbedingung zugewiesen werden, welche den Druck und die Temperatur, sowie den Gasmassenanteil bei Simulationsstart bestimmt. [24]

Damit sollte ein Überblick über den Inhalt der FLUID FLOW 1D Bibliothek gegeben sein. Die einzelnen, für das Modell relevanten, Komponenten werden nachfolgend detailliert beschrieben.

### DeadEnd

Die `DeadEnd` Komponente stellt eine permanent geschlossene Blende dar und wird verwendet um ungenutzte Fluidports abzuschließen. Sie setzt die Massen- und Enthalpieströme der verbundenen Fluidports zu null. Das Symbol der `DeadEnd` Komponente ist in Abbildung 3.2 dargestellt. [24]



Abbildung 3.2.: Symbol der `DeadEnd` Komponente [24]

### Junction

Die `Junction` Komponente ist die Basis der resistiven Komponenten und wird genutzt um die kapazitiven Komponenten zu verbinden. Ihr Symbolzeichen aus EcosimPro/ESPSS kann Abbildung 3.3 entnommen werden. Sie erlaubt Modellierung von konzentrierten

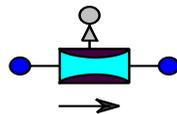


Abbildung 3.3.: Symbol der `Junction` Komponente [24]

Druckverlusten mit konstantem Querschnitt. In der `Junction` Komponente ist keine Ansammlung von Masse möglich. Dementsprechend sind die eintretenden und austretenden

Massenströme

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}, \quad (3.1)$$

sowie die eintretenden und austretenden Enthalpieströme

$$\dot{m}h_1 = \dot{m}h_2 = \dot{m}h \quad (3.2)$$

gleich. Die Berechnung des Massenstroms wird mittels der Impulserhaltungsgleichung

$$(I_1 + I_2)\left(A \cdot \frac{dG}{dt} + G \cdot \frac{dA}{dt}\right) + Lv \cdot \frac{dG}{dt} = \left(P + \frac{1}{2}\rho v^2\right)_1 - \left(P + \frac{1}{2}\rho v^2\right)_2 - \frac{1}{2}(\zeta + \zeta_{crit}) \frac{G|G|}{\rho_{up}} \quad (3.3)$$

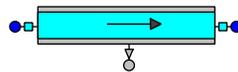
durchgeführt. Hierbei sind  $I_1$  und  $I_2$  die halben Trägheitsmomente,  $p$  ist der statische Druck,  $\rho$  die Dichte und  $v$  die Geschwindigkeit der an den Fluidports angebenen Komponenten.  $A$  ist die Querschnittsfläche und  $G$  der flächenspezifische Massenstrom.  $Lv$  ist ein sehr geringer Faktor, der dafür sorgt, dass eine Singularität vermieden wird, sollte  $A = 0$  sein.  $\rho_{up}$  beschreibt die Mischungsdichte von Gas und Flüssigkeit stromauf der **Junction**.  $\zeta$  ist der Druckverlustkoeffizient, welcher entweder vom Nutzer eingegeben werden kann, oder automatisch durch die Gleichung

$$\zeta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{A}{A_1}\right) + \left(1 - \frac{A}{A_2}\right)^2 \quad (3.4)$$

berechnet wird. Wobei  $A$  die Querschnittsfläche der **Junction** und  $A_1$  bzw.  $A_2$  die Querschnittsfläche der an den Fluidports angebenen Komponenten ist. [24]

### Pipe

Die meist genutzte Komponente in Modellen dieser Arbeit ist die **Pipe** Komponente, welche in Abbildung 3.4 gezeigt ist. Sie verbindet Tanks, Ventile sowie Randbedingungen und ermöglicht damit das Modellieren der Leitungen eines Fluidsystems.



**Abbildung 3.4.:** Symbol der Pipe Komponente [24]

Die **Pipe** Komponente stellt eine diskretisierte 1-D Leitung dar, deren Abschnitte als Knoten (engl. Nodes) bezeichnet werden. Diese Abschnitte sind in querschnittsveränderliche, nicht einheitliche Volumen gegliedert, welche über **Junctions** verbunden sind. Eine Verdeutlichung von diesem Aufbau kann Abbildung 3.5 entnommen werden. Mit der **Pipe**

Komponente, welche standardmäßig zylindrisch ausgelegt ist, lassen sich Druckverluste durch Wandreibung, Querschnittsänderungen und Biegungen in der Leitung berücksichtigen. Ein Wärmeaustausch zwischen Fluid und Wand, sowie Wand und Umgebung wird ebenfalls simuliert. Dies bezüglich lassen sich verschiedene Korrelationen zur automatischen Berechnung von Wärmeaustausch und Wandreibung auswählen. Weiterhin beinhaltet die Pipe Komponente die Möglichkeit für Rückströmungen, Trägheitseffekte sowie Beschleunigungseffekte des Fluids, welche an jedem Knotenpunkt bestimmt werden.

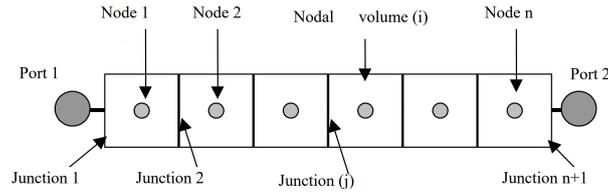


Abbildung 3.5.: Diskretisierung der Pipe Komponente [24]

Die Anzahl der Knotenpunkte, welche für eine Pipe verwendet werden, wird vom Nutzer festgelegt. Die Empfehlung liegt bei einem bis zu zehn Knotenpunkten pro Pipe Element, um Trägheits- und Druckverlusteffekte zu simulieren. Weitere Eingabewerte, die vom Nutzer bestimmt werden können, sind der innere Durchmesser, die Wanddicke und Wandrauigkeit, die Anzahl, Winkel und Radien der vorhandenen Biegungen in der Leitung, das Wandmaterial, Wärmeübertragungskoeffizienten und viele mehr. Mit diesen Eingabewerten, lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Verhalten festlegen und simulieren.

Die Pipe Komponente unterliegt der Bestimmungsgleichung

$$\Omega(\omega) = \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial f(\omega)}{\partial x}, \quad (3.5)$$

mit welcher sich diese unterschiedlichen Verhalten berechnen lassen. Die einzelnen Terme der Gleichung 3.5 bestehen aus

$$\omega = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho x^{nc} \\ \rho x_d^{nc} \\ \rho x^{chem}[i] \\ \rho v \\ \rho u \end{pmatrix} \cdot A; \quad f(\omega) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v x^{nc} \\ \rho v x_d^{nc} - D \frac{\partial \rho x_d^{nc}}{\partial x} \\ \rho v x^{chem}[i] \\ \rho v^2 + P + qn \\ \rho v h - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \end{pmatrix}; \quad (3.6)$$

$$\text{und } \Omega(\omega) = \begin{pmatrix} -\rho A k_{wall} \frac{\partial P}{\partial t} \\ -\rho x^{nc} A k_{wall} \frac{\partial P}{\partial t} + V(R_d - R_a) \\ -\rho x_d^{nc} A k_{wall} \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right) + V(R_a - R_d) \\ -\rho x^{chem}[i] A k_{wall} \frac{\partial P}{\partial t} \\ -\frac{1}{2} \frac{\Delta \xi}{\Delta x} \rho v |v| A + \rho g A + P \frac{dA}{dx} \\ -\rho u A k_{wall} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\Delta Q}{\Delta x} + \rho g v A \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$

Hierbei ist  $\rho$  die Dichte,  $x^{nc}$  der nicht kondensierbare Massenanteil,  $x_d^{nc}$  der nicht kondensierbare Massenanteil gelöst in der flüssigen Phase,  $x^{chem}[i]$  die Massenanteile der einzelnen chemischen Spezies,  $v$  die Geschwindigkeit und  $u$  die totale Energie.  $P$  steht für den Druck, „ $qn$ “ beschreibt einen künstlichen Viskositätsterm, der Druckverluste durch Turbulenz berücksichtigen soll, welche nicht direkt mit einem 1-D Ansatz berechnet werden können.  $\lambda$  ist die thermische Leitfähigkeit des Fluides, um die Wärmeleitung zwischen den einzelnen Fluidknoten zu bestimmen.  $A$  ist der Strömungsquerschnitt,  $V$  das Volumen der einzelnen Fluidknoten und  $h = u + \frac{P}{\rho}$  die totale Enthalpie.  $k_{wall}$  ist die Wandkompressibilität,  $\Delta Q$  beschreibt den Wärmeaustausch mit der Wand.  $D$  ist der Diffusionskoeffizient um Diffusionsströme zu bestimmen und  $R_a$  und  $R_d$  die Quellterme für Absorption und Desorption des nicht kondensierbaren Gases in der flüssigen Phase. Reibung zwischen Fluid und Wand wird im Term  $\Delta \xi$  beschrieben, welcher ebenfalls den Druckverlust durch Biegungen in der Leitung und andere optionale konzentrierte Druckverluste beinhaltet. Die Wärmeübertragung mit der Umgebung der **Pipe** Komponente wird durch die Gleichung

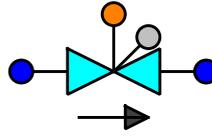
$$T'_{wall,i} = \frac{-\Delta Q_i - h_{out} A_{wall,ext} (T_{wall,i} - T_{out})}{c_{p,wall} \cdot m_{wall,i}} \quad (3.8)$$

modelliert.

$\Delta Q_i$  ist hier der, bereits in Gleichung 3.7 erwähnte, Wärmeaustausch mit der Wand.  $h_{out}$  ist der Wärmeübertragungskoeffizient mit der Umgebung, welcher als Konstante vom Nutzer bestimmt wird,  $A_{wall,ext}$  die äußere Kontaktfläche der **Pipe** mit der Umgebung,  $c_{p,wall}$  die isobare Wärmekapazität des **Pipe** Materials,  $m_{wall,i}$  die Masse des Wandmaterials des  $i$ -ten Fluidknotens,  $T_{wall,i}$  die Wandtemperatur am  $i$ -ten Fluidknoten und  $T_{out}$  die Umgebungstemperatur. [24]

### Valve

Die **Valve** Komponente erbt die Eigenschaften und Grundgleichungen der **Junction** Komponente und modelliert ein reales Ventil. Das Symbol, welches in EcosimPro/ESPSS für die Ventilkomponente genutzt wird, ist Abbildung 3.6 zu entnehmen.



**Abbildung 3.6.:** Symbol der Valve Komponente [24]

Anders als bei der **Junction** Komponente, welche einen konstanten Strömungsquerschnitt besitzt, ist die Querschnittsfläche der **Valve** Komponente kontrollierbar. Die Bezugsfläche  $A_0$  ist die Fläche bei maximaler Öffnung des Ventils und wird vom Nutzer festgelegt. Der Öffnungsgrad des Ventils reicht von 0 — komplett geschlossen, bis zu 1 — komplett geöffnet. Der Nutzer kann verschiedene Ventilcharakteristiken auswählen, welche das Verhältnis von Öffnungsgrad zum relativen Strömungsquerschnitt bestimmen. Unterschieden werden sie in „linear“, „equal%“ und „quick opening“. Die „equal%“-Charakteristik gibt den größten Teil des Strömungsquerschnitts erst bei hohen Öffnungsgraden Nahe 1 frei, die „quick opening“-Charakteristik hingegen ist das Gegenteil und verzeichnet einen starken Anstieg des relativen Strömungsquerschnitts bei bereits geringen Öffnungsgraden. Die Ventilcharakteristiken werden durch die Gleichungen

$$\begin{aligned} A_{rel} &= pos && \text{(linear)} \\ A_{rel} &= pos^3 && \text{(equal\%)} \\ A_{rel} &= (1 - \exp(-10 \cdot pos)) && \text{(quick opening)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

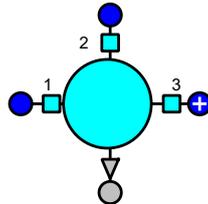
beschrieben.  $pos$  entspricht dem Öffnungsgrad und  $A_{rel}$  dem relativen Strömungsquerschnitt. Es ist dem Nutzer möglich eine selbst definierte Ventilcharakteristik anzulegen, indem er dem Öffnungsgrad jeweils Druckverlustbeiwerte  $\zeta$  und die relative Strömungsquerschnittsfläche  $A_{rel}$  zuordnet. Die Änderung der Ventilposition

$$\frac{dpos}{dt} = \frac{pos_{com} - pos}{\tau_{eff}} \quad (3.10)$$

wird mit einer Verzögerung  $\tau_{eff}$  beaufschlagt, womit ein abruptes Öffnen des Ventils verhindert wird und sich reale Öffnungsprozesse simulieren lassen. Hierbei ist  $pos$  erneut der Öffnungsgrad, also die aktuelle Ventilposition und  $pos_{com}$  die Zielposition. Der Zeitverzug  $\tau_{eff}$  kann sich für das Öffnen und Schließen des Ventils unterscheiden und wird je nach Vorzeichen des Zählers in Gleichung 3.10 ausgewählt. Für ein Öffnen ist der Zähler positiv und es gilt  $\tau_{eff} = \tau_{open}$ . Für ein Schließen ist der Zähler negativ und es gilt  $\tau_{eff} = \tau_{close}$ . [24]

## Volume

Die **Volume** Komponente stellt ein adiabatisches Volumen dar, welches als einfaches Reservoir dient. Es gibt **Volume** Komponenten mit bis zu 10 Fluidports. In Abbildung 3.7 ist das Symbol einer **Volume** Komponente mit drei Fluidports gezeigt.



**Abbildung 3.7.:** Symbol der Volume Komponente mit 3 Fluidports [24]

Eine **Volume** Komponente besitzt drei Geometrieparameter. Das Volumen  $V_0$ , die Länge  $L$  der **Volume** Komponente und den benetzten Umfang  $P_w$ . Eine Angabe von  $V_0$  ist erforderlich, die anderen beiden Parameter sind standardmäßig auf 0 initialisiert und müssen nicht zwangsläufig vom Nutzer bestimmt werden. Je nach Kombination der Werte der beiden Parameter wird die Gestalt des Volumens bestimmt. Welche Kombinationen möglich sind und welche Folgen diese für das Volumen haben, ist Tabelle 3.1 zu entnehmen.

**Tabelle 3.1.:** Kombinationen der Parameter  $L$  und  $P_w$  der **Volume** Komponente [24]

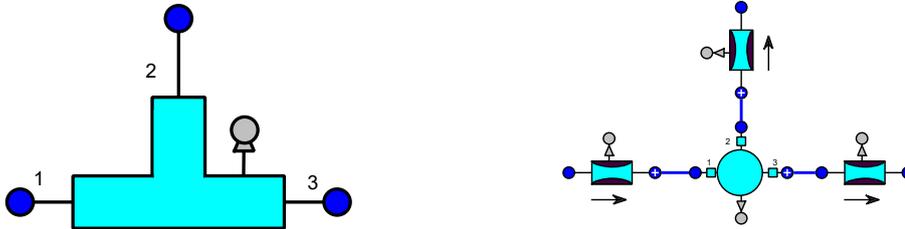
$L$	$P_w$	Geometrie der <b>Volume</b> Komponente
0	0	Kugel, Radius aus Gesamtvolumen berechnet
> 0	0	kreisförmiger Zylinder, Radius aus der Querschnittsfläche berechnet
> 0	> 0	nichtkreisförmiger Zylinder
0	> 0	kreisförmiger Zylinder, Radius aus dem benetzten Umfang berechnet

**Volume** Komponenten können dazu genutzt werden um mehr als 3 Leitungen zu verbinden oder zu trennen.

## Tee

Die **Tee** Komponente stellt rein reales T-Stück dar und wird verwendet um einen Gesamtstrom in zwei Teilströme aufzuteilen oder zwei Teilströme zu einem Gesamtstrom zusammenzuführen. Das in EcosimPro/ESPSS verwendete Symbol ist in Abbildung 3.8 links dargestellt. Die **Tee** Komponente ist ein Beispiel für eine Komponente, die aus einfacheren Subkomponenten aufgebaut ist. Sie besteht aus einem Volumen, dessen Fluidports

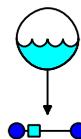
mit **Junction** Komponenten versehen sind. Die Querschnittsfläche jeder **Junction** lässt sich vom Nutzer festlegen, ebenso wie deren Druckverlustbeiwerte. Ihre Topologie lässt sich Abbildung 3.8 rechts entnehmen. [24]



**Abbildung 3.8.:** Links: Symbol der TEE Komponente; Rechts: Topologie der TEE Komponente [24]

### WorkingFluid

Die **WorkingFluid** Komponente übernimmt die Definition des Arbeitsfluides. Das Symbol ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Die **WorkingFluid** Komponente kann überall in einem Fluidnetzwerk eingefügt werden. Es muss genau eine **WorkingFluid** Komponente pro System existieren. Weniger oder mehrere dieser Komponente sind nicht zulässig. Der Nutzer kann zwei Fluide aus den Datenbanken der FLUID PROPERTIES Bibliothek bestimmen. Das Hauptfluid ist frei wählbar und legt das verwendete Fluid aller damit verbundenen Komponenten fest. Das zweite Fluid bestimmt das nicht kondensierbare Gas und kann nur aus den realen oder perfekten Gasen gewählt werden. Ein Hauptfluid muss immer bestimmt werden. Ein Sekundärfluid ist nicht zwangsläufig nötig. [24]



**Abbildung 3.9.:** Symbol der Working Fluid Komponente [24]

### VolPT\_TMD und VolPx\_TMD

Die **VolPT\_TMD** und **VolPx\_TMD** Komponenten sind zeitabhängige (engl. *timedependent* kurz TMD) Randbedingungen und in Abbildung 3.10 dargestellt. Sie werden genutzt um einen vollständigen thermodynamischen Zustand an den verbundenen Fluidports zu

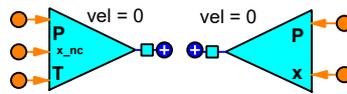


Abbildung 3.10.: Symbole der VolPT\_TMD und VolPx\_TMD Komponenten [24]

definieren. Dies wird durch das Vorgeben von zwei beziehungsweise drei Variablen erreicht. Bei VolPx\_TMD sind diese Variablen der Druck  $P$  und der Gasmassenanteil  $x$ . Bei VolPT\_TMD sind es der Druck  $P$ , die Temperatur  $T$ , sowie der, in der Flüssigkeit gelöste, nicht kondensierbare, Gasmassenanteil  $x_{nc}$ . Die Geschwindigkeit ist, wie an den Symbolen zu erkennen ist, gleich null. Dies bedeutet die angegebenen Größen sind Totalgrößen. Die Strömungsgeschwindigkeit wird in den, an die Randbedingung anschließenden, Komponenten bestimmt. [24]

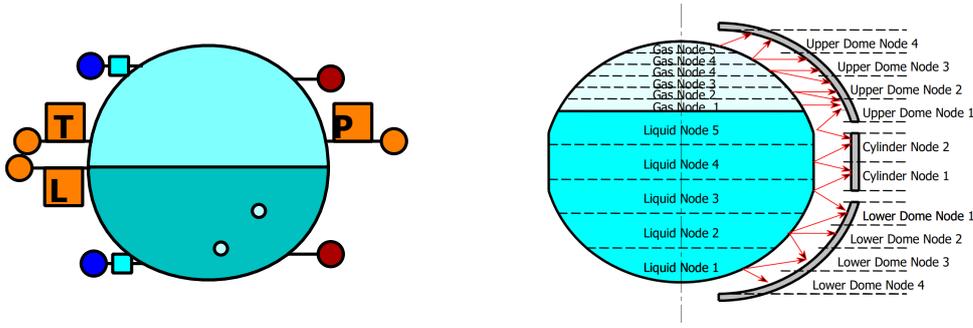
### 3.2.3. TANKS

Die TANKS Bibliothek stellt kapazitive Komponenten für die transiente Simulation von Raketentanks und Tanks von Raumfahrzeugen bereit. Diese Komponenten können mit Komponenten der FLUID FLOW 1D Bibliothek verbunden werden, um komplette Triebwerkssysteme zu modellieren. Als solche beinhalten die Tanks ein Arbeitsfluid und ein Bedruckungsgas. Es können Flüssigkeiten, Gase und zweiphasige Regime für reale Fluide simuliert werden. Die Mischung von realen Fluiden kann ebenfalls betrachtet werden. Diese funktioniert mit einem nicht kondensierbaren Fluid, aber auch ohne ein solches. Effekte wie Absorption und Desorption werden berücksichtigt. Verschiedene Korrelationen zur Berechnung von Wärmeaustausch zwischen Tankwänden und Fluidvolumen werden bereitgestellt, zusammen mit einer Modellierung des Wärme- und Massenaustauschs an der Schnittstelle zwischen Flüssigkeit und Bedruckungsgas. Eine Berechnung des Füllstandes wird vorgenommen, um den Nutzer vor einem Überlaufen der Flüssigkeit, oder einem vollständigen Entleeren zu warnen. Alle 1-D Tanks der TANKS Bibliothek enthalten eine zweidimensionale Diskretisierung der Wandmodelle.

#### Tank\_Sphere

Die Tank\_Sphere Komponente modelliert einen Tank mit einem Fluidport für das Bedruckungsgas und einem Fluidport für die Flüssigkeit. Das Symbol der Tank\_Sphere Komponente ist in Abbildung 3.11 links dargestellt. Die Komponente kann ein Sieden und Verdampfen, sowie ein Kondensieren der Flüssigkeit berücksichtigen. Die Tank\_Sphere

Komponente enthält eine 1-D räumliche Diskretisierung für Flüssigkeits- und Gasvolumen. Das Raster mit dem der Tank diskretisiert wird ist in Abbildung 3.11 rechts gezeigt. Die Abbildung zeigt wie die Fluidvolumen zu den Wandsegmenten zugeordnet werden. Das Raster ist beweglich und passt sich beim Entleeren oder Befüllen des Tanks an den Füllstand an.



**Abbildung 3.11.:** Links: Symbol der Tank\_Sphere Komponente; Rechts: Rasteraufteilung der Tank\_Sphere Komponente [24]

Die grundlegenden Gleichungen, die das Verhalten der Komponente beschreiben, wie Massenerhaltung

$$\begin{aligned}
 V_i \rho_i' + V_i' \rho_i &= (\dot{m}_{jun,i-1} - \dot{m}_{jun,i}) + (\dot{m}_{dif,i-1} - \dot{m}_{dif,i}) + (\dot{m}_{fch,i-1} - \dot{m}_{fch,i}), \\
 V_i(x_{nc,i}' \rho_i + x_{nc,i} \rho_i') + V_i' x_{nc,i} \rho &= (\dot{m}_{nc\_jun,i-1} - \dot{m}_{nc\_jun,i}) \\
 &\quad + (\dot{m}_{dif,i-1} - \dot{m}_{dif,i}) + (\dot{m}_{nc\_boi,i-1} - \dot{m}_{nc\_boi,i}),
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

sowie Energieerhaltung

$$\begin{aligned}
 (u_i' \rho_i + u_i \rho_i') V_i + u_i \rho_i V_i' &= (\dot{m} h)_{jun,i-1} - (\dot{m} h)_{jun,i} + q_{wall,i} \\
 - p_i V_i' - g \rho_i V_i v_{el,i} &+ (q_{dif,i-1} - q_{dif,i})
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

werden von der Pipe Komponente übernommen und Terme für das bewegliche Raster hinzugefügt.  $\dot{m}_{jun,i}$  steht für den Massenstrom am Ausgang des i-ten Knotens,  $\dot{m}_{dif,i}$  für den diffusiven nicht kondensierbaren Massenstrom,  $\dot{m}_{nc\_boi,i}$  ist der nicht kondensierbare siedende Massenstrom und  $\dot{m}_{fch,i}$  der phasenwechselnde (siedend oder kondensierend) Massenstrom.  $\rho_i$  beschreibt die Mischungsdichte.  $x_{nc,i}$  ist der nicht kondensierbare Massenanteil.  $u_i$  und  $h_i$  sind die totale spezifische Energie und Enthalpie.  $q_{wall,i}$  ist der Wärmeaustausch mit der Wand.  $q_{dif,i}$  beschreibt den Wärmestrom durch Wärmeleitung zwischen den Knoten i und i+1. Analog zur Junction Komponente wird die Impulserhaltungsgleichung

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(L_{i-1} + L_i) \cdot \dot{m}_{jun,i} = & A_{i-1}[P + qn - \frac{1}{4}\xi\rho \cdot vel |vel|]_{i-1} - A_i[P + qn + \frac{1}{4}\xi\rho \cdot vel |vel|]_i \\ & - \frac{1}{2}(\rho_{i-1}V_{i-1} + \rho_iV_i) \cdot (g + vel_{grid,i}) - \frac{1}{2}(P_{i-1} + P_i)(A_{i-1} - A_i) \end{aligned} \quad (3.13)$$

zur Berechnung des Massenstroms genutzt. Hierbei ist  $L_i$  die Höhe des  $i$ -ten Knotens,  $A_i$  die mittlere Querschnittsfläche,  $qn$  der künstliche numerische Viskositätsterm,  $vel_{grid,i}$  die Geschwindigkeit des sich bewegenden Rasters in der Mitte des  $i$ -ten Knotens und  $vel_i$  die mittlere Geschwindigkeit.  $vel_i$  setzt sich zusammen aus  $vel_{grid} + \frac{\dot{m}_{jun\_mean}}{A}$ .  $\xi$  beinhaltet Reibungsverluste an den Tankwänden. Die Impulserhaltung wird auf alle Fluidvolumina angewendet. Ausgeschlossen davon sind das Flüssigkeitsvolumen 5 und das Gasvolumen 1 (siehe Abbildung 3.11 rechts), welche die Flüssigkeits-Gasschnittstelle bilden. Die ein- und austretenden Massenströme werden in den angrenzenden **Junction** Komponenten berechnet. Für die Berechnung des Wärmeaustausches an der Schnittstelle von Flüssigkeit und Bedruckungsgas werden mehrere Möglichkeiten gegeben. Für überkritische Bedingungen im Tank wird empfohlen, den Wärmeaustausch komplett zu deaktivieren. Auch für die **Tank\_Sphere** Komponente lassen sich vom Nutzer einige Parameter bestimmen. Es lässt sich das Wandmaterial entweder durch Auswahl aus einer vorgegebenen Liste, oder durch Eingabe eigener Kennwerte (z.B. spezifische Wärmekapazität  $c_p$ , Dichte  $\rho$  oder thermische Leitfähigkeit  $\lambda$ ) festlegen. Anfangsbedingungen wie die Temperatur oder der Druck der Fluide, sowie der Tankradius und der Füllstand zu Beginn der Simulation können ebenfalls bestimmt werden.

### 3.2.4. Nicht ESPSS-Komponenten

Zwei der verwendeten Komponenten sind aus der DLR-seitigen Bibliothek des P8 übernommen und modifiziert worden.

#### **Sensors**

Die **Sensors**-Komponente stellt reale Messgeräte dar und ist in Abbildung 3.12 gezeigt. Sie werden an die grauen Ports der Komponenten angeschlossen und erleichtern das spätere Verarbeiten der Daten aus EcosimPro/ESPSS, indem sie einzelne Messgrößen extrahiert und extern der zu messenden Komponente aufzeichnet. Eine Einheitenrechnung kann mit der **Sensors** Komponente ebenfalls erreicht werden. Der Faktor der verwendet werden soll kann vom Nutzer festgelegt werden. EcosimPro rechnet in Pascal, die Sensoren am

realen Prüfstand messen in bar, dementsprechend kann die **Sensors** Komponente mit einer Verstärkung von  $10^{-5}$  initialisiert werden, um als Ausgabewert bar, statt Pascal, zu erhalten.

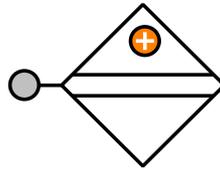


Abbildung 3.12.: Symbol der **Sensors** Komponente

### AV\_LOX und AV\_LNG

Die **AV\_LOX** und **AV\_LNG** Komponenten werden genutzt um die Ventilstellung der Automatikventile zu kontrollieren. Es wird zeitabhängige Information über die Ventilposition aus einer externen Textdatei eingelesen und ein schrittweise interpoliertes Signal an die Ventilkomponente weitergegeben. Die Textdatei beinhaltet die Zeitwerte und Werte für die Ventilposition, welche entweder 0 — vollständig geschlossen oder 1 — vollständig geöffnet annehmen können. So kann eine vorher definierte Ventilsequenz in die Simulation geladen werden.

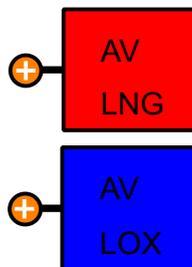


Abbildung 3.13.: Symbol der **Sensors** Komponente

## 4. Prüfstandaufbau und Testablauf

Damit ein Modell des Prüfstands erstellt werden kann, muss zuerst der Aufbau und die Funktionsweise des realen Systems verstanden werden. Dazu soll in diesem Kapitel zuerst die Normierung der Daten besprochen, dann ein Überblick über die einzelnen Abschnitte der Treibstoffleitungen gegeben und anschließend der Testablauf rekonstruiert werden. Es wird immer zuerst das LOX-System behandelt und darauffolgend das LNG-System.

### 4.1. Normierung

Das Thema dieser Arbeit sind die Treibstoffleitungen des Prüfstand P8.3, welcher Bestandteil aktueller Forschung am DLR Lampoldshausen ist. Aus diesem Grund können keine Absolutwerte von Bauteildaten oder Messungen verwendet werden. Um die Informationen dennoch präsentieren zu können, werden sie in unterschiedlichen Vorgehensweisen normiert. Für die Bauteildaten werden willkürliche Werte für die Normierung bestimmt, welche in einem separaten Schlüssel zur Entnormierung zusammengetragen werden. Ein kurzes Beispiel soll das Vorgehen erklären: Angenommen der Tankdruck des LOX Run Tanks sei  $p_{Tank,LOX} = 7$  bar. Der Druck zur Normierung wird willkürlich auf  $p_n = 4$  bar festgelegt. Der Tank wird dann nicht mit  $p_{Tank,LOX} = 7$  bar beschrieben, sondern mit  $p_{Tank,LOX,norm} = 1,75 \cdot p_n$ . Der Druck, welcher zur Normierung benutzt wird, bleibt für die Öffentlichkeit unbekannt und kann nur von den zuständigen DLR-Mitarbeitern eingesehen werden. In gleicher Weise wird auch mit allen anderen genannten Bauteildaten verfahren.

Für die Darstellung und den Vergleich der Sensordaten mit den Modelldaten werden diese jeweils mit dem Maximalwert und Minimalwert der Sensordaten normiert. Die Normierung wird durch die Gleichung

$$T = \frac{T_{mess} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}, \quad (4.1)$$

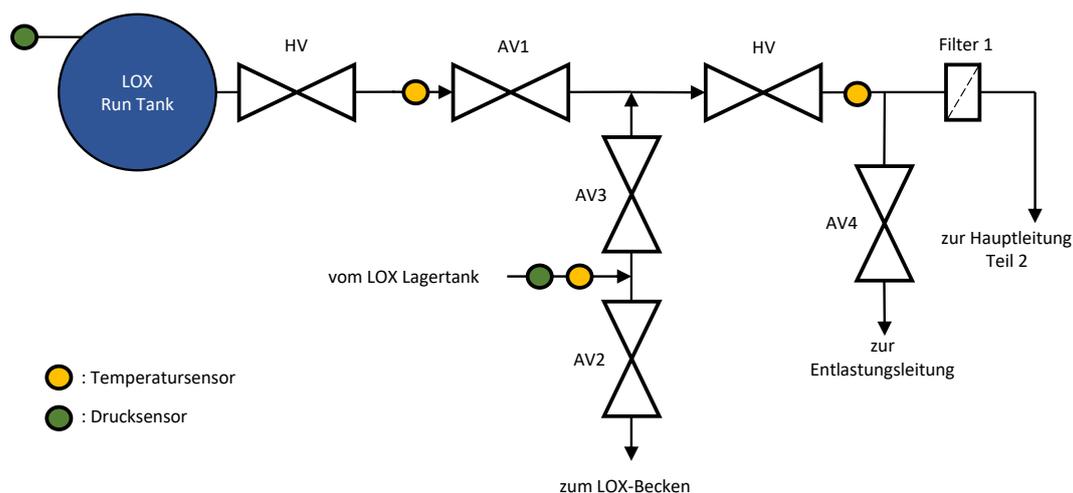
am Beispiel einer Temperatur, beschrieben, wobei  $T$  der normierte Messwert,  $T_{mess}$  der tatsächliche Messwert und  $T_{max}$  und  $T_{min}$  die jeweiligen Maximalwerte und Minimalwerte

der Sensordaten sind. Diese Normierung wird auf alle Messwerte angewendet.

Die Zeiten der Testläufe werden ebenfalls normiert. Hierbei ist  $t_{Start} = 0$  der Zeitpunkt zu Testbeginn und  $t_{Ende} = 1$  der Zeitpunkt am Testende. Die Zeiten dazwischen werden mit Gleichung 4.1 berechnet.

## 4.2. Aufbau: LOX-System

Das LOX-System ist in die Hauptleitung, der direkte weg vom LOX Run Tank zur Prüflingsschnittstelle, und die Entlastungsleitung, welche an verschiedenen Punkten der Hauptleitung abzweigt und die Abführung des Fluids zum LOX-Becken ermöglicht, aufgeteilt. Die Hauptleitung ist zur besseren Übersicht in zwei Teile aufgeteilt. Der erste Teil ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Er reicht vom LOX Run Tank bis zum ersten Filter in der Hauptleitung.



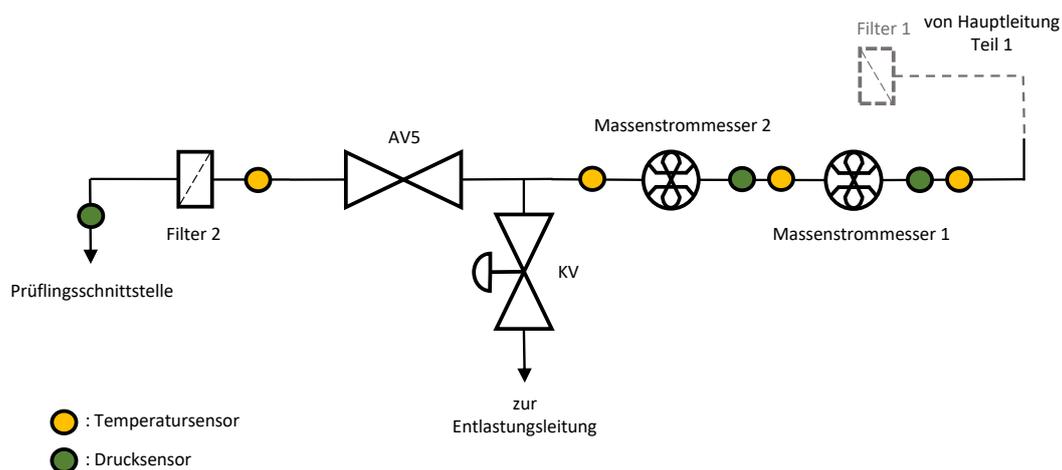
**Abbildung 4.1.:** Vereinfachtes Schema der Hauptleitung des LOX Systems Abschnitt 1

Für die Vorkonditionierung gibt es einen Bypass vom LOX Lagertank direkt in die Hauptleitung, welcher durch ein computergesteuertes Automatikventil (AV) AV3 geöffnet und geschlossen werden kann. Automatikventile können nur komplett geöffnet oder gänzlich geschlossen sein. Eine Regelung des effektiven Strömungsquerschnitts ist nicht möglich. Eine Abzweigung zum LOX-Becken ist hier ebenfalls vorhanden und wird über AV2 kontrolliert. Im Bypass für die Konditionierung befinden sich jeweils ein Druck- und ein Temperatursensor. Alle Sensoren im LOX-System arbeiten mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz. Nach abgeschlossener Konditionierung wird der Prüfstand mit Fluid aus dem

LOX Run Tank versorgt. Dieser ist für einen Betriebsdruck von  $p_{LOX,RunTank} = 8,21 \cdot p_n$  ausgelegt und besitzt ein Fassungsvermögen von  $V_{LOX,RunTank} = 1,89 \cdot V_n$ . Ein Drucksensor misst den Tankdruck. Der LOX Run Tank ist aus Sicherheitsgründen mit einem Handventil (HV) versehen.

Weiter stromab des HV folgt ein Temperatursensor und AV1. Stromab des AV1 trifft der Bypass vom LOX Lagertank auf die Hauptleitung und der Weg des Fluides ist ab hier für Konditionierung und Speisung aus dem Run Tank identisch. Es folgt ein weiteres HV mit einem Temperatursensor stromab. Anschließend zweigt die Hauptleitung zum ersten Mal in die Entlastungsleitung ab, was durch AV4 kontrolliert werden kann. Weiter stromab der Abzweigung befindet sich der erste Filter, welcher dafür sorgt, dass erste Verunreinigungen aus der Strömung entfernt werden. Alle Rohre des ersten Abschnitts der Hauptleitung sind vollständig vakuumisoliert. Der Innendurchmesser der Leitungen vom LOX Lagertank bis zur Hauptleitung beträgt  $d_{i,LOX,Lagertank} = 0,74 \cdot d_n$ . Die Rohre der Hauptleitung besitzen im ersten Teil einen inneren Durchmesser von  $d_{i,LOX,Haupt1} = 2,94 \cdot d_n$ . Die Wandstärke aller Leitungen im ersten Abschnitt ist konstant.

Der zweite Abschnitt der Hauptleitung ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Nach dem Filter aus dem ersten Abschnitt (gestrichelt in der Abbildung dargestellt) folgen ein Temperatursensor und ein Drucksensor. Weiter stromab befindet sich der erste Massenstrommesser mit anschließendem Druck- und Temperatursensor. Darauf folgend ist der zweite Massenstrommesser. Die Massenstrommesser sind als Turbinenmessgerät ausgeführt.



**Abbildung 4.2.:** Vereinfachtes Schema der Hauptleitung des LOX Systems Abschnitt 2

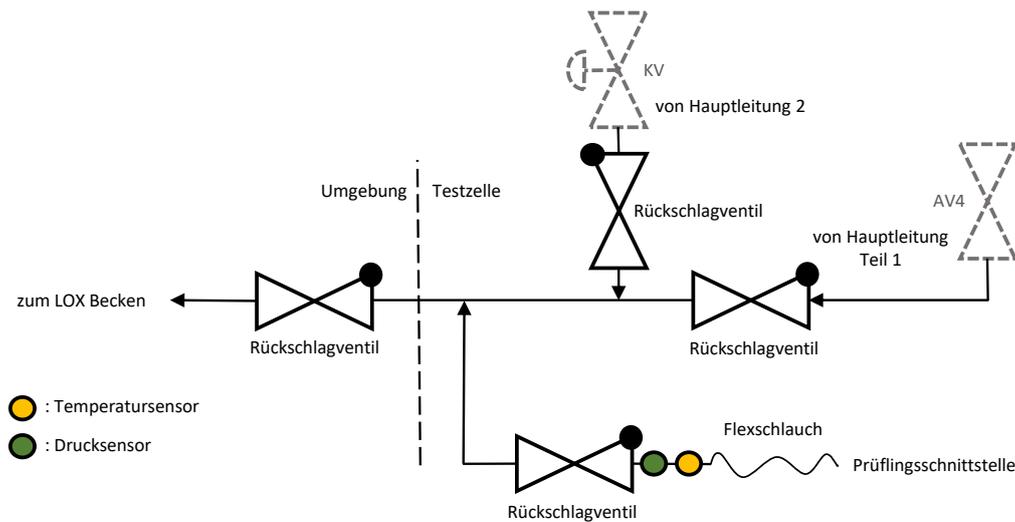
Dies bedeutet, dass eine Turbine im Messgerät den Volumenstrom des LOX misst. Mittels

der davor befindlichen Temperatur- und Drucksensoren kann die Dichte berechnet werden. Aus der Dichte und dem Volumenstrom lässt sich dann, zu jedem Zeitpunkt, der Massenstrom des LOX berechnen. Aus Gründen der Redundanz sind die Massenstrommesser in doppelter Ausführung vorhanden.

Stromab der Massenstrommesser befindet sich ein Temperatursensor. Auf diesen folgt die zweite Abzweigung in die Entlastungsleitung, welche mit einem Kontrollventil (KV) kontrolliert wird. Dieses kann, im Gegensatz zu den Automatikventilen, nicht nur ein vollständiges Öffnen oder komplettes Schließen ausführen, sondern auf Computerbefehl eine Öffnungsposition dazwischen annehmen. Mit dem KV wird gesteuert wie viel des Gesamtmassenstroms an der Prüflingsschnittstelle ankommt und wie viel über die Entlastungsleitung zum LOX-Becken geführt wird.

Stromab der Abzweigung folgt ein AV5 mit anschließendem Temperatursensor. Anschließend passiert der LOX den zweiten Filter. Direkt stromauf der Schnittstelle zum Prüfling befindet sich ein Drucksensor. Alle Rohre des zweiten Abschnitts der Hauptleitung sind vollständig vakuumisoliert. Nach dem Filter aus Abschnitt 1 bleibt der Rohrinnendurchmesser noch auf  $d_{i,LOX,Haupt1} = 2,94 \cdot d_n$  und verjüngt sich anschließend auf  $d_{i,LOX,Haupt2} = 1,18 \cdot d_n$ . Dieser Durchmesser bleibt bis nach dem zweiten Massenstrommesser konstant. Nach diesem erhöht sich der Innendurchmesser der Leitungen auf  $d_{i,LOX,Haupt2} = 1,5 \cdot d_n$  bis zu AV5. Nach AV5 bis zur Schnittstelle mit dem Prüfling reduziert sich der Durchmesser der Leitung erneut auf  $d_{i,LOX,Haupt2} = 1,18 \cdot d_n$ . Die Prüflingsschnittstelle ist mit einer Blende versehen, welche einen Durchmesser von  $d_{i,LOX,Belnde} = 0,41 \cdot d_n$  hat. Die Wandstärken in diesem Abschnitt sind ebenfalls konstant.

Der letzte Teil des LOX-Systems besteht aus der Entlastungsleitung, welche in Abbildung 4.3 dargestellt ist. Die beiden Abzweigungen aus den jeweiligen Hauptleitungen münden in die Entlastungsleitung. Zum besseren Verständnis sind die Ventile aus den vorigen Abschnitten, die an die Entlastungsleitung angrenzen, auch in diesem Schema abgebildet. Sie sind gestrichelt dargestellt und grau gefärbt. Zunächst führt die Abzweigung aus dem ersten Abschnitt der Hauptleitung in die Entlastungsleitung. Stromab befindet sich ein Rückschlagventil, was eine Rückströmung in die Hauptleitung verhindert. Anschließend kommt die Abzweigung aus dem zweiten Abschnitt der Hauptleitung und mündet in die Entlastungsleitung. Wie zuvor auch wird ein Rückströmen in die Hauptleitung durch ein Rückschlagventil verwehrt. Für die Testläufe, die in dieser Arbeit behandelt werden, wurde an die Prüflingsschnittstelle ein Flexschlauch angeschlossen, der austretendes Fluid direkt in die Entlastungsleitung führt. Direkt am Eingang in die Entlastungsleitung nach dem



**Abbildung 4.3.:** Vereinfachtes Schema der Entlastungsleitung des LOX Systems

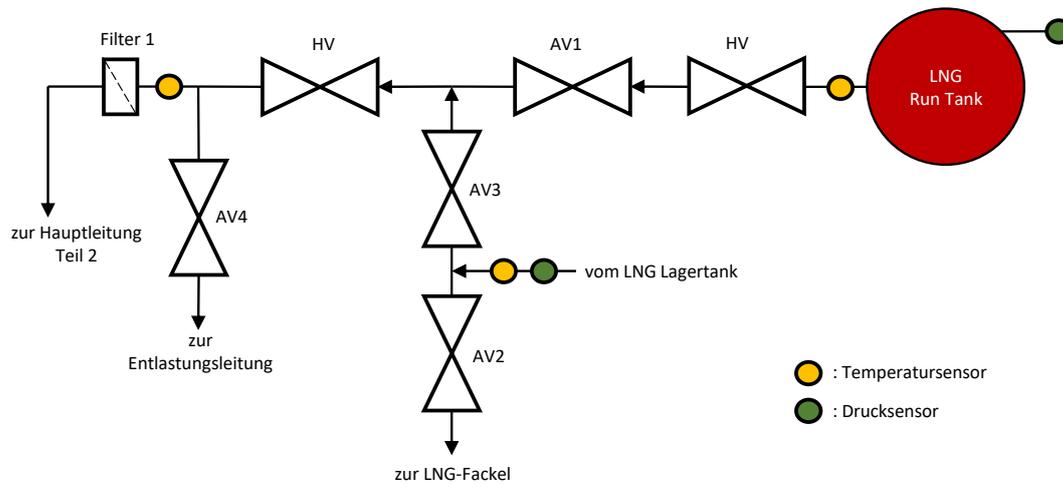
Flexschlauch befinden sich ein Temperatur und ein Drucksensor. Ein Rückschlagventil verhindert, dass Fluid wieder zurück in die Hauptleitung gelangt. Anschließend werden die Leitungen vom Eingang der Entlastungsleitung und den anderen beiden Abschnitten der Hauptleitung zusammengeführt. Die Entlastungsleitung führt aus der Testzelle hinaus und in die Umgebung zum LOX-Becken, wo der LOX verdampfen und in die Umgebungsluft entweichen kann. Die Rohre der Entlastungsleitung bis zum Austritt aus der Testzelle sind mit gewöhnlicher Isolierung isoliert. Die Leitung aus der Testzelle zum LOX-Becken ist nicht isoliert.

Der Innendurchmesser der Entlastungsleitung beträgt  $d_{i,LOX,Ent} = 1,5 \cdot d_n$  bis zur Vereinigung mit der Leitung von der Prüflingschnittstelle. Die Wandstärke der Rohre in diesem Bereich ist  $r_{Wand,LOX,Ent} = 0,05 \cdot d_n$ . Von der Prüflingschnittstelle bis zum Austreten aus der Testzelle gilt  $d_{i,LOX,Ent} = 3,51 \cdot d_n$ , mit  $r_{Wand,LOX,Ent} = 0,11 \cdot d_n$ . Vom Austreten bis zum LOX-Becken haben die Leitungen einen Innendurchmesser von  $d_{i,LOX,Aus} = 10,37 \cdot d_n$  und eine Wandstärke von  $r_{Wand,LOX,Aus} = 0,24 \cdot d_n$ . Alle Leitungen des LOX-Systems sind aus einem nichtrostenden austenitischen Stahl gefertigt.

### 4.3. Aufbau: LNG-System

Analog zum LOX-System ist das LNG System in zwei Leitungen unterteilt. Die Hauptleitung, welche ihrerseits erneut in zwei Abschnitte getrennt wird und die Entlastungsleitung. In Abbildung 4.4 ist der erste Abschnitt der Hauptleitung dargestellt, der sich vom LNG

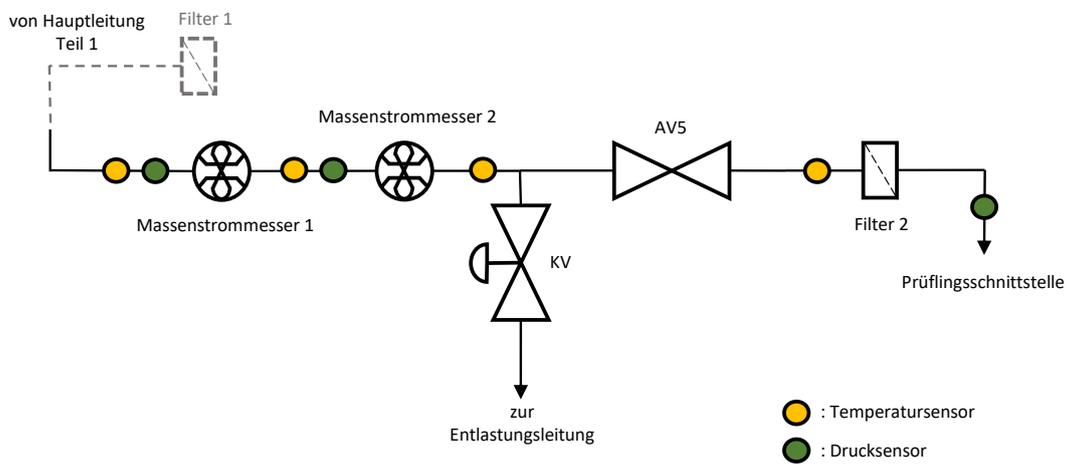
Run Tank bis zum ersten Filter erstreckt und den Bypass vom Lagertank beinhaltet. Vom LNG Lagertank fließt das LNG in die Hauptleitung um eine Konditionierung der Leitungen zu ermöglichen. Im Bypass vom Lagertank in die Hauptleitung befinden sich ein Druck- und ein Temperatursensor. Auch alle Sensoren des LNG-Systems arbeiten mit einer Abtastfrequenz von  $100\text{ Hz}$ . Der Weg in die Hauptleitung wird durch AV3 kontrolliert. AV2 ermöglicht das abfließen zur LNG-Fackel, wo überschüssiges LNG kontrolliert verbrannt wird. Nach der Konditionierung wird die Hauptleitung über den LNG Run Tank versorgt. Der Tank ist für einen Betriebsdruck von  $p_{LNG,RunTank} = 6,91 \cdot p_n$  aus-



**Abbildung 4.4.:** Vereinfachtes Schema der Hauptleitung des LNG Systems Abschnitt 1

gelegt und besitzt ein Fassungsvermögen von  $V_{LNG,RunTank} = 3,78 \cdot V_n$ . Der Tankdruck wird von einem Drucksensor aufgezeichnet. Direkt stromab des Tanks befindet sich ein Temperatursensor mit anschließendem HV. Darauf folgt AV1, welches die Speisung aus dem LNG Run Tank kontrolliert. Weiter stromab trifft die Leitung vom LNG Lagertank auf die Hauptleitung. Ab diesem Punkt ist der Weg des LNG für Konditionierung und Betrieb mit dem LNG Run Tank identisch. Als nächstes kommt ein HV und die erste Abzweigung zur Entlastungsleitung, welche über AV4 kontrolliert wird. Stromab der Abzweigung befindet sich ein Temperatursensor. Auf diesen folgt der erste Filter, welcher Unreinheiten aus der Strömung entfernt. Alle Rohre des ersten Abschnitts der Hauptleitung sind vollständig vakuumisoliert. Der Innendurchmesser der Rohre der Hauptleitung ist  $d_{i,LNG,Haupt1} = 2,94 \cdot d_n$ . Die Leitungen vom Lagertank bis zur Abzweigung in die Hauptleitung haben einen Innendurchmesser von  $d_{i,LNG,Lagertank} = 0,74 \cdot d_n$ . Die Wandstärke aller Leitungen im ersten Abschnitt ist konstant. Die Durchmesser aller Filter entsprechen dem jeweiligen Rohrinne Durchmesser.

Der zweite Abschnitt der Hauptleitung, welcher am ersten Filter beginnt und an der Prüflingsschnittstelle endet, ist in Abbildung 4.5 gezeigt. Nach dem Filter folgen ein Druck- und ein Temperatursensor. Weiter stromab befindet sich der erste Massenstrommesser. Ein Druck- und ein Temperatursensor liegen stromab des Massenstrommessers. Auf diese folgt der zweite Massenstrommesser. Die Massenstrommesser sind wie beim LOX-System auch als Turbinenmessgerät gestaltet. Auf den Massenstrommesser folgt ein weiterer Temperatursensor. Stromab des Temperatursensors folgt die zweite Abzweigung in die Entlastungsleitung, welche durch ein KV kontrolliert wird. Anschließend kommt AV5 welches die Strömung zur Prüflingsschnittstelle kontrolliert. Darauf folgen ein Temperatursensor und der zweite Filter. Direkt stromauf der Prüflingsschnittstelle befindet sich ein Drucksensor. Alle Rohre des zweiten Abschnitts der Hauptleitung sind vollständig vakuumisoliert. Der

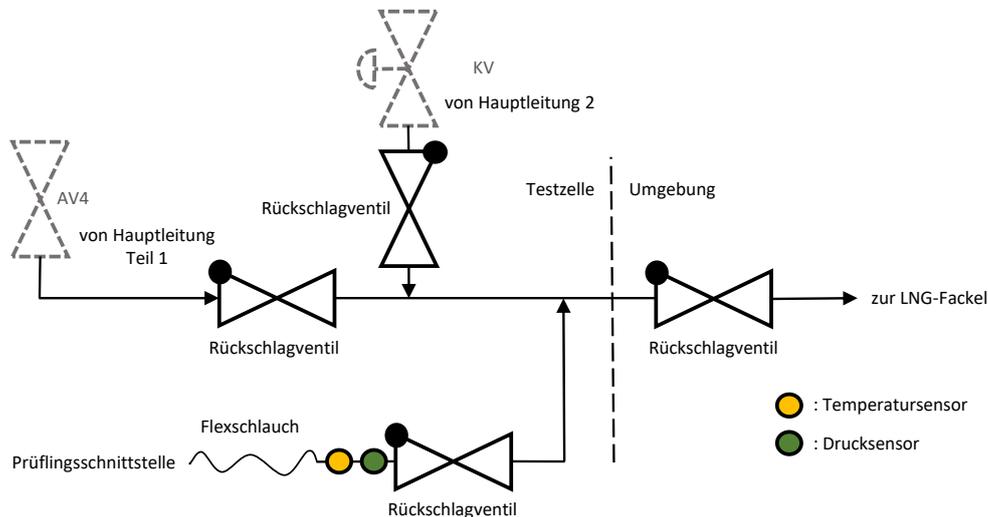


**Abbildung 4.5.:** Vereinfachtes Schema der Hauptleitung des LNG Systems Abschnitt 2

Innendurchmesser der Leitung nach dem ersten Filter ist  $d_{i,LNG,Haupt1} = 2,94 \cdot d_n$  und verringert sich dann auf  $d_{i,LNG,Haupt2} = 1,51 \cdot d_n$ . Bis zu AV5 bleibt der Durchmesser bei diesem Wert. Stromab des Ventils bis zur Prüflingsschnittstelle wird der Innendurchmesser auf  $d_{i,LNG,Haupt2} = 1,18 \cdot d_n$  reduziert. An der Schnittstelle zum Prüfling befindet sich eine Blende mit einem Durchmesser von  $d_{i,LNG,Blende} = 0,45 \cdot d_n$ . Die Wandstärken im zweiten Abschnitt sind ebenfalls konstant.

Der letzte Abschnitt des LNG-Systems ist die Entlastungsleitung, welche in Abbildung 4.6 gezeigt ist. Wie beim LOX-System sind hier die Ventile, welche bereits in den vorigen Abschnitten gezeigt sind, gestrichelt und grau dargestellt. Zunächst tritt die Abzweigung aus dem ersten Abschnitt der Hauptleitung in die Entlastungsleitung ein.

Es folgt ein Rückschlagventil um Rückströmung in die Hauptleitung zu verhindern. Weiter stromab mündet die Abzweigung aus dem zweiten Abschnitt der Hauptleitung in die Entlastungsleitung. Diese ist ebenfalls mit einem Rückschlagventil versehen. Von der Prüflingsschnittstelle wird mit einem Flexschlauch der Weg zum Eingang der Entlastungsleitung überbrückt. Direkt stromab des Eingangs in die Entlastungsleitung befinden sich ein Druck- und Temperatursensor. Auf diese folgt ein Rückschlagventil. Anschließend werden die Leitungen vom Eingang der Entlastungsleitung und den anderen beiden Abschnitten der Hauptleitung zusammengeführt. Die Entlastungsleitung führt aus der Testzelle hinaus in die Umgebung und zur LNG-Fackel, wo das LNG kontrolliert verbrannt wird. Stromauf der Fackel befindet sich ein Rückschlagventil. Die Rohre der Entlastungsleitung bis zum Austritt aus der Testzelle sind mit gewöhnlicher Isolierung isoliert. Die Leitung aus der Testzelle zur LNG-Flare ist nicht isoliert. Der Innendurch-



**Abbildung 4.6.:** Vereinfachtes Schema der Entlastungsleitung des LNG Systems

messer der Entlastungsleitung beträgt  $d_{i,LNG,Ent} = 1,5 \cdot d_n$  bis zur Vereinigung mit der Leitung von der Prüflingsschnittstelle. Die Wandstärke der Rohre in diesem Bereich ist  $r_{Wand,LNG,Ent} = 0,05 \cdot d_n$ . Von der Prüflingsschnittstelle bis zum Austreten aus der Testzelle gilt  $d_{i,LNG,Ent} = 2,941 \cdot d_n$ , mit  $r_{Wand,LNG,Ent} = 0,11 \cdot d_n$ . Vom Austreten bis zur LNG-Fackel haben die Leitungen einen Innendurchmesser von  $d_{i,LNG,Aus} = 6,94 \cdot d_n$  und eine Wandstärke von  $r_{Wand,LOX,Aus} = 0,17 \cdot d_n$ . Alle Leitungen des LNG-Systems sind aus einem nichtrostenden austenitischen Stahl gefertigt.

## 4.4. Testablauf: LOX-System

In diesem Abschnitt wird der Ablauf des Tests am LOX-System beschrieben. Der gewählte Testlauf entstammt der Abnahmequalifikation des P8.3 und war zum Beginn dieser Arbeit der aktuellste verfügbare Testlauf. Er wurde genutzt um den Druckabfall über den Filter vor der Prüflingsschnittstelle zu bestimmen. Eine Übersicht über die Testsequenz des ersten Testlaufs kann aus Tabelle 4.1 gewonnen werden. Die gezeigten Ventelsequenzen werden, mittels eines automatisierten Matlabskripts, aus den Rohdaten extrahiert, zeitlich geordnet, entsprechend aufbereitet und als einzelne Textdatei ausgegeben.

Zu Beginn des Testlaufs bei  $t = 0$  sind alle Automatikventile geschlossen, lediglich das AV4 der Entlastungsleitung und das AV2 im Bypass zum LOX-Becken sind geöffnet. Zum Zeitpunkt  $t = 0,04$  öffnet das Ventil vom Bypass zum Lagertank und zur selben Zeit schließt das Bypassventil zum LOX-Becken. Der LOX kann vom Lagertank in die Hauptleitung fließen. Bei  $t = 0,13$  wird das Kontrollventil auf 3% Öffnung gefahren. Der LOX strömt weiterhin über die erste Abzweigung der Entlastungsleitung zum LOX-Becken. Diese wird bei  $t = 0,15$  geschlossen und der LOX nimmt den Weg über das KV durch die Entlastungsleitung zum LOX-Becken. Zum Zeitpunkt  $t = 0,17$  öffnet das AV5 an der Prüflingsschnittstelle. Das KV wird bei  $t = 0,18$  vollständig geschlossen und der gesamte LOX fließt über die Prüflingsschnittstelle in die Entlastungsleitung. Zum Zeitpunkt  $t = 0,314$  öffnet das AV4 der Entlastungsleitung und schließt nach  $\Delta t = 0,01$  wieder. Das KV wird bei  $t = 0,33$  auf 10% Öffnung gefahren. Mehr LOX fließt durch das KV in die Entlastungsleitung und der Massenstrom des LOX, welches durch die Prüflingsschnittstelle fließt, wird geringer. Zum Zeitpunkt  $t = 0,34$  wird das KV komplett geschlossen. Bei  $t = 0,41$  öffnet zuerst das Bypassventil zum LOX-Becken und anschließend schließt das Ventil zum Lagertank. Der restliche LOX in der Bypassleitung kann so zum LOX-Becken entweichen.

Bei  $t = 0,43$  öffnet das Ventil zum Run Tank und die Hauptleitung wird mit LOX aus diesem versorgt. Zum Zeitpunkt  $t = 0,62$  öffnet erneut das Ventil zum Lagertank und wird nach  $\Delta t = 0,01$  wieder geschlossen. Direkt danach, bei  $t = 0,63$  wird das AV4 zur Entlastungsleitung geöffnet und nach  $t = 0,01$  geschlossen. Zum Zeitpunkt  $t = 0,64$  wird das KV auf 10% Öffnung gefahren. Der Massenstrom durch die Prüflingsschnittstelle verringert sich. Nach  $\Delta t = 0,01$  wird das KV geschlossen. Zum Zeitpunkt  $t = 0,8$  schließt das AV5 zur Prüflingsschnittstelle. Das KV wird bei  $t = 0,8$  auf 2% Öffnung gefahren. Das AV1 zum Run Tank schließt zum Zeitpunkt  $t = 0,99$  und das AV4 der Entlastungsleitung bei  $t = 0,99 \cdot t_n$ . Diese Konfiguration bleibt bis zum Testende, bei  $t = 1,0$ , erhalten.

**Tabelle 4.1.:** LOX-Testablauf

Zeit $t$	Aktion
0, 04	AV2 Bypass LOX-Becken schließt
0, 04	AV3 Bypass Lagertank öffnet
0, 13	KV auf 3% Öffnung gefahren
0, 15	AV4 Entlastungsleitung schließt
0, 17	AV5 Prüflingsschnittstelle öffnet
0, 18	KV vollständig geschlossen
0, 31	AV4 Entlastungsleitung öffnet
0, 32	AV4 Entlastungsleitung schließt
0, 33	KV auf 10% Öffnung gefahren
0, 34	KV vollständig geschlossen
0, 41	AV2 Bypass LOX-Becken öffnet
0, 41	AV3 Bypass Lagertank schließt
0, 43	AV1 Run Tank öffnet
0, 62	AV3 Bypass Lagertank öffnet
0, 63	AV3 Bypass Lagertank schließt
0, 63	AV4 Entlastungsleitung öffnet
0, 64	AV4 Entlastungsleitung schließt
0, 64	KV auf 10% Öffnung gefahren
0, 65	KV vollständig geschlossen
0, 80	AV5 Prüflingsschnittstelle schließt
0, 80	KV auf 2% Öffnung gefahren
0, 99	AV1 Run Tank schließt
0, 99	AV4 Entlastungsleitung öffnet

## 4.5. Testablauf: LNG-System

In diesem Abschnitt wird der Ablauf des Tests am LNG-System beschrieben. Bisher ist nur ein Abnahmetest mit dem Treibstoff LNG am P8.3 durchgeführt worden, dementsprechend wird dieser für diese Arbeit genutzt. Aufgrund der Länge des Testlaufs wird ein repräsentativer Ausschnitt der Daten für die Simulation gewählt. Die Beschreibung in diesem Abschnitt behandelt nur diesen Ausschnitt und nicht den kompletten Testlauf. Eine Übersicht über die Testsequenz des LNG-Testlaufs ist in Tabelle 4.2 gezeigt. Die Erstellung der gezeigten Ablaufsequenz wird analog zum LOX-System durchgeführt.

Vor dem Start des Testlaufs wird der Run Tank mit LNG aus dem Lagertank befüllt und die Handventile geöffnet. Zu Beginn des Testlaufs, bei  $t = 0$ , ist das AV1 des Run Tanks, der Entlastungsleitung, des Bypass zur LNG-Fackel und das Ventil zur Prüflingschnittstelle geschlossen. Das AV3 des Bypass zum Lagertank ist geöffnet und das KV auf 3% Öffnung gefahren. Zum Zeitpunkt  $t = 0,02$  öffnet das AV1 des Run Tank. Nach  $\Delta t = 0,003$  schließt es wieder. Anschließend öffnen das AV4 der Entlastungsleitung, bei  $t = 0,02$  und das AV5 der Prüflingschnittstelle, bei  $t = 0,03$ . Nach  $\Delta t = 0,01$  schließt das AV4 der Entlastungsleitung. Zum Zeitpunkt  $t = 0,03$  schließt das AV5 der Prüflingschnittstelle.

Als nächstes öffnet das AV2 des Bypass zur LNG-Fackel, bei  $t = 0,09$  und das AV3 des Bypass zum Lagertank schließt. Zum Zeitpunkt  $t = 0,1$  öffnet das AV1 zum Run Tank und die Hauptleitung wird mit LNG aus dem Run Tank versorgt. Das KV wird bei  $t = 0,1$  auf 1,5% Öffnung gefahren. Bei  $t = 0,13$  wird die Öffnung des KV auf 2% erhöht. Das AV3 des Bypass zum Lagertank öffnet zum Zeitpunkt  $t = 0,15$ . Kurz danach, bei  $t = 0,15$  öffnet das AV4 der Entlastungsleitung. Nach  $\Delta t = 0,01$  schließen die Automatikventile des Bypass zum Lagertank und der Entlastungsleitung wieder.

Das KV wird auf 5% Öffnung gefahren und anschließend auf 2% Öffnung reduziert. Darauf folgt ein Öffnen, bei  $t = 0,18$  und nach  $\Delta t = 0,004$  Schließen des AV5 zur Prüflingschnittstelle. Das KV wird auf 1,5 % Öffnung reduziert. Anschließend folgen ein kurzes Öffnen der AV4 der Entlastungsleitung und des Lagertanks mit unterschiedlichen Öffnungszeiten. Von  $t = 0,29$  bis  $t = 0,53$  werden verschiedene Öffnungen des KV gefahren. Zunächst eine Öffnung von 5%, welche nach  $\Delta t = 0,05$  auf 2% reduziert wird. Eine Erhöhung auf 20% Öffnung findet bei  $t = 0,31$  statt. Nach  $\Delta t = 0,1$  wird die Öffnung auf 2% reduziert. Bei  $t = 0,53$  wird das KV geschlossen.

Anschließend wird das AV3 des Bypass zum Lagertank geöffnet und geschlossen, ebenso das AV4 zur Entlastungsleitung. Das KV wird zum Zeitpunkt  $t = 0,55$  auf 4% Öffnung gefahren und nach  $\Delta t = 0,01$  geschlossen. Bei  $t = 0,56$  wird das AV5 zur Prüflings-

schnittstelle geöffnet und LNG kann, für  $\Delta t = 0,15$ , vom Run Tank durch die Blende der Prüflingsschnittstelle strömen und wird vom Flexschlauch in die Entlastungsleitung geleitet. Zum Zeitpunkt  $t = 0,71$  schließt das AV1 zum Run Tank und nach  $\Delta t = 0,01$  öffnet das AV3 des Bypass zum Lagertank. Diese Konfiguration bleibt bis zum Testende, bei  $t = 1$  erhalten.

**Tabelle 4.2.:** LNG-Testablauf

Zeit $t$	Aktion	Zeit $t$	Aktion
0.02	AV1 Run Tank öffnet	0.26	AV4 Entlastungsleitung öffnet
0.02	AV1 Run Tank schließt	0.26	AV4 Entlastungsleitung schließt
0.02	AV4 Entlastungsleitung öffnet	0.27	AV3 Bypass zum Lagertank öffnet
0.03	AV5 Prüflingsschnittstelle öffnet	0.27	AV3 Bypass zum Lagertank schließt
0.03	AV4 Entlastungsleitung schließt	0.27	AV4 Entlastungsleitung öffnet
0.03	AV5 Prüflingsschnittstelle schließt	0.28	A4 Entlastungsleitung schließt
0.09	AV2 Bypass zur LNG-Fackel öffnet	0.29	KV auf 5% Öffnung gefahren
0.09	AV3 Bypass zum Lagertank schließt	0.290	KV auf 2% Öffnung gefahren
0.10	AV1 Run Tank öffnet	0.31	KV auf 20% Öffnung gefahren
0.10	KV auf 1,5% Öffnung gefahren	0.41	KV auf 2% Öffnung gefahren
0.13	KV auf 2% Öffnung gefahren	0.53	KV vollständig geschlossen
0.15	AV3 Bypass zum Lagertank öffnet	0.54	AV3 Bypass zum Lagertank öffnet
0.15	AV4 Entlastungsleitung öffnet	0.54	AV3 Bypass zum Lagertank schließt
0.16	AV3 Bypass zum Lagertank schließt	0.54	AV4 Entlastungsleitung öffnet
0.16	AV4 Entlastungsleitung schließt	0.55	AV4 Entlastungsleitung schließt
0.16	KV auf 5% Öffnung gefahren	0.55	KV auf 4% Öffnung gefahren
0.17	KV auf 2% Öffnung gefahren	0.56	KV vollständig geschlossen
0.18	AV5 Prüflingsschnittstelle öffnet	0.56	AV5 Prüflingsschnittstelle öffnet
0.18	AV5 Prüflingsschnittstelle schließt	0.71	AV1 Run Tank schließt
0.21	KV auf 1,5% Öffnung gefahren	0.72	AV3 Bypass zum Lagertank öffnet

# 5. EcosimPro-Modell

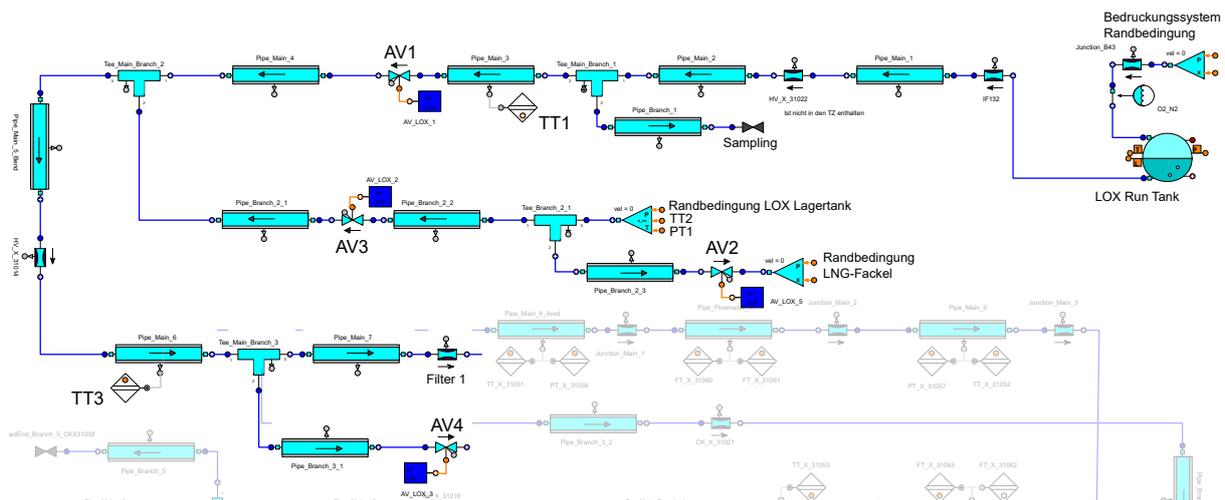
In diesem Kapitel werden die EcosimPro/ESPSS Modelle der beiden Treibstoffleitungen beschrieben. Zuerst wird eine Übersicht über die Modelle gegeben, welche die Topologie und die wichtigsten Parameter beinhaltet. Anschließend wird der Wärmeübergang der Rohrleitungen erläutert. Zum Schluss werden Anfangs- und Randbedingungen behandelt.

## 5.1. Modellübersicht LOX

Wie bereits in Kapitel 4 gehandhabt, sind auch die EcosimPro/ESPSS Modelle in LOX- und LNG-System unterteilt. Analog zur Prüfstandbeschreibung, wird zuerst die Hauptleitung, in zwei Abschnitten und anschließend die Entlastungsleitung vorgestellt. Für das Modell werden einige globale Variablen definiert. Dazu gehören die Erdbeschleunigung, welche mit  $g = 9,806 \frac{m}{s^2}$  in z-Richtung berücksichtigt wird, eine globale DämpfungsvARIABLE welche zu  $D = 0,7$  gewählt wird und der Umgebungsdruck, sowie die Umgebungstemperatur. Die DämpfungsvARIABLE soll eine gute Glättung von numerischen Druckspitzen, ohne große Beeinflussung physikalischer Effekte ermöglichen und im Bereich von 0,3 bis 1,0 gewählt werden [24]. In vorherigen Arbeiten erwies sich der Wert für  $D = 0,7$  bereits als geeignet, was sich in den Modellen dieser Arbeit bestätigt. Für die Umgebungsbedingungen wird angenommen, dass in der Testzelle, deren Tore während des Testlaufs offen sind, die selbe Temperatur herrscht wie, außerhalb der Testzelle, im Freien. Da in den Abnahmetest immer nur ein System benutzt wurde, können die Sensoren der nicht genutzten Seite für eine Bestimmung der Umgebungsbedingungen herangezogen werden. Im Falle des LOX-Systems werden die Sensoren des LNG-Systems mit den Wetterdaten [25] für den Versuchstag verglichen. Der vom Sensor aufgezeichnete Wert fällt in den Bereich zwischen der Maximal- und Minimaltemperatur der Wetterdaten, sodass für die Umgebungstemperatur der Wert  $T_{atm} = 292 K$  angenommen wird. Für den Umgebungsdruck wird der, mit der barometrischen Höhenformel berechnete, Druck mit ebenfalls einem Sensor des LNG-Systems verglichen und der Umgebungsdruck so zu  $p_{atm} = 0.98124 bar$  bestimmt.

### 5.1.1. Hauptleitung

In Abbildung 5.1 ist das Modell des ersten Abschnitts der Hauptleitung abgebildet. Die Hauptleitung beginnt mit der `VolPx_TMD` Komponente, welche das Bedruckungssystem modelliert, gefolgt von einer `Junction` Komponente und der Definition des Arbeitsfluides mit der `WorkingFluid` Komponente. Als Hauptfluid wird Sauerstoff als reales Gas und als nicht kondensierbares Fluid Stickstoff, welches als Bedruckungsgas dient, gewählt. Weiter geht es mit dem LOX Run Tank, welcher durch eine `Tank_Sphere` Komponente modelliert wird. Das Volumen des Tanks wird durch ein Festlegen des Radius auf  $r_{RunTank,LOX} = 23,86 \cdot d_n$  definiert. Die Kennwerte, die mit dem Material des Tanks zusammenhängen, wie Wandwärmeleitfähigkeit  $k_W = 3,472 \cdot k_n$ , Wanddichte  $\rho_W = 2,31 \cdot \rho_n$  und spezifische Wärmekapazität  $c_{p,W} = 3,5 \cdot c_{p,n}$  werden direkt eingegeben. Die Wanddicke entspricht  $d_W = 2,87 \cdot d_n$ .



**Abbildung 5.1.:** Ecosim/ESPSS-Modell der Hauptleitung des LOX Systems, erster Abschnitt. Restliches Modell in 30% Transparenz.

Ein Abkochen des LOX findet vor dem Testlauf statt und passiert nicht währenddessen, weshalb der Wärmeaustausch mit der Wand auf die Option „NoBoiling“ gesetzt wird. Dies erlaubt nur natürliche Konvektion, ohne ein Kochen des Fluides zu berechnen. Für die Interaktion zwischen Gas- und Flüssigkeitsschnittstelle wird der Wärme- und Massenaustausch auf „noExchange“ festgelegt, was den Austausch zwischen den beiden Seiten unterdrückt. Während der Bedruckung des LOX ist dieses im überkritischen Zustand. Die Austauschoption „noExchange“ wird für einen Tank im überkritischen Zustand empfohlen [24].

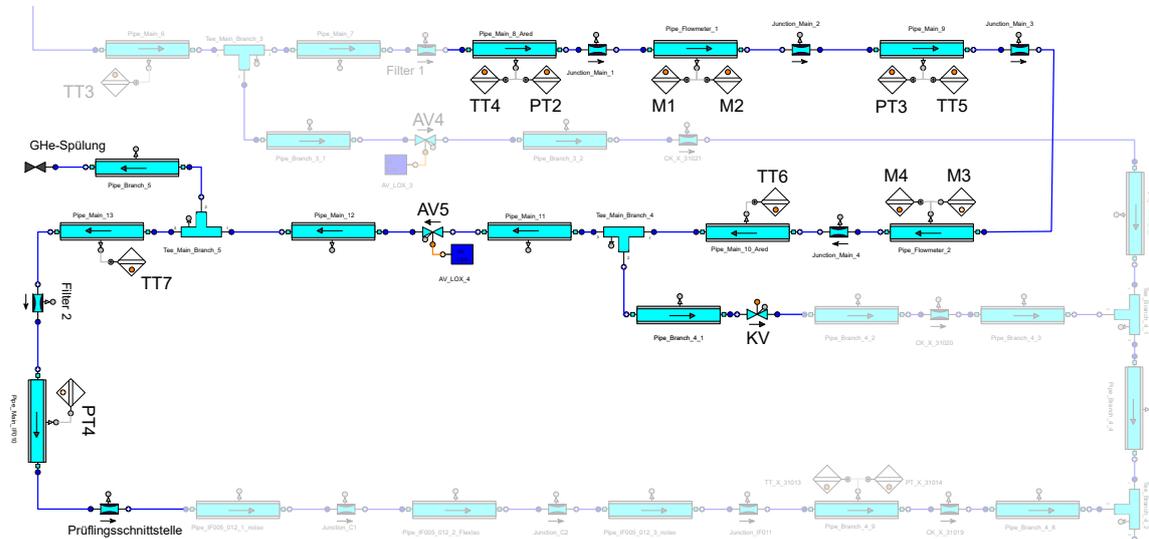
Nach dem Tank folgt eine Reihe aus **Pipe** und **Junction** Komponenten, die das reale Leitungssystem widerspiegeln. Die Längen der Rohrstücke, sowie die Biegungen mit Biege winkeln und Biegeradien werden als Eingabeparameter den **Pipe** Komponenten übergeben. Die Rohrleitungen sind nach DIN EN 10217-7 ausgelegt, sodass eine Rauheit der inneren Rohroberfläche von  $R = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$  angenommen wird [26]. Die Abzweigung zum Sampling mit dem zugehörigen AV, welches während des Testlaufs dauerhaft geschlossen bleibt, wird über eine **DeadEnd** Komponente modelliert. Anschließend folgt das Automatikventil des Run Tank AV1. Für alle Automatikventile wird eine lineare Ventilcharakteristik angenommen. Die Zeitkonstante für die Öffnung und das Schließen wird über die Differenz von Offenmeldung zu Geschlossenmeldung, bzw. für das Schließen genau umgekehrt, aus den Daten vom Prüfstand ermittelt. Die Durchflusskoeffizienten  $Kv$  der Ventile sind aus den Datenblättern bekannt. Die Widerstandsbeiwerte für die Ventile werden aus den  $Kv$ -Werten bestimmt. AV1 besitzt eine Zeitkonstante zur Öffnung von  $\tau_{open} = 0,374 \cdot t_n$ , eine Zeitkonstante zum Schließen von  $\tau_{close} = 0,056 \cdot t_n$  und einen Widerstandsbeiwert von  $\zeta = 0,36 \cdot \zeta_n$ . Der Durchmesser bei maximaler Öffnung des Ventils beträgt  $d = 2,67 \cdot d_n$ . Die weiteren Automatikventile werden auf die exakt selbe Weise modelliert, sodass diese nun nicht mehr beschrieben wird. Die Parameter der anderen Automatikventile können der Tabelle A.1 im Anhang entnommen werden. Wie in Kapitel 3.2.4 beschrieben, liest die **AV\_LOX** Komponente die Ventilsequenz aus einer externen Textdatei ein und gibt diese an AV1 weiter und kontrolliert somit die Schaltung des Ventils.

Der Bypass vom LOX Lagertank trifft nach AV1 auf die Hauptleitung. Die beiden Leitungen werden über eine **Tee** Komponente verbunden. Die **Tee** Komponente benötigt Widerstandsbeiwerte  $\zeta$  für jeden Ein- bzw. Ausgang. Diese sind nach Richtwerten aus der Literatur bestimmt [27] und unterscheiden ein Zusammentreffen oder Aufteilen der Leitungen. Der Lagertank wird durch eine **VolPT\_TMD** Komponente modelliert. Über AV2 ist der Bypass mit einer weiteren **VolPx\_TMD** Komponente verbunden, die das LOX-Becken darstellt. AV3 kontrolliert den Zufluss in die Hauptleitung. Nach dem Zusammentreffen von Bypass und Hauptleitung folgt ein Handventil, welches durch eine **Junction** Komponente modelliert wird. Die Handventile sind während des gesamten Testlaufs offen, sodass die Modellierung über eine **Ventil** Komponente nicht nötig ist. Analog zur Bestimmung des Widerstandsbeiwerts der Automatikventile wird auch für die Handventile aus dem  $Kv$ -Wert der entsprechende Widerstandsbeiwert errechnet und der Druckabfall über die **Junction** Komponente berücksichtigt.

Nach dem HV folgt eine Stromaufteilung über eine **Tee** Komponente in die Entlastungsleitung welche über AV4 kontrolliert wird. Der zweite Zweig führt die Hauptleitung weiter

und endet im ersten Abschnitt im Filter, der über eine **Junction** Komponente modelliert wird. Die ESPSS-Bibliothek beinhaltet zwar auch eine **Filter** Komponente, für diese ist jedoch eine genaue Kenntnis der Filterparameter notwendig. Zu den im Prüfstand verbauten Filtern gibt es keine genaueren Informationen, sodass diese durch einen Druckabfall in Form der **Junction** Komponente modelliert werden. Die Modelle werden zunächst mit  $\zeta_{Filter} = 0$  simuliert. Anschließend wird die Druckdifferenz zwischen Modell und Sensordaten festgestellt und daraus ein Widerstandsbeiwert errechnet, der dann in den anschließenden Simulationen verwendet wird. Dieser wird iterativ angepasst um ein möglichst präzises Ergebnis zu erzielen. Der Widerstandsbeiwert des ersten Filters wird zu  $\zeta_{Filter1} = 4,08 \cdot \zeta_n$  definiert.

Der zweite Teil der Hauptleitung ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Er beginnt nach dem ersten Filter und mit den Druck- und Temperatursensoren, PT2 und TT4, zur Bestimmung des Massenstroms. Anschließend folgt der erste Massenstrommeter in doppelter Ausführung, M1 und M2, welcher als Rohr äquivalenter Länge zum realen Massenstrommeter modelliert ist. Eine spezielle Unterscheidung in der Art des Massenstrommeters ist nicht möglich. Die Tatsache, dass die Massenstrommeter als Turbinenmessgeräte ausgeführt sind, kann nicht berücksichtigt werden.



**Abbildung 5.2.:** Ecosim/ESPSS-Modell der Hauptleitung des LOX Systems, zweiter Abschnitt. Restliches Modell in 30% Transparenz.

Auf den ersten Massenstrommeter folgen die Sensoren für den zweiten Massenstrommeter, PT3 und TT5. Auch der zweite Massenstrommeter ist als Rohr äquivalenter Länge zum realen Massenstrommeter modelliert. Die zweite Abzweigung in die Entlastungslinie wird

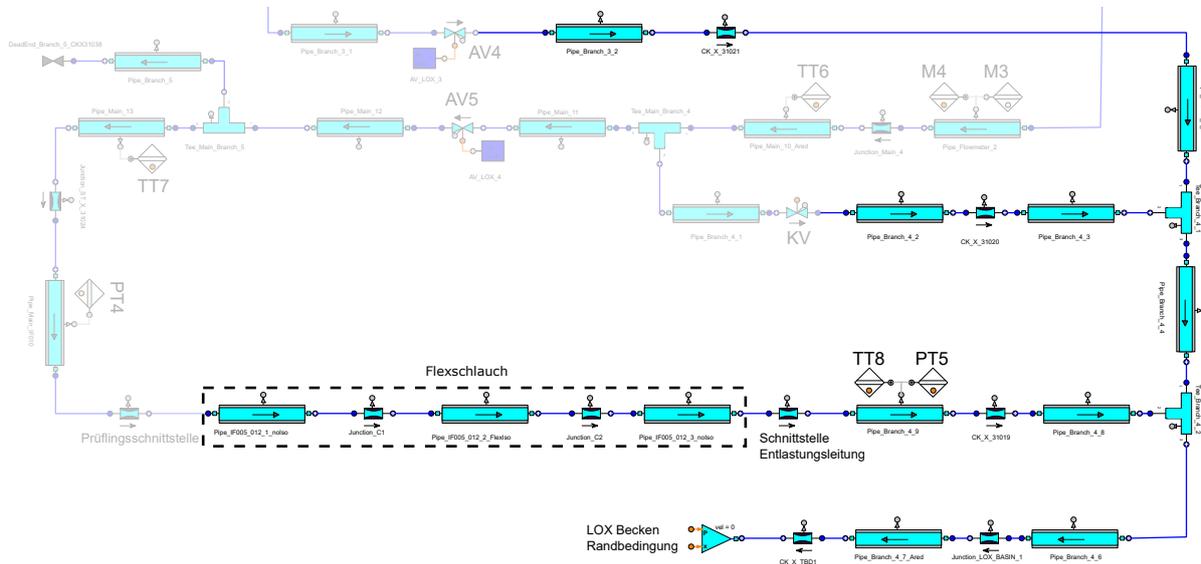
mit einer **Tee** Komponente modelliert und über das KV kontrolliert. Die Widerstandsbeiwerte werden mittels der Auslegungsrechnung des Kegels des KV bestimmt.  $\zeta_{KV}$  wird für einige Öffnungspositionen definiert und Zwischenwerte interpoliert. Die Position des KV wird nicht über eine Regelung bestimmt, sondern die reale zeitaufgelöste KV-Position des Testlaufs dem Modell aufgeprägt. Um eine möglichst genaue Repräsentation der realen KV-Position zu gewährleisten und zu ermöglichen, dass das modellierte Ventil dem aufgeprägten Positionssignal ohne Verzögerung folgen kann, ist die Zeitkonstante für das Öffnen und Schließen des Ventils sehr gering gewählt.

Nach der Abzweigung zur Entlastungsleitung folgt das Ventil zur Prüflingsschnittstelle AV5, welches den Zufluss des LOX zum Prüfling kontrolliert. Für ein Spülen der Leitungen am Prüfling wird eine GHe Leitung genutzt. Diese ist im Modell über eine kurze **Pipe** Komponente mit anschließendem **DeadEnd** modelliert. Es folgen Temperatur- und Drucksensoren für die Schnittstelle mit dem Prüfling, TT7 und PT4. Zwischen diesen ist der zweite Filter verbaut, welcher als **Junction** modelliert und durch einen Widerstandsbeiwert von  $\zeta_{Filter2} = 0,82 \cdot \zeta_n$  definiert ist. Die Blende an der Prüflingsschnittstelle, an der später Schubkammersysteme angeschlossen werden sollen, ist über eine **Junction** Komponente modelliert.

### 5.1.2. Entlastungsleitung

Das Modell der Entlastungsleitung ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Sie setzt den ersten Abschnitt der Hauptleitung nach dem AV4 und den zweiten Abschnitt der Hauptleitung nach dem KV fort. Jeweils nach den Ventilen befinden sich Rückschlagventile, welche über **Junction** Komponenten modelliert werden. In den Testläufen dieser Arbeit ist die Hauptleitung von der Prüflingsschnittstelle mit einem Flexschlauch in die Entlastungsleitung überbrückt. Die Überbrückung besitzt unterschiedliche Isolierungen, weshalb sie aus mehreren **Pipe** Komponenten besteht. Für das LOX- und das LNG-System wird die selbe Überbrückung genutzt, die Entlastungsleitungen der beiden Systeme besitzen allerdings unterschiedliche Durchmesser. Deshalb wird beim LOX-System eine Aufweitung zwischen Flexschlauch und Schnittstelle der Entlastungsleitung gesetzt, die den Durchmesser des Flexschlauch auf den der Entlastungsleitung kontinuierlich anpasst. Diese Aufweitung ist in der **Pipe** Komponente direkt stromauf der Schnittstelle der Entlastungsleitung enthalten. Stromab der Schnittstelle zur Entlastungsleitung folgen ein Temperatursensor TT8 und ein Drucksensor PT5. Anschließend kommt ein Rückschlagventil, welches erneut über eine **Junction** Komponente modelliert ist. Nach den Rückschlagventilen werden die Abzweigungen aus der Hauptleitung und die Leitung von der Schnittstelle der Entlastungs-

leitung über Tee Komponenten zu einer Leitung vereint. Diese Leitung führt aus der Testzelle hinaus und endet in einer Vo1Px\_TMD Komponente, die das LOX-Becken modelliert. Stromauf der Vo1Px\_TMD ist ein weiteres Rückschlagventil durch eine Junction modelliert.



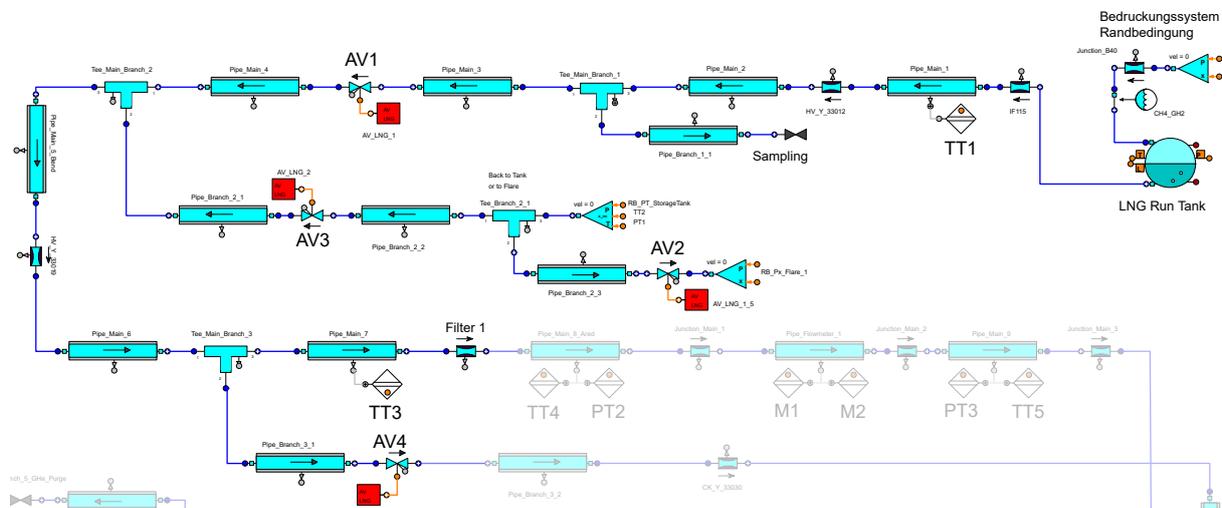
**Abbildung 5.3.:** Ecosim/ESPSS-Modell der Entlastungsleitung des LOX Systems. Restliches Modell in 30% Transparenz.

## 5.2. Modellübersicht LNG

Der Aufbau des LNG-Modells ist sehr ähnlich zu dem des LOX-Systems. Die Auswahl der Komponenten wird deshalb nicht mehr erläutert, es sei denn es gibt Abweichungen vom LOX-System. Es werden die einzelnen Abschnitte des LNG-Systems kurz beschrieben. Die globalen Variablen sind analog zum LOX-System auf  $g = 9,806 \frac{m}{s^2}$  und  $D = 0,7$  festgelegt. Auch beim LNG-System werden die Sensoren des ungenutzten Systems zur Bestimmung der Umgebungstemperatur verwendet. Der Testlauf fand im November statt. Dementsprechend liegen die Maximal- und Minimaltemperaturen aus der Wetteraufzeichnung für den Testtag zwischen  $T_{max} = 275,25 \text{ K}$  und  $T_{min} = 273,75 \text{ K}$  [25]. Die Sensoren am Eingang der Entlastungslinie zeigen einen höheren Wert an. Die Annahme in der Testzelle herrsche Außentemperatur wird verworfen und der Wert des Sensors  $T_S = T_{atm} = 287 \text{ K}$  als Umgebungstemperatur für das Modell verwendet. Die globale Variable für den Umgebungsdruck ist wie beim LOX-System  $p_{atm} = 0.98124 \text{ bar}$ .

### 5.2.1. Hauptleitung

Der erste Abschnitt der Hauptleitung des LNG-Systems ist in Abbildung 5.4 gezeigt. Sie beginnt mit einer `Vo1Px_TMD` Komponente, die das Bedruckungssystem abbildet. Anschließend werden die Arbeitsfluide in der `WorkingFluid` Komponente definiert. Als Hauptfluid wird Methan als reales Gas gewählt, da der Hauptbestandteil von LNG Methan ist [28]. Als nicht kondensierbares Gas zur Bedruckung wird Wasserstoff als perfektes Gas verwendet. Anschließend folgt der LNG Run Tank, welcher abgesehen vom Tankradius  $r_{RunTank,LNG} = 30,06 \cdot d_n$ , analog zum LOX Run Tank, als `Tank_Sphere` Komponente modelliert wird. Stromab des LNG Run Tank folgen eine Reihe Pipe und Junction Kom-



**Abbildung 5.4.:** Ecosim/ESPSS-Modell der Hauptleitung des LNG Systems, erster Abschnitt. Restliches Modell in 30% Transparenz.

ponenten, die das reale Leitungssystem modellieren. Der Temperatursensor TT1 befindet sich direkt nach dem LNG Run Tank. Ein HV folgt auf den Temperatursensor. Die Leitung zum Sampling wird über eine kurze Pipe Komponente mit anschließendem `DeadEnd` berücksichtigt. Es folgt das LNG Run Tank Ventil AV1, welches die LNG-Strömung aus dem LNG Run Tank kontrolliert. Die Tee Komponente vereint die Leitungen vom LNG Run Tank und vom Bypass zum LNG Lagertank. Der Bypass vom Lagertank, welcher durch eine `Vo1PT_TMD` Komponente integriert wird, wird von AV3 kontrolliert. Die LNG-Fackel ist über eine weitere `Vo1Px_TMD` Komponente enthalten. Das AV2 kontrolliert das Abströmen von LNG aus dem Lagertank zur LNG-Fackel. Weiter stromab der Zusammenführung von Bypass und Hauptleitung folgt ein weiteres HV und die erste Abzweigung in die Entlastungsleitung, welche über AV4 kontrolliert wird. Der erste Abschnitt der Hauptleitung endet mit dem Filter. Im LNG-System sind die selben Filter verbaut wie im



## 5.2.2. Entlastungsleitung

Die Entlastungsleitung des LNG-Systems vereint die Abzweigungen aus der Hauptleitung mit der Überbrückung von der Prüflingschnittstelle und führt diese aus der Testzelle hinaus zur LNG-Fackel. Das Modell der Entlastungsleitung ist in Abbildung 5.6 gezeigt. Stromab von AV4 und KV sind Rückschlagventile verbaut, welche über Junctions modelliert werden. Auf die Prüflingschnittstelle folgt, wie in Kapitel 5.1.2 bereits erklärt, der Flexschlauch. Im LNG-System ist eine Anpassung des Durchmessers nicht nötig, weshalb statt der Aufweitung ein gerades Rohrstück eingefügt wird. Die Pipe Komponente stromauf der Schnittstelle zur Entlastungsleitung besitzt im LNG-System daher einen konstanten Durchmesser. Stromab der Schnittstelle zur Entlastungsleitung befinden sich ein Temperatursensor TT8 und ein Drucksensor PT5 und ein Rückschlagventil. Anschließend werden die Abzweigungen aus der Hauptleitung und die Überbrückung mittels Tee Komponenten zu einer Leitung vereint. Die LNG-Fackel wird über eine Vo1Px\_TMD Komponente modelliert. Stromauf der LNG-Fackel befindet sich ein weiteres Rückschlagventil, welches als Junction ausgeführt ist.

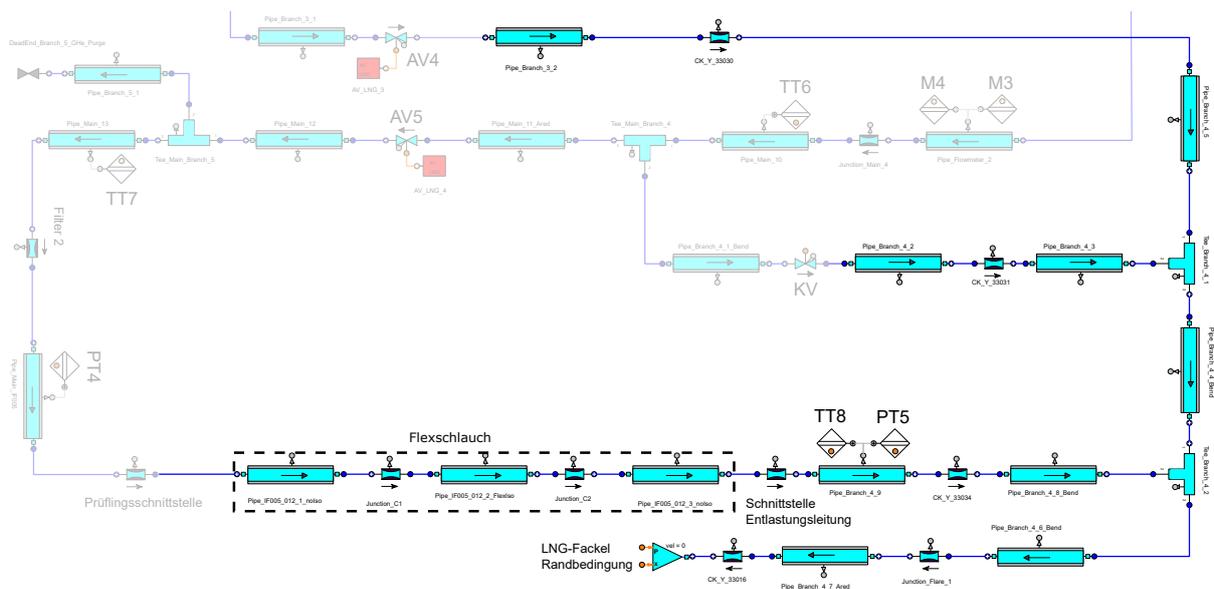


Abbildung 5.6.: Ecosim/ESPSS-Modell der Entlastungsleitung des LNG Systems. Restliches Modell in 30% Transparenz.

### 5.3. Wärmeübergang der Rohrleitungen

Der Wärmeübergang an den Rohrleitungen hat signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation. Deshalb soll in diesem Abschnitt die Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten erläutert werden. Es werden zwei Wärmeströme modelliert. Der konvektive innere Wärmeaustausch von Arbeitsfluid mit der Rohrrinnenfläche und der äußere Wärmeaustausch von Rohraußenfläche mit der Umgebung. Dieser besteht aus einem konvektiven und einem radiativen Anteil. Für den Wärmeaustausch mit der Umgebung wird ein konstanter Übergangskoeffizient bestimmt, dessen Berechnung später näher erläutert wird. Der innere Wärmeaustausch ließe sich ebenfalls durch einen konstanten Koeffizienten modellieren. Dieser Ansatz kann allerdings aufgrund der ständig wechselnden thermodynamischen Zustände und Strömungsbedingungen zu fehlerhaften oder ungenauen Ergebnissen führen. EcosimPro/ESPSS stellt verschiedene Korrelationen zur dynamischen Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten bereit. Für die Modelle dieser Arbeit wird die Korrelation „HT\_tube\_1ph“ gewählt, was einem einphasigen Wärmeübertragungsmodell entspricht. Der Grund für die Auswahl dieser Option ist, dass bei einem zweiphasigen Modell Probleme beim Übergehen von überkritischer zu zweiphasiger Strömung entstehen können, speziell in der Umgebung des kritischen Punktes. Dort sind Ableitungen nicht definiert und weisen keine endlichen Werte auf, was die Simulationsgeschwindigkeit stark verlangsamt [24].

#### 5.3.1. Wärmeübergang mit der Umgebung

Die Rohre der Hauptleitung sind mit einer Vakuumisolierung versehen, die Rohre der Entlastungsleitung mit einer gewöhnlichen Isolierung und weitere Rohre innerhalb und außerhalb der Testzelle besitzen keine Isolierung. All diese Fälle müssen bei der Berechnung des Wärmeübergangs mit der Umgebung berücksichtigt werden, weshalb sie in 4 unterschiedliche Bereiche unterteilt ist. Die in diesem Kapitel genutzten Gleichungen sind aus EN ISO 12241 [29] und dienen zur Berechnung der Wärmedämmung an betriebstechnischen Anlagen.

Für die vakuumisolierten Rohre wird ein Wärmeübergangskoeffizient von  $h_{vak} = 0 \frac{W}{m^2K}$  angenommen. Für die Rohre ohne Isolierung wird ein konvektiver und ein radiativer Anteil bestimmt und zwischen Rohren innerhalb und außerhalb der Testzelle unterschieden. Der Wärmeübergangskoeffizient durch turbulente Konvektion **außerhalb** der Testzelle ergibt

sich nach der Gleichung

$$\alpha_K = 8,9 \cdot \frac{v_W^{0,9}}{D_R^{0,1}} \text{ für } v_W \cdot D_R > 8,55 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s}, \quad (5.1)$$

wobei  $v_W$  die Windgeschwindigkeit außerhalb der Testzelle und  $D_R$  der Rohrdurchmesser ist [29]. Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit wird eine Karte der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von Baden-Württemberg herangezogen [30]. Mittels dieser Karte wird die Windgeschwindigkeit zu  $v_{W_{ind}} = 4,2 \frac{m}{s}$  bestimmt. Die Bedingung  $v_W \cdot D_R > 8,55 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{s}$  ist erfüllt. Mit diesen Angaben berechnet sich der Wärmeübergangskoeffizient zu  $\alpha_K = 35,434 \frac{W}{m^2K}$ .

Anschließend wird der radiative Anteil des Wärmeübertragungskoeffizienten mit der Gleichung

$$\alpha_S = \varepsilon \cdot C_S \cdot \frac{\left(\frac{T_R}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_U}{100}\right)^4}{T_R - T_U} \quad (5.2)$$

bestimmt [29]. Hierbei ist  $T_R$  die Temperatur der Rohraußenfläche und  $T_U$  die Temperatur der Umgebungsluft.  $\varepsilon$  ist der Emissionsgrad der Rohraußenfläche, und  $C_S = 5,67 \frac{W}{m^2K^4}$  der Strahlungskoeffizient eines schwarzen Strahlers. Die Temperatur der Rohraußenseite wird nach unten durch die Fluidtemperatur abgeschätzt. Als Temperatur für die Umgebungsluft wird der Wert der Außentemperatur der Wetteraufzeichnung [25] verwendet. Der Emissionsgrad der Außenseite der Rohrleitungen wird mit Tabellenwerten für matten Stahl zu  $\varepsilon = 0,6$  bestimmt [31]. Daraus ergibt sich ein radiativer Wärmeübergangskoeffizient von  $\alpha_S = 1,04$ . Der Gesamtwärmeübergangskoeffizient, bestehend aus dem konvektiven und dem radiativen Anteil, ist somit  $\alpha_{K+S} = 36,474 \frac{W}{m^2K}$ .

Der konvektive Anteil des Wärmeübergangskoeffizienten **innerhalb** der Testzelle wird mit der Gleichung

$$\alpha_K = 1,25 \cdot \left(\frac{|T_R - T_U|}{D_R}\right)^{\frac{1}{4}} \text{ für } D_R^3 \cdot |T_R - T_U| \leq 10m^3K \quad (5.3)$$

berechnet [29].  $T_R$  und  $T_U$  stehen für die Temperatur der Rohraußenfläche und der Umgebung.  $D_R$  ist der Rohrdurchmesser. Erneut wird die Temperatur der Rohraußenseite nach unten durch die Fluidtemperatur abgeschätzt und für die Umgebungstemperatur der Wert der globalen Variable der Temperatur aus den Modellen verwendet, welcher über die Sensordaten bestimmt wurde. Die Bedingung  $D_R^3 \cdot |T_R - T_U| \leq 10m^3K$  ist erfüllt und somit ergibt sich der konvektive Wärmeübergangskoeffizient innerhalb der Testzelle zu  $\alpha_K = 7,776 \frac{W}{m^2K}$ . Anschließend wird der radiative Anteil, analog zu den Rohren außerhalb der Testzelle, zu  $\alpha_S = 0,624$  bestimmt. Dies resultiert in einem Gesamtwärme-

übertragungskoeffizient von  $\alpha_{K+S} = 8,4 \frac{W}{m^2K}$ .

Der letzte Fall für die konventionell isolierten Rohrleitungen stellt sich als schwieriger heraus und es werden einige weitere Annahmen nötig. Zu Verdeutlichung des Problems und der Vorgehensweise ist eine Skizze des Rohres mit Isolierung in Abbildung 5.7 dargestellt. Es sind die Wärmeübergangskoeffizienten mit roten Pfeilen gezeigt. Der erste  $\alpha_{tot}$ , der für das EcosimPro/ESPSS Modell benötigt wird und der zweite  $\alpha_U$ , welcher nur als Hilfsmittel zur Bestimmung des ersten genutzt wird.  $\alpha_{tot}$  beschreibt den Wärmeübergang vom Rohr über die Isolierung bis in die Umgebung.  $\alpha_U$  beschreibt den Wärmeübergang von der Außenseite der Isolierung bis in die Umgebung. Die Temperaturen, die in den folgenden Berechnungen verwendet werden sind ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Es wird angenommen, dass die Rohrtemperatur  $T_R$  wieder gleich der Fluidtemperatur  $T_F$  ist. Die Temperatur an der Außenfläche der Isolierung  $T_{W,iso}$  ist unbekannt und kann nicht mehr durch eine Abschätzung, wie zuvor die Außenfläche des Rohres, bestimmt werden.

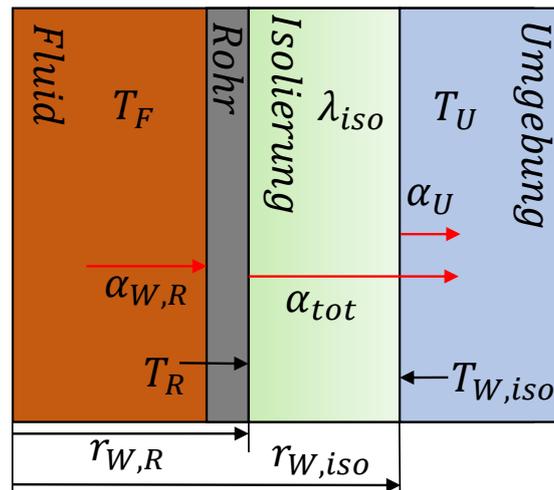


Abbildung 5.7.: Skizze des Rohrs mit Isolierung

Zunächst muss also eine Möglichkeit gefunden werden, die Außentemperatur der Isolierung zu berechnen. Dazu wird der Wärmestrom durch ein Rohrstück betrachtet, welcher als

$$\dot{Q}_{tot} = \frac{2\pi l \cdot (T_U - T_R)}{\frac{1}{\alpha_{W,R} \cdot r_{W,R}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{W,iso}}{r_{W,R}}\right)}{\lambda_{iso}} + \frac{1}{\alpha_U \cdot r_{W,iso}}} \quad (5.4)$$

gegeben ist und über den Radius konstant bleibt [32]. Die Radien und Temperaturen, die in der Formel verwendet werden sind in Abbildung 5.7 gezeigt.  $\lambda_{iso}$  ist die Wärmeleitfähigkeit der Isolierung. Der erste Summand im Nenner des Bruchs  $\frac{1}{\alpha_{W,R} \cdot r_{W,R}}$  beschreibt

den Wärmeübergang vom Fluid auf das Rohr und wird in EcosimPro/ESPSS vom Modell der inneren Wärmeübertragung übernommen und kann somit vernachlässigt werden. Der zweite Summand beschreibt die Wärmeleitung durch die Isolierung und der dritte den Wärmeübergang von der Außenseite der Isolierung in die Umgebung.

Um eine Gleichung für die gesuchte Temperatur  $T_{W,iso}$  zu erhalten wird der Wärmestrom bis zur Außenseite der Isolierung

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{iso} = \frac{2\pi l \cdot (T_{W,iso} - T_R)}{\frac{\ln\left(\frac{r_{W,iso}}{r_{W,R}}\right)}{\lambda_{iso}}} \quad (5.5)$$

betrachtet. Er ist gleichgroß wie der Gesamtwärmestrom bis in die Umgebung. Gleichung 5.5 lässt sich nach  $T_{W,iso}$  umstellen und so bestimmen, wenn der Wärmestrom bekannt ist. In einem iterativen Verfahren wird nun zuerst ein Startwert für die Temperatur an der Außenseite der Isolierung geschätzt. Anschließend wird, wie für die Rohre ohne Isolierung, der Übergangskoeffizient mit der Umgebung, in Abbildung 5.7  $\alpha_U$  genannt, berechnet. Mit diesem lässt sich nach Gleichung 5.4 der Gesamtwärmestrom bestimmen. Dieser wird genutzt um eine neue Temperatur  $T_{W,ins}$  zu berechnen und die Iteration beginnt von vorn. Die so errechnete Lösung konvergiert auf den Wert  $T_{W,ins} = 260,87K$ , was als plausibles Ergebnis erachtet wird.

Mit der Außentemperatur der Isolierung kann nun der korrekte Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_U$  bestimmt werden und mit diesem nach der Gleichung

$$\alpha_{tot} = \frac{1}{\frac{r_{W,iso} \cdot \ln\left(\frac{r_{W,iso}}{r_{W,R}}\right)}{2 \cdot \lambda_{ins}} + \frac{1}{\alpha_U}} \quad (5.6)$$

der, für das Modell benötigte, Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{tot} = 0.5401 \frac{W}{m^2K}$  von Rohr zu Umgebung.

Diese Berechnungen gelten nur für einen bestimmten Rohrdurchmesser und müssen für die restlichen Rohrdurchmesser wiederholt werden. Eine Übersicht über die verwendeten Werte der Wärmeübergangskoeffizienten findet sich im Anhang A.3 in Tabelle A.2.

## 5.4. Initialbedingungen

Die Initialbedingungen werden in Übereinstimmung mit den verfügbaren Sensoren zum Startzeitpunkt der Simulation gewählt. Alle Komponenten werden mit einem nicht kondensierbaren Gasmassenanteil von 0 initialisiert. Die Werte der initialen Drücke und Temperaturen der Komponenten des LOX-Systems sind in Tabelle 5.1 gezeigt und die Werte des LNG-Systems in Tabelle 5.2. Die Leitungen zwischen Ventilen oder Randbedingungen sind alle mit den selben Drücken und Temperaturen initialisiert. Die Tanks werden vor Versuchsbeginn abgekocht und sind dementsprechend mit der Siedetemperatur der flüssigen Medien initialisiert.

**Tabelle 5.1.:** Initialbedingungen für das LOX-System

Komponente	Initialdruck $\cdot p_n$	Initialtemperatur $\cdot T_n$
Run Tank Gas Seite	0.475	2.123
Run Tank Flüssigkeit Seite	0.475	0.719
Leitung bis AV1	0.475	0.719
Leitungen von Storage Tank bis AV2/3	0.509	0.735
Leitungen von AV1/3 bis AV4/5/KV	0.621	0.748
AV5 bis Prüflingsschnittstelle	0.455	2.142
Entlastungsleitung	0.455	2.142

**Tabelle 5.2.:** Initialbedingungen für das LNG-System

Komponente	Initialdruck $\cdot p_n$	Initialtemperatur $\cdot T_n$
Run Tank Gas Seite	0.702	1.560
Run Tank Flüssigkeit Seite	0.702	0.880
Leitung bis AV1	0.702	0.880
Leitungen von Storage Tank bis AV2/3	0.871	0.950
Leitungen von AV1/3 bis AV4/5/KV	0.750	0.949
AV5 bis Prüflingsschnittstelle	0.436	1.516
Entlastungsleitung	0.497	1.516

## 5.5. Randbedingungen

Im letzten Schritt der Modellierung werden die Modelle mit Randbedingungen versorgt, die die nicht verbundenen **Pipe** und **Junction** Komponenten abschließen. Je nach Verfügbarkeit vorhandener Sensoren und Kenntnis des Phasenzustandes werden entsprechende Randbedingungen ausgewählt.

### 5.5.1. LOX-Becken und LNG-Fackel

Das LOX-Becken und die LNG-Fackel werden durch eine Druckrandbedingung und eine Gasmassenanteilrandbedingung beschrieben. Sowohl LOX-Becken als auch LNG-Fackel strömen in die freie Umgebung aus. Der Druck wird deshalb konstant auf Atmosphärendruck und der Gasmassenanteil auf 0 gesetzt, das heißt es wird angenommen die Fluide befinden sich beim Austritt aus der Leitung noch in der flüssigen Phase. Die Werte für die Randbedingungen des LOX-Beckens finden sich in Tabelle 5.3.

**Tabelle 5.3.:** Randbedingung LOX-Becken

Größe	Wert
Druck	0.981 <i>bar</i>
Gasmassenanteil	0

Die Werte für die Randbedingungen der LNG-Fackel sind in Tabelle 5.4 gezeigt.

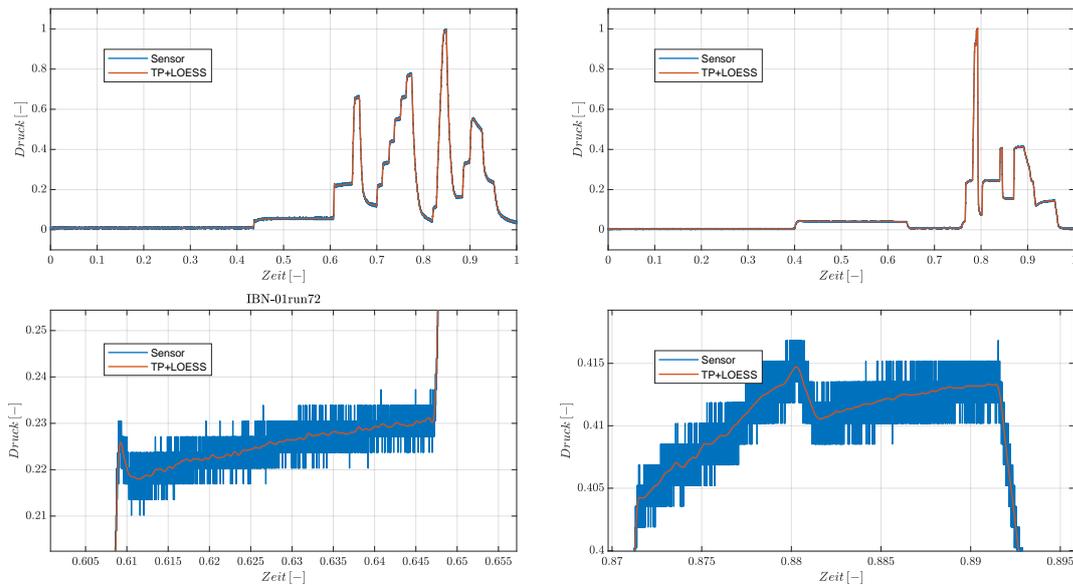
**Tabelle 5.4.:** Randbedingung LNG-Fackel

Größe	Wert
Druck	0.981 <i>bar</i>
Gasmassenanteil	0

### 5.5.2. Bedruckungssystem

Das Bedruckungssystem der Run Tanks ist nicht Teil des Modells und muss deshalb durch eine Druckrandbedingung und eine Gasmassenanteilrandbedingung modelliert werden. Die Druckrandbedingung ist im Gegensatz zum LOX-Becken/LNG-Fackel nicht konstant sondern ändert sich zeitlich. Im Bedruckungssystem ist ein Drucksensor, der den Druck des Run Tanks aufzeichnet. Diese Sensorwerte werden als Eingabe für die Druckrandbedingung verwendet und sind in Abbildung 5.8 in blau dargestellt. In der unteren Reihe

der Abbildung ist ein vergrößerter Ausschnitt des obigen Signals dargestellt. Erkenntlich ist, dass das Sensorsignal einem schwachen, aber hochfrequenten, Rauschen unterliegt. Dies führt zu einer drastischen Reduktion der Simulationsgeschwindigkeit. Das Rauschen muss erst aus dem Signal entfernt werden, bevor es als Randbedingung genutzt werden kann.



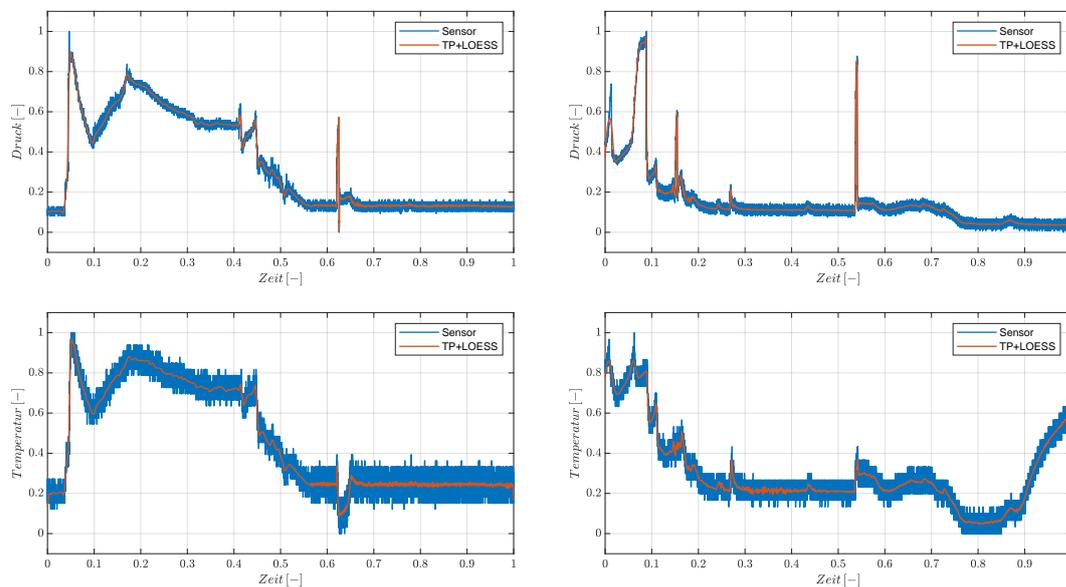
**Abbildung 5.8.:** Links oben: Tankdruck des LOX-Systems, Rechts oben: Tankdruck des LNG Systems; Links unten: Vergrößerung Tankdruck LOX-System, Rechts unten: Vergrößerung Tankdruck LNG-System

Um dies zu erreichen wird zuerst ein Tiefpassfilter auf das Signal angewendet. Durch Testen verschiedener Frequenzen konnte eine Grenzfrequenz von  $f_G = 25 \text{ Hz}$  gefunden werden, die zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Weiterhin wird das Signal mit der „local weighted scatterplot smooth“ (kurz. LOESS) Methode geglättet, welche gut für die Glättung von Drucksignalen geeignet ist [33]. Für die Anwendung der LOESS-Methode wird die MATLAB-Funktion *smooth* aus der „Curve Fitting Toolbox“ benutzt [34]. Für diese muss ein „span“ gewählt werden, welcher die Menge der benachbarten Punkte beschreibt, die für die Glättung betrachtet werden. Damit, die für das Systemverhalten relevanten, Druckspitzen nicht durch die Glättung aus dem Signal entfernt werden, wird der span-Wert, sehr gering, zu  $s = 0,003$  gewählt. Das gefilterte und geglättete Signal ist in Abbildung 5.8 in rot dargestellt.

Für den Gasmassenanteil wird angenommen, dass sich das Fluid für die Bedruckung komplett und permanent in der Gasphase befindet. Der Wert des Gasmassenanteils wird deshalb auf 1 gesetzt.

### 5.5.3. Lagertank

Der Lagertank für das Spülen der Hauptleitung wird ebenfalls nicht modelliert und nur durch eine Druck und eine Temperaturrandbedingung integriert. Analog zum Bedruckungssystem werden die Werte für die Randbedingungen aus Sensordaten gewonnen. Die dafür verwendeten Sensoren sind in der Bypassleitung lokalisiert. Es wird, wie für das Drucksignal des Bedruckungssystems, zuerst ein Tiefpassfilter angewendet und dann eine Glättung mit der LOESS-Methode durchgeführt. Die rohen Sensordaten und die bearbeitete Version sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Die rohen Sensordaten in blau, die bearbeiteten Daten in rot.



**Abbildung 5.9.:** Links oben: Lagertankdruck LOX-System, Rechts oben: Lagertankdruck LNG System; Links unten: Lagertanktemperatur LOX-System, Rechts unten: Lagertanktemperatur LNG-System

Nach der Definition der Randbedingungen sind die Modelle vollständig und die Modellierung beendet.

# 6. Validierung

Mit der Vervollständigung der Modelle können diese nun genutzt werden um Simulationen der Abnahmetestläufe am P8.3 durchzuführen. Die Ergebnisse der Simulationen werden in diesem Kapitel gezeigt. Wie bisher gehandhabt, werden zuerst die Ergebnisse für das LOX-Modell vorgestellt und anschließend die Ergebnisse des LNG-Modells behandelt. Besondere Wichtigkeit haben die Druckverläufe, vor allem während die Hauptleitung über den Run Tank versorgt wird.

## 6.1. LOX

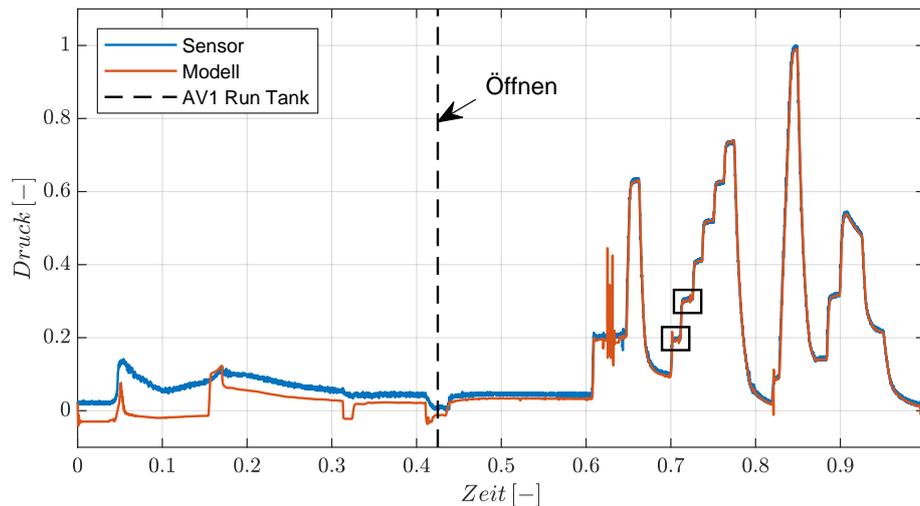
Die Simulation des LOX-Systems findet mit dem, in Kapitel 4.4 beschriebenen, Testlauf statt. Zuerst wird eine Validierung der Druckverläufe vorgenommen. Anschließend wird auf den gemessenen Massenstrom eingegangen und abschließend die Temperatur der Sensordaten mit der des Modells verglichen. Die Simulationszeit soll, aus wirtschaftlichem Interesse, gering gehalten werden, weshalb die zeiteffiziente Integrationsmethode „CVO-DE\_BDF\_SPARSE“ gewählt wird. Die Simulation wird mit einem absoluten Fehler von  $err_{abs} = 10^{-4}$  und einem relativen Fehler von  $err_{rel} = 10^{-4}$  durchgeführt. Es wird ein Integrationszeitschritt von  $c_{int} = 0,1$  s gewählt.

### 6.1.1. Druck

Insgesamt befinden sich vier Drucksensoren im Modell. Zwei dieser vier Drucksensoren, PT2 und PT4 werden für die Auswertung genutzt. Der Drucksensor PT3 liefert keine neuen Erkenntnisse, da er direkt stromab von PT2 lokalisiert ist. Auch der Drucksensor PT5, welcher sich an der Schnittstelle zur Entlastungsleitung befindet, trägt kaum zur Validierung bei, da die Druckverläufe dort nahezu konstant sind.

Zuerst wird der Druckverlauf von PT2, der Sensor vor dem ersten Massenstrommesser, betrachtet. Dieser ist in Abbildung 6.1 gezeigt. Gleich von Beginn an, bei  $t = 0$  ist eine Differenz zwischen Modell und Sensordaten zu erkennen. Diese beträgt ungefähr  $\Delta p = 0,05$ . Der Druckverlauf von Modell als auch Sensordaten bleibt konstant bis  $t =$

0,04. Anschließend verzeichnen beide Kurven einen schnellen Anstieg. Die Sensordaten steigen bis zu  $p = 0,13$ , während das Modell nur bis  $p = 0,08$  steigt. Der anfänglich erwähnte Unterschied bleibt erhalten. Nach dem Anstieg sinken die Sensordaten langsam auf  $p = 0,05$  ab. Der Verlauf des Modells hingegen fällt genau so schnell ab wie er anstieg und zeigt dann bis  $t = 0,15$  keine große Veränderung. Zum Zeitpunkt  $t = 0,15$  schließt



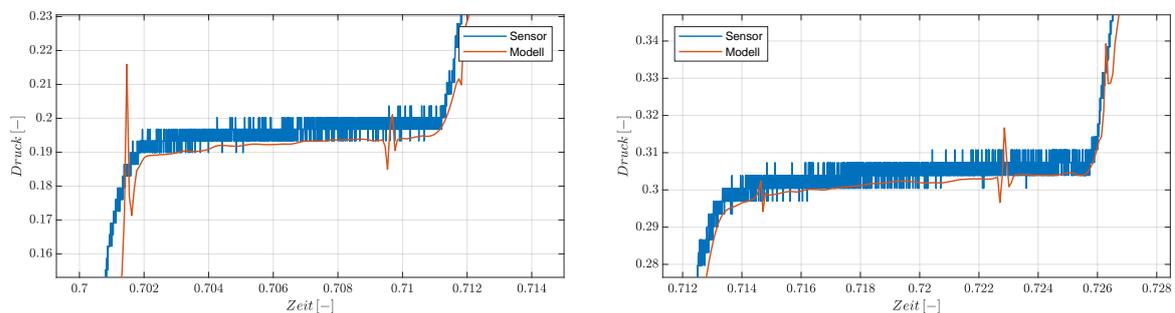
**Abbildung 6.1.:** Druckverlauf am ersten Massenstrommesser, Sensor: PT2

das AV4 der Entlastungsleitung, was einen rapiden Anstieg des Druckverlaufs im Modell auf  $p = 0,12$  verursacht, sodass der Druckverlauf des Modells die Werte der Sensordaten kurzzeitig übersteigt. In den Sensordaten ist davon keine Auswirkung zu sehen. Bei  $t = 0,17$  öffnet das AV5 zur Prüflingsschnittstelle, was im Druckverlauf des Modells mit einem starken Druckabfall einhergeht. Erneut ist im Druckverlauf der Sensordaten keine große Auswirkung durch die Veränderung der Ventilstellung zu sehen. Der Druck fällt bis zu  $t = 0,31$  ab. Sowohl Modell als auch Sensordaten verzeichnen in etwa die selbe Steigung. Bei  $t = 0,31$  öffnet das AV4 der Entlastungsleitung und der Einfluss ist deutlich im Modell zu erkennen. Der Druck fällt erneut stark ab, bleibt dann kurz konstant und steigt bei  $t = 0,32$ , mit dem Schließen des Entlastungsventils, wieder stark an. Beide Verläufe bleiben dann annähernd konstant.

Sowohl das Modell, als auch die Sensordaten fallen bei  $t = 0,41$  ab. Dies wird durch das Schließen des AV3 des Bypass zum Lagertank verursacht. Die gestrichelte Linie in Abbildung 6.1 kennzeichnet das Öffnen des AV1 zum Run Tank. Ab diesem Zeitpunkt wird die Hauptleitung durch LOX aus dem Run Tank gespeist. Nach dem Öffnen des AV1 zum Run Tank steigt der Druck an und bleibt dann von  $t = 0,45$  bis  $t = 0,61$  annähernd auf einem Wert. Es ist immer noch ein Unterschied zwischen Sensordaten und Modell zu

erkennen. Dieser ist geringer als der Unterschied zu Beginn und beträgt etwa  $\Delta p = 0,01$ . Bei  $t = 0,61$  steigen die Sensordaten und das Modell beide stark an. Bei  $t = 0,63$  sind starke Oszillationen im Modell zu erkennen, welche nicht in den Sensordaten vorkommen. Diese werden durch das Öffnen des AV4 der Entlastungsleitung verursacht. Bei  $t = 0,64$  stoppen die Oszillationen, was mit dem Schließen des AV4 der Entlastungsleitung bei  $t = 0,64$  zusammen fällt.

In Abbildung 6.2 sind zwei vergrößerte Ausschnitte des Druckverlaufs von Sensor PT2 dargestellt. Diese sind in Abbildung 6.1 durch schwarze Rechtecke gekennzeichnet. Auch hier sind Oszillationen im Druckverlauf des Modells zu erkennen, welche nicht in den Sensordaten auftauchen. Bei  $t = 0,7$  erreicht die erste Druckspitze einen Wert von  $p = 0,22$  und liegt damit  $\Delta p = 0,04$  über den gemessenen Daten. Bei  $t = 0,71$  befindet sich eine weitere Abweichung von den Sensordaten. Der Druck fällt hier zuerst auf  $p = 0,18$  und steigt dann auf  $p = 0,2$  an. Ähnliches Verhalten lässt sich in der nächsten Treppenstufe beobachten. Die erste Druckspitze ist hierbei kleiner als die zweite und etwas später. Die zweite Druckspitze passt von Position und Form aber gut zur zweiten Druckspitze der ersten Treppenstufe.

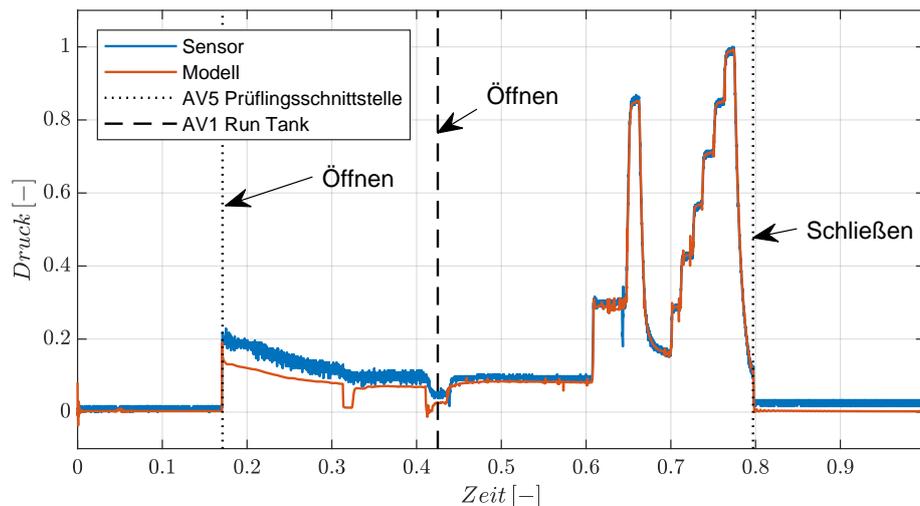


**Abbildung 6.2.:** Links: Vergrößerung der ersten Treppenstufe von PT2, Rechts: Vergrößerung der zweiten Treppenstufe von PT2

Bei  $t = 0,81$  taucht eine weitere Druckschwingung auf. Für diese Druckschwingungen kann kein physikalischer Grund identifiziert werden. Sie hängen nicht mit dem Öffnen oder Schließen der Automatikventile zusammen und auch eine Änderung der Ventilposition des KV findet nicht statt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Schwingungen numerischer Natur sind. Abgesehen von diesen Schwingungen kann eine sehr gute Übereinstimmung von Modell und Sensordaten erzielt werden. Das Modell reproduziert nahezu exakt das Verhalten des Prüfstandes.

Der Druckverlauf des Drucksensors PT4 stromauf der Prüfingsschnittstelle ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Auch hier ist das Öffnen des AV1 zum Run Tank mit einer gestri-

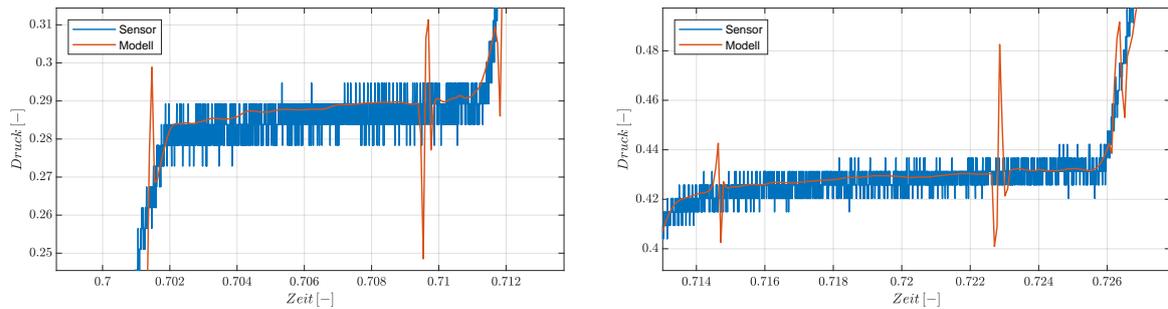
chelten Linie gekennzeichnet. Das Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle ist durch die gepunkteten Linien dargestellt. Generell ist anzumerken, dass die grundlegende Form des Druckverlaufs analog zum Sensor PT2 verläuft. Bis zum Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle bei  $t = 0,17$  ist im Prüfstand kein LOX vorhanden, sondern die Leitungen sind mit Stickstoff gefüllt. Dies kann im Modell nicht berücksichtigt werden. Deshalb sind der erste Abschnitt und der letzte Abschnitt, bis zum Öffnen und nach dem Schließen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle, nicht von Relevanz.



**Abbildung 6.3.:** Druckverlauf an der Prüflingsschnittstelle, Sensor: PT4

Nach dem Öffnen des AV5 steigen die Druckverläufe stark an. Das Modell bis zu einem Wert von  $p = 0,19$  und die Sensordaten auf  $p = 0,22$ . Der Verlauf des Modells fällt direkt nach der Druckspitze wieder rapide ab, bis es bei  $t = 0,18$  den Wert  $p = 0,13$  erreicht. Anschließend passt sich das Modell in etwa an die Steigung der Sensordaten an, wobei die Sensordaten etwas steiler sinken als das Modell. Bei  $t = 0,31$  kann derselbe Druckabfall wie schon im Verlauf von PT2 beobachtet werden, welcher durch das Öffnen und Schließen des AV4 der Entlastungsleitung verursacht wird. Das Modell und die Sensordaten verlaufen gleich, mit einer geringen Differenz von etwa  $p = 0,02$ . Die bereits in PT2 beobachteten Oszillationen sind bis zum Sensor PT4 propagiert und im Druckverlauf des Modells bei  $t = 0,63$  zu erkennen. Anzumerken ist, dass auch in den Sensordaten eine Oszillation sichtbar ist. Sie findet später statt als die Oszillationen im Modell und ist um einiges stärker. Beim Fahren der Treppen ab  $t = 0,7$ , in denen der Tankdruck kontinuierlich erhöht und dann gehalten wird, treten im Verlauf von PT4 kleinere Oszillationen auf, welche bereits im Verlauf von PT2 zu sehen waren. Die Vergrößerung der ersten beiden Treppenstufen ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Die zweite Druckschwingung bei  $t = 0,71$  ist

im Verlauf von PT4 wesentlich ausgeprägter als noch zuvor. Aus der kleinen Unstetigkeit, in Abbildung 6.2 links, nach der Druckschwingung hat sich im Verlauf von PT4 zu einer Druckspitze entwickelt. Dies gilt auch für die zweite Treppenstufe (Abbildung 6.4 rechts). Sowohl die erste als auch die zweite Druckschwingung ist wesentlich ausgeprägter als noch im Verlauf von PT2.



**Abbildung 6.4.:** Links: Vergrößerung der ersten Treppenstufe von PT4, Rechts: Vergrößerung der zweiten Treppenstufe von PT4

Abschließend können folgende Aussagen bezüglich der Druckverläufe des Modells getroffen werden: Die Druckverläufe des Modells reagieren sehr sensitiv auf das Verfahren des AV4 der Entlastungsleitung und generell sensitiver auf Änderungen der Ventilstellungen als der reale Prüfstand. Ein Grund dafür könnte sein, dass Aufgrund der Vereinfachung des Systems die nicht modellierten geschlossenen Leitungen ein größeres Totvolumen darstellen, was das reale Verhalten träger macht als das des Modells.

Während die Hauptleitung über den Lagertank gespeist wird und das AV4 der Entlastungsleitung geöffnet ist, ist der Druck des Modells wesentlich geringer als der, der in den Sensordaten aufgezeichnet ist. Dies liegt daran, dass für die Modellierung des inneren Wärmeübergangs ein einphasiges Modell gewählt wird. Die Konditionierung über den Lagertank ist eine hoch transiente zweiphasige Strömung, welche durch das Modell nicht wiedergegeben werden kann.

Während der Speisung durch den Run Tank wird das Prüfstandverhalten sehr gut durch das Modell wiedergegeben.

### 6.1.2. Massenstrom

Als nächstes wird der Massenstrom des Modells mit den gemessenen Daten verglichen. Dazu sind beide Verläufe in Abbildung 6.5 dargestellt. Das Öffnen des AV1 zum Run Tank ist wie zuvor durch die gestrichelte Linie gekennzeichnet. Sogleich fällt auf, dass sich der

Massenstrom des Modells während der Konditionierung stark von den gemessenen Werten unterscheidet. Er ist in etwa um  $\Delta\dot{m} = 0,1$  geringer. Grund dafür ist, wie zuvor beschrieben, die hoch transiente zweiphasige Strömung während der Konditionierung mit dem Lagertank, die vom Modell nicht abgebildet werden kann. Der gemessene Massenstrom weist zunächst einzelne Spitzen auf und oszilliert dann zunehmend stärker. Der Massenstrom des Modells weist bei  $t = 0,05$  eine Oszillation auf, bleibt dann aber konstant. Das Öffnen der Automatikventile von Prüflingsschnittstelle und Entlastungsleitung bei  $t = 0,17$  und  $t = 0,31$  bewirkt ein Absinken des Massenstroms und deckt sich mit den Druckverläufen. Der geringere Massenstrom im Modell während der Konditionierung bedingt wahrscheinlich den zu geringen Druck im ersten Bereich bis zum Öffnen des AV1 zum Run Tank, der in 6.1.1 angesprochen wurde. Nach dem Öffnen des AV1 zum Run Tank stimmt die Form des Verlaufs von Modell und Sensordaten grundlegend überein. Der Massenstrom des Modells ist aber zunächst um  $\Delta\dot{m} = 0,03$  größer als die gemessenen Werte und weist immer wieder stärkere Schwingungen auf, die so nicht in den Sensordaten zu erkennen sind. Bei  $t = 0,8$  schließt das AV5 zur Prüflingsschnittstelle. Ab diesem Zeitpunkt ist der Massenstrom im Modell geringer als der Massenstrom der Sensordaten, abgesehen von einer Spitze im Massenstrom bei  $t = 0,82$ .

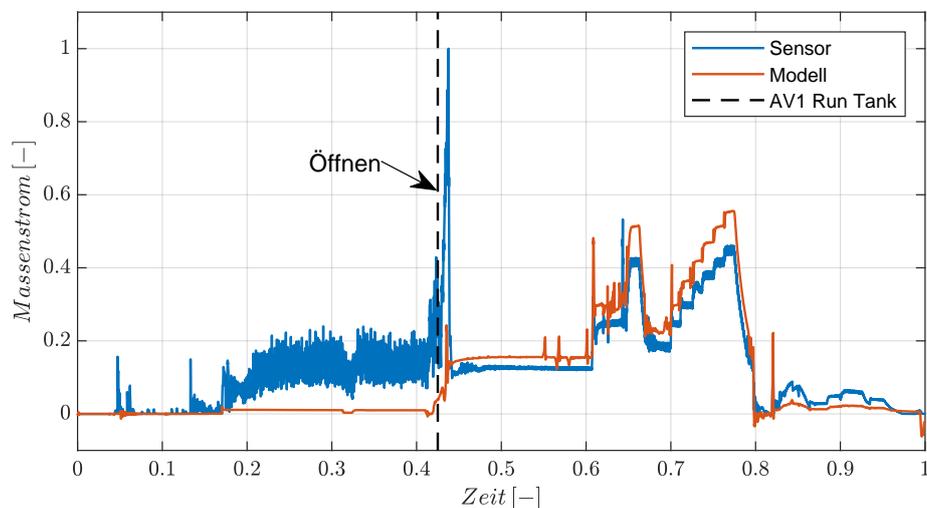
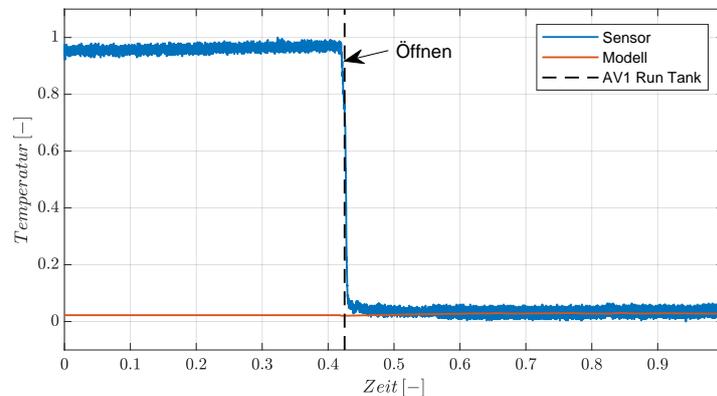


Abbildung 6.5.: Massenstromverlauf am ersten Massenstrommesser, Sensor: M1

### 6.1.3. Temperatur

Abschließend für die Validierung des LOX-Modells sollen die Temperaturen an drei Sensorpositionen betrachtet werden. In Abbildung 6.6 ist der Temperaturverlauf des Sensors

TT1 zeigt, das Öffnen des AV1 zum Run Tank ist mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet. Der Temperaturverlauf des Modells ist nahezu auf einem konstanten Wert. In den gemessenen Werten ist die Temperatur bis zum Öffnen des AV1 zum Run Tank um  $T = 0,9$  höher als im Modell. Dies liegt daran, dass sich am realen Prüfstand ein Kissen aus Stickstoffgas zwischen Run Tank und AV1 befindet, welches der LOX daran hindert sich nach dem Öffnen des HV am Run Tank bis zum AV1 auszubreiten. Erst mit dem Öffnen des AV1 wird das Stickstoffgas durch die Leitungen gespült und der LOX kann den Temperatursensor erreichen und die Temperatur sinkt. Dieser Vorgang kann mit Ecosim-Pro/ESPSS nicht nachgestellt werden, weshalb hier bereits zu Versuchsbeginn der LOX am Temperatursensor ist und dementsprechend eine tiefere Temperatur gemessen wird.

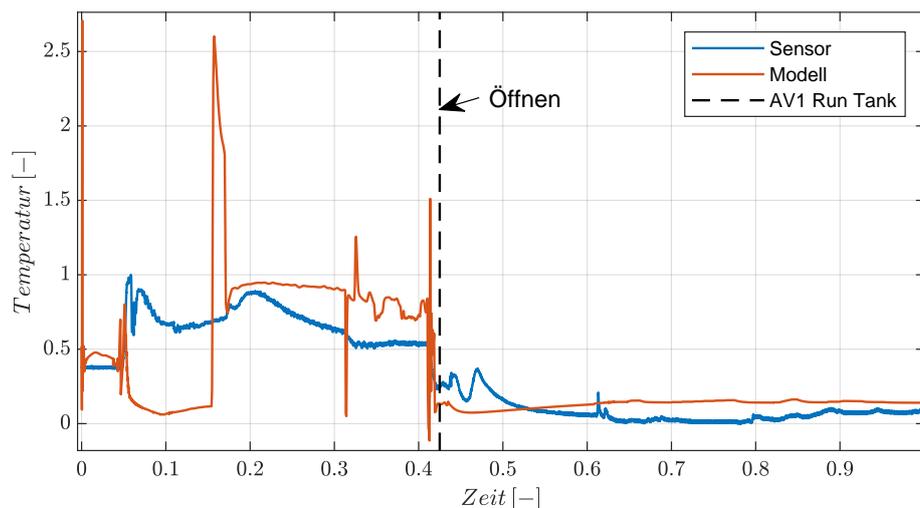


**Abbildung 6.6.:** Temperaturverlauf nach dem Run Tank, Sensor: TT1

In Abbildung 6.7 ist der Temperaturverlauf des Sensors TT4 gezeigt, welcher an der selben Stelle wie der Sensor PT2 lokalisiert ist. Zu Beginn des Modellverlaufs ist ein starkes Einschwingen zu erkennen. Die Temperatur erreicht hier ihren Maximalwert von  $T = 2,71$ . Anschließend liegt der Temperaturverlauf des Modells etwa  $\Delta T = 0,1$  über den gemessenen Werten. Bei  $t = 0,04$  sind erneut Schwingungen im Modell sichtbar. Nach der Schwingung bei  $t = 0,05$  sinkt die Temperatur im Modell auf  $T = 0,06$ . Auch in den gemessenen Werten findet bei  $t = 0,06$  ein Absinken der Temperatur auf  $T = 0,6$  statt. Die Temperaturverläufe von Modell und Messwerten unterscheiden sich um etwa  $\Delta T = 0,6$ . Dies entspricht einem absoluten Temperaturunterschied von  $\Delta T_{abs} 6 K$ . Bei  $t = 0,15$  gibt es im Modell eine sehr starke Temperaturspitze, welche mit dem Schließen des AV4 der Entlastungsleitung zusammen fällt. Ab diesem Zeitpunkt liegt die Temperatur des Modells über den Messwerten. Lediglich bei  $t = 0,31$  sinkt der Verlauf des Modells unter den der Sensorwerte. Dieser Temperaturabfall kann dem Öffnen des AV4 der Entlastungsleitung zugeordnet werden. Wenig später, bei  $t = 0,32$  ist eine Temperaturspitze zu erkennen,

welche mit dem Schließen des AV4 der Entlastungsleitung einhergeht. Vor dem Öffnen des AV1 zum Run Tank weist das Modell starke Schwingungen im Temperaturverlauf auf. Danach steigt die Temperatur im Modell leicht an, von  $T = 0,08$  auf  $T = 0,15$ . Der Verlauf der Sensordaten weist hingegen zwei Temperaturberge und ein Temperaturtal auf. Nach dem zweiten Berg fällt die Temperatur von  $T = 0,36$  auf  $T = 0,01$  und bleibt dort in etwa konstant. Ab  $t = 0,8$  wird ein leichter Anstieg verzeichnet, sodass die Temperatur der Sensorwerte bei  $t = 1$  einen Wert von  $T = 0,1$  erreicht.

In diesem Verlauf wird erneut die Problematik bei der Konditionierung deutlich. Das Modell kann den Temperaturverlauf während der Konditionierung nicht genau wiedergeben. Dennoch ist die absolute Abweichung zwischen Modell und Sensordaten nie größer als  $\Delta T_{abs} = 7 K$ . Die Vorhersage der Temperatur nach dem Öffnen des AV1 zum Run Tank funktioniert besser. Auch wenn das Modell einige Elemente, die in den Sensordaten zu erkennen sind, nicht umsetzen kann, ist die maximale absolute Abweichung  $\Delta T_{max,abs} < 3 K$  und im Durchschnitt geringer als  $\Delta T_{abs} = 1 K$ .



**Abbildung 6.7.:** Temperaturverlauf am ersten Massenstrommesser, Sensor: TT4

Abschließend ist in Abbildung 6.8 der Temperaturverlauf des Sensors TT7 stromauf der Prüflingsschnittstelle gezeigt. Der Sensor am Prüfstand ist mit einer Schranke versehen, weshalb der Unterschied im ersten Bereich der Verläufe so groß ist. Es wird analog zum Druckverlauf nur der Bereich zwischen dem Öffnen und Schließen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle betrachtet. Nach dem Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle bei  $t = 0,17$  sinkt die Temperatur in beiden Verläufen. Die Temperatur der Sensordaten sinkt abrupt auf  $T = 0,35$ . Im Modell sinkt die Temperatur wesentlich langsamer, bis zum Öffnen des AV1 zum Run Tank nähern sich die beiden Verläufe aber weitestgehend an. Wie im

Verlauf von TT4 geht dem Öffnen des AV1 zum Run Tank eine Temperaturoszillation voraus. Ab dem Öffnen des AV1 zum Run Tank bei  $t = 0,43$  stimmen die beiden Verläufe nahezu exakt überein. Die beiden Temperaturberge, welche auch schon im Verlauf von TT4 zu sehen waren, können im Verlauf von TT7 wiedergefunden werden. Sie befinden sich bei  $t = 0,44$  und  $t = 0,48$  und sind weniger stark ausgeprägt als im Verlauf von TT4.

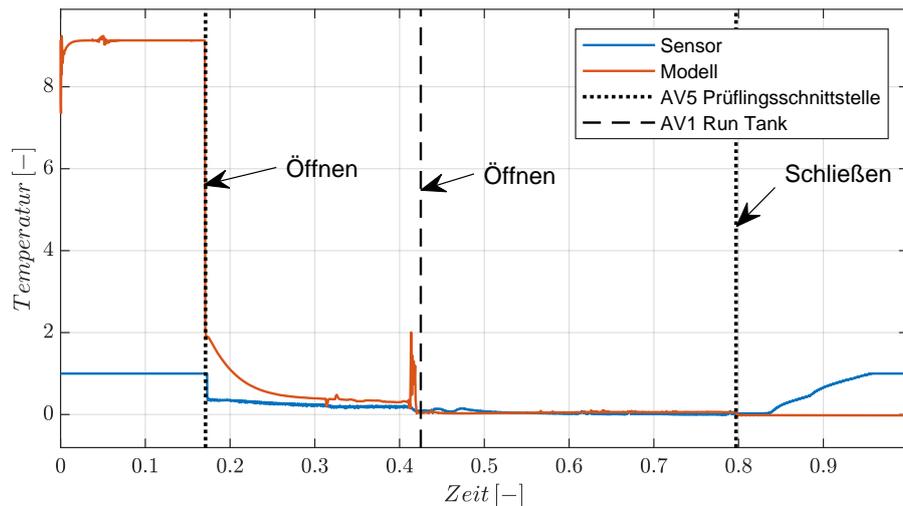


Abbildung 6.8.: Temperaturverlauf an der Prüflingsschnittstelle, Sensor: TT7

## 6.2. LNG

Die Simulation des LNG-Systems findet mit dem, in Kapitel 4.5 beschriebenen, Testlauf statt. Begonnen wird mit einem Vergleich der Druckverläufe, gefolgt vom Verlauf des Massenstroms und abschließend der Temperatur. Die Simulationsparameter des LOX-Modells werden für das LNG-Modell übernommen. Das bedeutet die Integrationsmethode „CVMODE\_BDF\_SPARSE“, ein absoluter Fehler von  $err_{abs} = 10^{-4}$ , ein relativer Fehler von  $err_{rel} = 10^{-4}$  und ein Integrationszeitschritt von  $c_{int} = 0,1$  s.

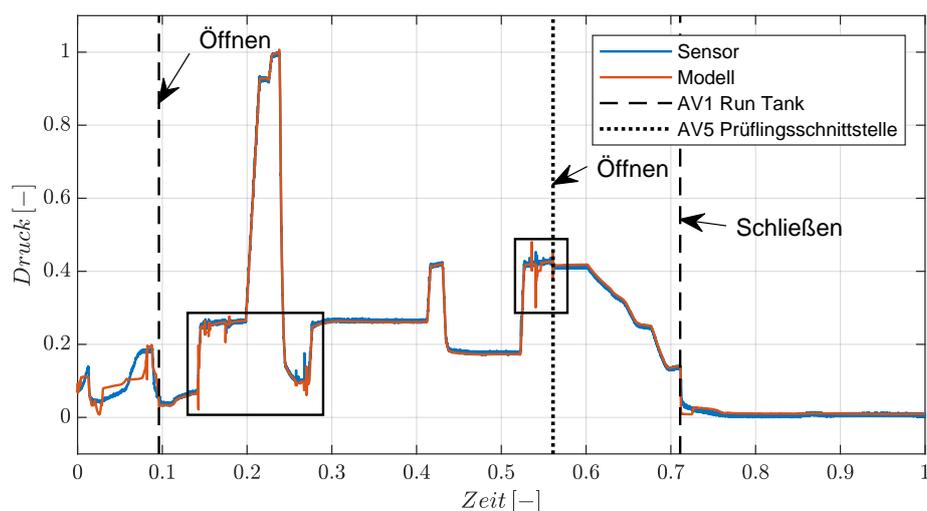
### 6.2.1. Druck

Analog zum LOX-Modell werden für die Validierung des Drucks die Sensoren PT2 und PT4 herangezogen. Der Druckverlauf des Sensors PT2, welcher sich stromauf des ersten Massenstrommessers befindet, ist in Abbildung 6.9 gezeigt. Die gestrichelten Linien, bei  $t = 0,1$  und  $t = 0,71$ , kennzeichnen das Öffnen des AV1 zum Run Tank, die gepunktete

Linie, bei  $t = 0,56$ , das Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle. Bis  $t = 0,1$  findet die Vorkonditionierung über den Lagertank statt. Wie bereits beim LOX-System erwähnt, ist dies eine hoch transiente zweiphasige Strömung, die mit dem gewählten einphasigen Wärmeübergangsmodell nicht korrekt nachgebildet werden kann. Daher weichen die Druckverläufe von Modell und Sensordaten ab. Die Tendenzen werden dennoch annähernd vom Modell wiedergegeben.

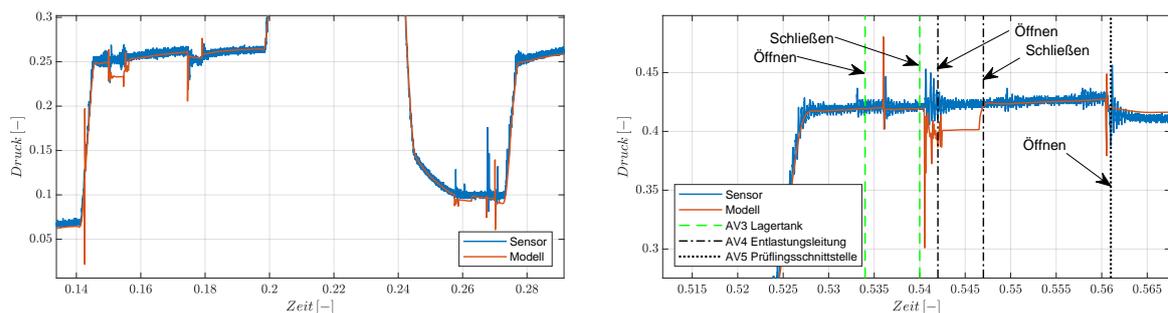
Nach dem Öffnen des AV1 zum Run Tank nähern sich die Verläufe des Modells und der Sensordaten schnell an. Der Verlauf des Modells ist bis  $t = 0,14$  leicht unter den Sensordaten. Nach  $t = 0,14$  weisen das Modell und die Sensordaten beide einen starken Anstieg auf. Dieser Anstieg wird vom Modell exakt wiedergegeben. Es weist jedoch eine einzige Druckschwingung auf, welche einen Druckunterschied von Maximum zu Minimum von  $\Delta p = 0,19$  besitzt. Eine Vergrößerung der in Abbildung 6.9 mit Rechtecken markierten Bereichen ist in Abbildung 6.10 dargestellt.

Die Druckschwingung ist in der linken Abbildung, kurz nach  $t = 0,14$ , zu sehen. Diese Fluktuation ist nicht in den Sensordaten enthalten. Nach dem Anstieg auf  $p = 0,25$  bleiben die Sensordaten in etwa bei diesem Wert, weisen jedoch zwischen  $t = 0,15$  und  $t = 0,16$  stärkere Schwingungen auf als in der restlichen Umgebung. Diese sind mit dem Öffnen und Schließen des AV4 der Entlastungsleitung zu erklären. In diesem Zeitbereich fällt im Modell, mit dem Öffnen des AV4, der Druck ab und steigt mit dem Schließen wieder an. Diese Auswirkung konnte auch schon in der Validierung des LOX-Modells beobachtet werden. Ein solcher Druckabfall findet in den Sensordaten nicht statt. Die Druckfluktuationen werden vom Modell wiedergegeben.



**Abbildung 6.9.:** Druckverlauf beim ersten Massenstrommesser, Sensor: PT2

Der Druckanstieg bei  $t = 0,2$  mit anschließendem Druckabfall passiert in den Sensordaten und im Modell gleichermaßen. Zum Zeitpunkt  $t = 0,26$  sind erneut Druckschwingungen erkennbar, welche sowohl in den Sensordaten, als auch im Modell zu finden sind. Eine Vergrößerung dieser Druckschwingungen ist ebenfalls in Abbildung 6.10 links zu sehen. Die Druckschwingungen hängen mit dem Öffnen und Schließen des AV4 der Entlastungsleitung und des AV3 des Bypass zum Lagertank zusammen. Die Fluktuationen in den Sensordaten sind größtenteils stärker ausgeprägt als im Modell.

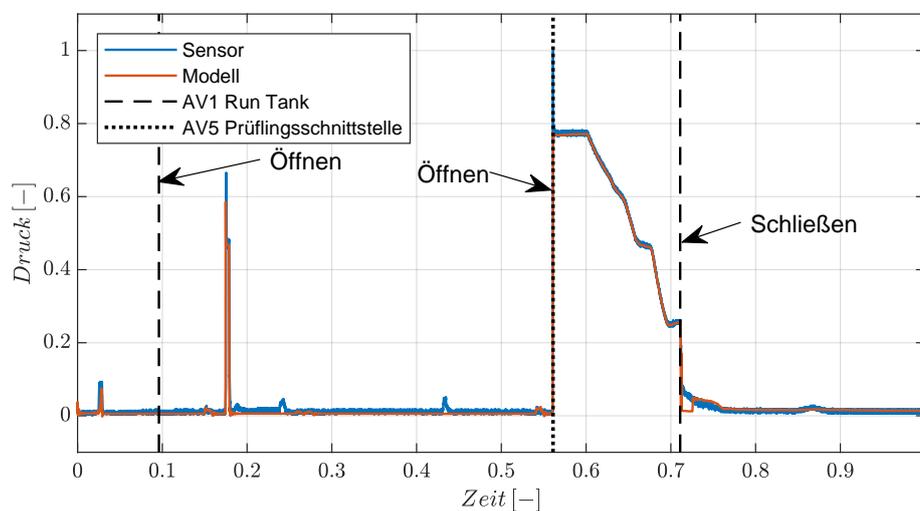


**Abbildung 6.10.:** Links: erste Vergrößerung PT2, Rechts: zweite Vergrößerung PT2

Bis kurz vor dem Öffnen des AV5 zur Prüflingschnittstelle bei  $t = 0,56$  stimmen die Druckverläufe von Modell und Sensordaten sehr gut überein. Der Bereich von  $t = 0,51$  bis  $t = 0,58$  ist in Abbildung 6.10 rechts vergrößert dargestellt. Die grün gestrichelten Linien kennzeichnen Öffnen und Schließen des AV3 des Bypass zum Lagertank und die Strichpunktlinien Öffnen und Schließen des AV4 der Entlastungsleitung. Bei  $t = 0,535$ , während das AV3 des Bypass zum Lagertank geöffnet ist, ist in Sensordaten und Modell eine Druckschwingungen zu sehen. Die Druckschwingung im Modell ist hierbei stärker ausgeprägt als in den Sensordaten. Das Maximum der Druckspitze im Modell übersteigt die Sensorwerte um  $\Delta p = 0,03$ . Nach dem Schließen des AV3 des Bypass zum Lagertank und noch vor dem Öffnen des AV4 zur Entlastungsleitung sind in den Sensordaten weitere Druckschwingungen vorhanden. Diese werden vom Modell ebenfalls dargestellt, allerdings bei einem geringeren Druckniveau. Während das AV4 der Entlastungsleitung geöffnet ist, ist der Druck im Modell etwa um  $\Delta p = 0,02$  niedriger als in den Sensorwerten. Nach dem Schließen des AV4 der Entlastungsleitung passt sich der Druckverlauf des Modells wieder auf den der Sensordaten an.

Vor dem Öffnen des AV5 zur Prüflingschnittstelle können ebenfalls Druckschwingungen beobachtet werden. Diese sind sowohl im Modell, als auch in den Sensordaten vorhanden. Die Schwingung im Modell ist etwas früher als in den Sensorwerten. Im Modell ist eine Druckspitze und ein Drucktal zu sehen, wonach der Druckverlauf nahezu konstant weiter

läuft. In den Sensordaten ebbt diese Druckspitze langsamer ab. Im Bereich von  $t = 0,56$  bis zum Schließen des AV1 zum Run Tank bei  $t = 0,71$  sind Form und Verlauf vom Modell und Sensordaten nahezu identisch. Die Werte im Modell sind leicht höher ( $\Delta p = 0,005$ ) als die Sensorwerte. Der Bereich nach Schließen des AV1 zum Run Tank wird nicht betrachtet. Als nächstes wird der Druckverlauf an der Prüflingsschnittstelle PT4 betrachtet. Er ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Die Druckspitzen bei  $t = 0,03$  und  $t = 0,18$  werden durch ein kurzes Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle verursacht. Sie können sowohl im Modell als auch in den Sensordaten beobachtet werden. Die Spitzen in den Sensordaten sind allerdings um  $\Delta p = 0,02$  bei der ersten Spitze und  $\Delta p = 0,08$  bei der zweiten Spitze höher als im Modell.



**Abbildung 6.11.:** Druckverlauf an der Prüflingsschnittstelle, Sensor: PT4

In den Sensordaten können bei  $t = 0,19$ ,  $t = 0,24$  und  $t = 0,43$  weitere kleine Druckspitzen beobachtet werden. Diese werden vom Modell nicht wiedergegeben. Das Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle bei  $t = 0,56$  wird in den Sensordaten von einer starken Druckspitze begleitet. Diese ist im Modell nicht zusehen und übersteigt dessen Druckwerte um  $\Delta p = 0,22$ . Im Bereich von  $t = 0,56$  bis zum Schließen des AV1 zum Run Tank bei  $t = 0,71$  wird der Druckverlauf der Sensordaten sehr gut vom Modell wiedergegeben. Der Bereich nach dem Schließen des Run Tanks wird nicht betrachtet.

### 6.2.2. Massenstrom

In Abbildung 6.12 ist der Massenstrom am ersten Massenstrommesser M1 dargestellt. Betrachtet wird der Bereich zwischen den gestrichelten Linien, welche das Öffnen und

Schließen des AV1 zum Run Tank kennzeichnen. Bei  $t = 0,11$  treten kleine Oszillationen im Modell auf, welche nicht in den Sensordaten beobachtet werden können. Die Differenz von Maximum zu Minimum der Schwingung beträgt  $\Delta\dot{m} = 0,03$ . Bei  $t = 0,13$  tritt eine Schwingung im Massenstrom der Sensordaten auf. Diese kann nicht im Verlauf des Modells beobachtet werden. Zum Zeitpunkt  $t = 0,14$  erhöht sich der Massenstrom, was von einer Spitze im Verlauf begleitet wird. Diese ist in den Sensordaten wesentlich geringer und im Modell stark ausgeprägt. Die Werte des Modells übersteigen die Sensorwerte um  $\Delta\dot{m} = 0,13$ . Anschließend ist die Form des Verlaufs, ab  $t = 0,14$  bis zum Schließen des AV1 des Run Tanks, von Modell und Sensordaten stark ähnlich. Der Verlauf des Modells ist allerdings um einen Versatz niedriger als die Sensorwerte. Der Grund hierfür konnte bisher nicht identifiziert werden. Bei  $t = 0,54$  kann eine Schwingung des Massenstromverlaufs im Modell beobachtet werden, welche nicht in den Sensordaten zu finden ist.

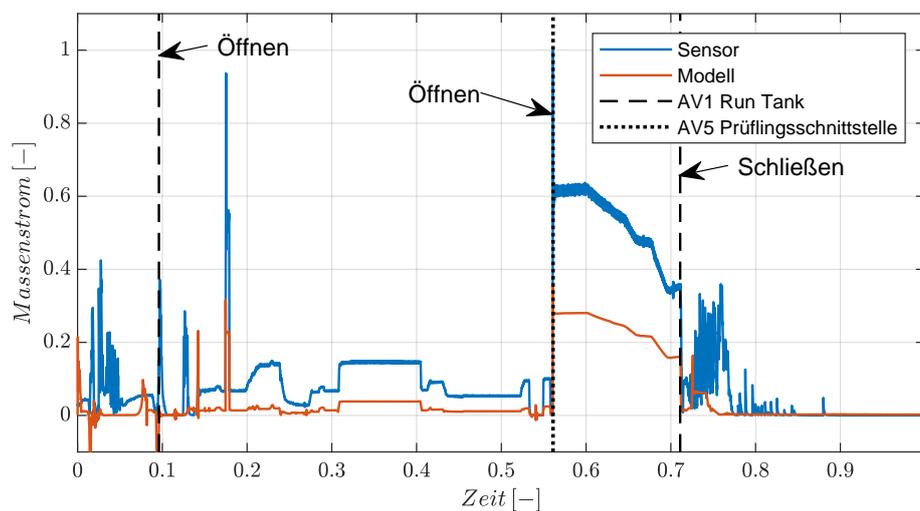


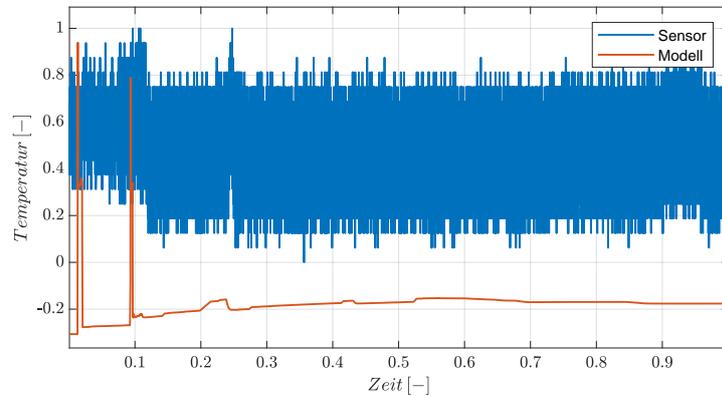
Abbildung 6.12.: Massenstromverlauf am Massenstrommesser, Sensor: M1

### 6.2.3. Temperatur

Abschließend werden die Temperaturverläufe der Sensoren TT1, TT4 und TT7 mit den Sensordaten verglichen.

Der Temperaturverlauf direkt nach dem Run Tank ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Die Sensordaten unterliegen einer absoluten Schwankung von  $\Delta T_{abs} = \pm 3 K$ . Die Temperaturspitzen im Verlauf des Modells bei  $t = 0,01$  und  $t = 0,1$  gehen dem Öffnen des AV1 zum Run Tank voraus. Der Temperaturverlauf des Modells liegt zwischen  $T = -0,3$  und  $T = -0,16$ , was einer absoluten Temperaturschwankung von etwa  $\Delta T = 1 K$  entspricht.

Im Durchschnitt unterscheiden sich der Verlauf von Modell und Sensordaten um einen Absolutwert von  $\Delta T_{abs} = 4 \text{ K}$ .



**Abbildung 6.13.:** Temperaturverlauf nach dem Run Tank, Sensor: TT1

Als nächstes wird der Temperaturverlauf des Sensors TT4 vor dem ersten Massenstrommesser betrachtet. Dieser ist in Abbildung 6.14 gezeigt. Nach dem Öffnen des Run Tanks bei  $t = 0,1$  fällt die Temperatur der Sensordaten ab auf  $T = 0,42$ . Die Temperatur des Modells fällt auf einen niedrigeren Wert  $T = 0,33$  ab. Anschließend folgt von  $t = 0,11$  bis  $t = 0,13$  ein Temperaturanstieg, der vom Modell gut wiedergegeben wird. Modell und Sensordaten erreichen etwa den gleichen Wert, mit einem Unterschied von  $T = 0,015$ . Von  $t = 0,13$  bis  $t = 0,18$  fällt die Temperatur ab und bleibt dann bis zum Schließen des AV1 zum Run Tank zwischen  $T = 0$  und  $T = 0,04$ . Die Temperatur der Sensordaten fällt nicht so stark ab und verzeichnet einige Temperaturspitzen, die nicht vom Modell wiedergegeben werden. Ab dem Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle bei  $t = 0,56$  bleiben die Temperaturverläufe nahezu konstant und unterscheiden sich um  $\Delta T = 0,28$ , was einer absoluten Differenz von etwa  $\Delta T_{abs} = 2,7 \text{ K}$  entspricht.

Die Temperatur des Sensors an der Prüflingsschnittstelle ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Es wird nur der relevante Bereich vom Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle bei  $t = 0,56$  bis zum Schließen des AV1 zum Run Tank bei  $t = 0,71$  betrachtet. Mit dem Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle sinkt die Temperatur der Sensordaten ab und erreicht bei  $t = 0,58$  den Wert  $T = 0,17$ . Die Temperatur sinkt weiter ab, jedoch sehr langsam. Beim Schließen des AV1 zum Run Tank ist ein Wert von  $T = 0,16$  erreicht. Die Temperatur vorm Öffnen des AV5 zur Prüflingsschnittstelle ist im Modell geringer als in den Sensordaten. Dementsprechend steigt die Temperatur an und erreicht bei  $t = 0,56$  einen Wert von  $T = 0,03$ . Analog zu den Sensordaten fällt die Temperatur leicht ab. Beim Schließen des AV1 zum Run Tank ist ein Wert von  $T = 0,02$  erreicht. Die beiden

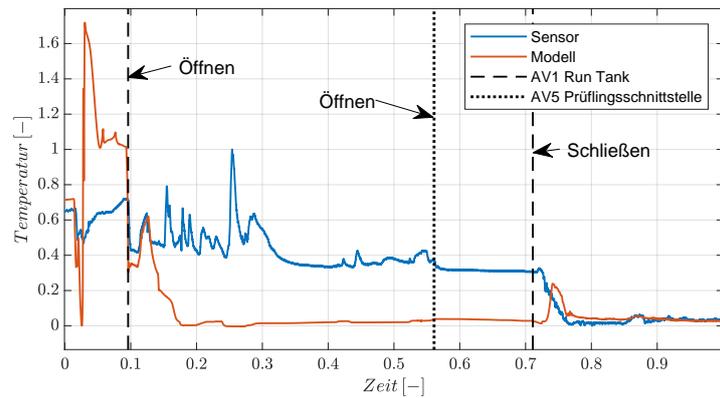


Abbildung 6.14.: Temperaturverlauf am ersten Massenstrommesser, Sensor: TT4

Verläufe unterscheiden sich um  $\Delta T = 0,14$ . Analog zum Verlauf von TT4 entspricht dies einer absoluten Differenz von  $\Delta T_{abs} = 2,7 \text{ K}$ .

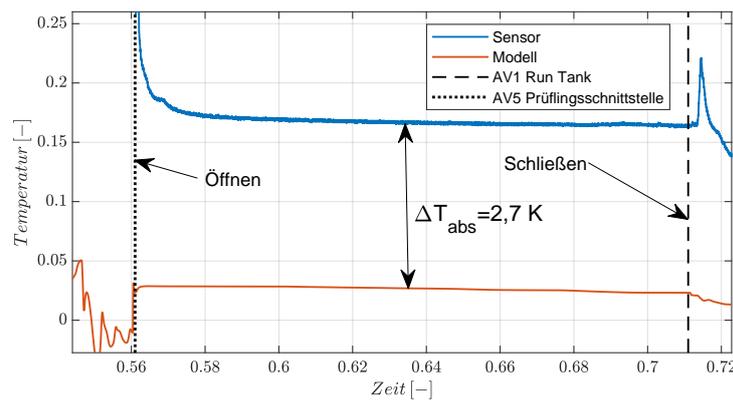


Abbildung 6.15.: Temperaturverlauf an der Prüflingschnittstelle, Sensor: TT7

# 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel werden der Inhalt der Arbeit und die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick für zukünftige Arbeiten gegeben.

## 7.1. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war das Erstellen der Modelle für die Treibstoffleitungen des LOX-, sowie LNG-Systems am P8.3. Mit diesen Modellen soll im Rahmen der Kooperation von CNES und DLR eine Simulation des gesamten Prüfstands inklusive Triebwerkssystem ermöglicht werden. Mit dem fertigen Gesamtmodell lassen sich dann die Kenngrößen der Betriebszustände vorhersagen und so hoffentlich ein Abbrechen oder gar Fehlschlagen der geplanten Testläufe verhindern. Für die Erstellung der Modelle wurden die Systeme zunächst abstrahiert und in ein vereinfachtes Schema übertragen. Anschließend wurde ein repräsentativer Ausschnitt aus den gewählten Testdaten bestimmt und die dafür nötigen Sensordaten und Ventilrückmeldungen extrahiert und passend sequenziert.

Die Modelle wurden nach Vorlage des Schemas in EcosimPro mit Komponenten der Bibliothek ESPSS erstellt. Die Randbedingungen der Modelle, wie das Bedruckungssystem, der Lagertank oder das LOX-Becken bzw. die LNG-Fackel wurden mit Sensordaten vom Prüfstand versorgt. Auch die Initialbedingungen wurden passend zu den Sensordaten gewählt. Mehrere Berechnungen zum Modellieren der Wärmeübertragung wurden ausgeführt. In diesen wird zwischen verschiedenen Leitungen, isoliert, nicht isoliert, außerhalb, oder innerhalb der Testzelle unterschieden.

Mit dem Fertigstellen der Modelle konnten die ersten Simulationen gestartet werden. Die Ergebnisse dieser Simulationen wurden aufgezeichnet und im letzten Schritt mit den Sensordaten vom Prüfstand verglichen. Besonderer Wert lag hierbei auf der korrekten Wiedergabe des Drucks vor allem im Bereich der Speisung durch den Run Tank. Diese konnte sowohl für das LOX-Modell, als auch für das LNG-Modell erreicht werden. Die Druckverläufe im Bereich der Konditionierung zeigten kleinere Abweichungen, dennoch ist eine grobe Vorhersage des Drucks auch in diesen Bereichen möglich. Weiterhin wur-

de festgestellt, dass das LOX-Modell sensitiver auf eine Änderung der Ventilstellungen reagiert als die Sensordaten. Druckabfälle, die mit diesen verknüpft werden können sind stärker ausgeprägt.

Der Massenstrom der Modelle während der Konditionierung weicht stark von den Sensordaten ab und kann nicht korrekt vom Modell vorhergesagt werden. Der Grund dafür ist die hoch transiente zweiphasige Strömung während der Speisung über den Lagertank, die mit dem gewählten Wärmeübertragungsmodell nicht korrekt modelliert werden kann. Die Form des Verlaufs während der Speisung mit dem Run Tank stimmt für beide Modelle überein. Der Massenstrom im LOX-Modell übertrifft die Sensordaten geringfügig. Im LNG-Modell sind die Werte des Modells jedoch deutlich geringer als die der Sensordaten. Eine Vorhersage in den relevanten Bereichen ist mit geringen Abweichungen bei beiden Modellen möglich.

Die Vorhersage der Temperatur während der Speisung mit dem Run Tank ist grundsätzlich möglich, unterliegt aber in den relevanten Bereichen dennoch einer Abweichung von  $\Delta T_{abs} = 2,7 K$ . Die Temperatur während der Konditionierung wird nicht korrekt wiedergegeben und kann nicht vorhergesagt werden.

## 7.2. Ausblick - zukünftige Arbeiten

Sollten weitere LNG-Testläufe verfügbar sein, wäre ein nächster Schritt die Modelle auf Übertragbarkeit auf andere Testläufe zu prüfen.

Im Laufe dieser Arbeit wurden bereits eigene Filterkomponenten erstellt, welche die Modellierung der Filter vereinfachen sollten. Diese führten allerdings in der Ausführung der Simulation zu Problemen und wurden deshalb nicht verwendet. Ein Weiterführen diesen Ansatzes wäre denkbar. Mit genaueren Informationen zu den Filtern und einer ausgereiften Filterkomponente könnten die Modelle dieser Arbeit weiter verbessert werden.

Die Modelle könnten mit den jeweiligen Bedruckungssystemen erweitert werden um eine bessere Nachbildung des Prüfstands zu erhalten. Im Zuge dessen wäre eine Implementierung der Steuerung des Kontrollventils mit Komponenten der CONTROL Bibliothek möglich.

Eine Kombination von den Modellen dieser Arbeit mit einem Modell eines Triebwerksystems ist ebenso denkbar. Mit geringfügigen Modifikationen lassen sich die Modelle für einen Testlauf mit angeschlossenem Prüfling vorbereiten und so das Gesamtsystem Prüfstand-Prüfing simulieren.

# Literaturverzeichnis

- [1] OSCHWALD, Michael: *Raumfahrtantriebe I*. RWTH Aachen, 2019
- [2] OEFELEIN, Joseph C. ; YANG, Vigor: Comprehensive review of liquid-propellant combustion instabilities in F-1 engines. In: *Journal of Propulsion and Power* 9 (1993), Nr. 5, S. 657–677
- [3] NASA: *Test of the Saturn V First Stage, 1967*. [https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/multimedia/gallery/b2stand\\_1.html](https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/multimedia/gallery/b2stand_1.html), . – Accessed: 21. 04. 2022
- [4] DLR: *Prüfstand P4.1 Höhensimulationsanlage*. [https://www.dlr.de/ra/PortalData/55/Resources/dokumente/24956\\_Handout\\_P4\\_deutsch\\_DLR\\_20160819B\\_FR.pdf](https://www.dlr.de/ra/PortalData/55/Resources/dokumente/24956_Handout_P4_deutsch_DLR_20160819B_FR.pdf), 2016. – Accessed: 30. 03. 2022
- [5] KOELLE, Dietrich E.: *Handbook of Cost Engineering for Space Transportation Systems: With TRANSCOST 7.2; Statistical-analytical Model for Cost Estimation and Economical Optimization of Launch Vehicles*. TCS TransCostSystems, 2007
- [6] SCHLECHTRIEM, Stefan: *Chemische Raumfahrtantriebe I*. Universität Stuttgart, 2021
- [7] FASOULAS, Stefanos: *Space Technology I*. Universität Stuttgart, 2019
- [8] DLR: *Forschungs-und Technologieprüfstand P8*. [https://www.dlr.de/ra/PortalData/55/Resources/dokumente/2016.04.14\\_P8\\_Handout\\_Bruemmer\\_final.pdf](https://www.dlr.de/ra/PortalData/55/Resources/dokumente/2016.04.14_P8_Handout_Bruemmer_final.pdf), 2016. – Accessed: 30. 03. 2022
- [9] SIMONTACCHI, P ; BLASI, R ; EDELINE, E ; SAGNIER, S ; RAVIER, N ; ESPINOSA-RAMOS, A ; BRETEAU, J ; ALTENHOEFER, Ph: Prometheus: Precursor of new low-cost rocket engine family. In: *8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences, EUCASS2019-FP0743, Madrid, Spain, 2019*

- 
- [10] SOLLER, S ; RACKEMANN, N ; PREUSS, A ; KROUPA, G: Application of laser-ignition systems in liquid rocket engines. In: *Space Propulsion Conference* Bd. 2016, 2016
- [11] DLR: *Third test cell for European Research and Technology Test Stand P8*. [https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2021/02/20210414\\_inauguration-p8-3.html](https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2021/02/20210414_inauguration-p8-3.html), 2021. – Accessed: 30. 03. 2022
- [12] GÉNIN, Chloé ; VIEILLE, Bruno: CNES/DLR cooperation for the preparation of future reusable launcher cryogenic engines. In: *Proceedings of the 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences*, 2019
- [13] DEEKEN, Jan C. ; OSCHWALD, Michael ; SCHLECHTRIEM, Stefan: Current status of the DLR LUMEN Project. In: *Proceedings-IWSP 2018* (2018)
- [14] TRAUDT, Tobias ; WAXENEGGER-WILFING, Günther ; SANTOS HAHN, R dos ; WAGNER, Bernd ; DEEKEN, Jan: An overview on the turbopump Roadmap for the Lumen Demonstrator engine and on the new turbine test facility. In: *68th International Astronautical Congress*, 2017, S. 25–29
- [15] TRAUDT, Tobias ; DOS SANTOS HAHN, Robson H. ; MASON, Thomas ; MADER, Christian ; DEEKEN, Jan C. ; OSCHWALD, Michael ; SCHLECHTRIEM, S: LUMEN Turbopump-Design and Manufacturing of the LUMEN LOX and LNG Turbopump components. In: *32nd International Symposium on Space Technology and Science*, 2019
- [16] GOURIET, Jean B. ; BUCHLIN, Jean-Marie ; LEMA, Marcos ; PETRO, Z ; VETRANO, Maria R. ; PEVERONI, Laura ; STEELANT, Johan: Multiphase fluid hammer with non-cryogenic and cryogenic fluids. In: *8th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles, Lisbon*, 2015
- [17] CONCIO, Pierluigi ; D’ALESSANDRO, Simone ; NASUTI, Francesco: Development of a Film-Cooled Thrust Chamber Component in the ESPSS Library. In: *7th Space Propulsion Conference*, 2021
- [18] AMER, J ; MORAL, J ; SALVÁ, JJ: Adaptation of the ESPSS/EcosimPro platform for the design and analysis of liquid propellant rocket engines. (2012)
- [19] HAHN, Robson H. ; DEEKEN, Jan ; SCHLECHTRIEM, Stefan: Comparative Study of Ethanol and Kerosene Propellant for Gas-generator Fed Upper Stage Application, Using EcoSimPro. In: *ISTS. Matsuyama Ehime, Japan* (2017)

- 
- [20] HAHN, RHS ; WAXENEGGER, G ; DEEKEN, J ; OSCHWALD, M ; SCHLECHTRIEM, S: Utilization of LO<sub>x</sub>/LCH<sub>4</sub> for Expander-Bleed Cycle at Upper Stage Engine Application. In: *EUCASS 2017* (2017)
- [21] EMPRESARIOS, AGRUPADOS: EcosimPro 2019 Version 6.0 Modelling and Simulation Software Complete Reference Manual. (2019)
- [22] EMPRESARIOS, AGRUPADOS: EcosimPro 2019 Version 6.0 Modelling and Simulation Software Simulation Guide. (2019)
- [23] VILÁ, J ; MORAL, J ; FERNÁNDEZ-VILLACÉ, V ; STEELANT, J: An overview of the ESPSS libraries: Latest developments and future. In: *Proc. Space Propulsion Conf.*, 2018
- [24] EMPRESARIOS, AGRUPADOS: European Space Propulsion System Simulation ESPSS EcosimPro Libraries User Manual. (2018)
- [25] WETTER.COM: *Wetterdaten der Station Obersulm-Willsbach.* [https://www.wetter.com/wetter\\_aktuell/rueckblick/deutschland/heilbronn/DE0004347.html?sid=Q242&timeframe=1y](https://www.wetter.com/wetter_aktuell/rueckblick/deutschland/heilbronn/DE0004347.html?sid=Q242&timeframe=1y), 2021. – Accessed: 16. 02. 2022
- [26] Norm DIN EN 10217-7 10 2009. *Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen – Technische Lieferbedingungen – Teil 7: Rohre aus nichtrostenden Stählen*
- [27] WÄRMEATLAS, VDI: *11. Auflage.* 2013. – ISBN 9783642199813
- [28] DOE, US: *Liquefied natural gas: Understanding the basic facts.* [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/LNG\\_primerupd.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/LNG_primerupd.pdf), 2004. – Accessed: 16. 02. 2022
- [29] Norm DIN EN ISO 12241 03 2021. *Wärmedämmung an haus- und betriebstechnischen Anlagen - Berechnungsregeln'*
- [30] DEUTSCHER, Wetterdienst: *Windkarten zur mittleren Windgeschwindigkeit.* [https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland\\_und\\_bundeslaender.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland_und_bundeslaender.html), 2004. – Accessed: 15. 02. 2022
- [31] KLEIBER, Infrared: *Emissionsgradtabelle.* <https://www.kleiberinfrared.com/index.php/de/amanwendungen/emissionsgrade.html>, . – Accessed: 15. 02. 2022
- [32] KNEE, Reinhold: *Wärme und Stoffübertragung Formelsammlung.* RWTH Aachen, 2015

- [33] MOOSAVI, Seyedeh R. ; QAJAR, Jafar ; RIAZI, Masoud: A comparison of methods for denoising of well test pressure data. In: *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 8 (2018), Nr. 4, S. 1519–1534
- [34] MATLAB: *Version 9.6.0.1072779 (R2019a)*. Natick, Massachusetts : The MathWorks Inc., 2019

# A. Anhang

## A.1. Gesamte Ecosim/ESPSS Modelle

In diesem Anhang sind die Modelle des LOX-Systems und des LNG-Systems im Gesamten dargestellt.

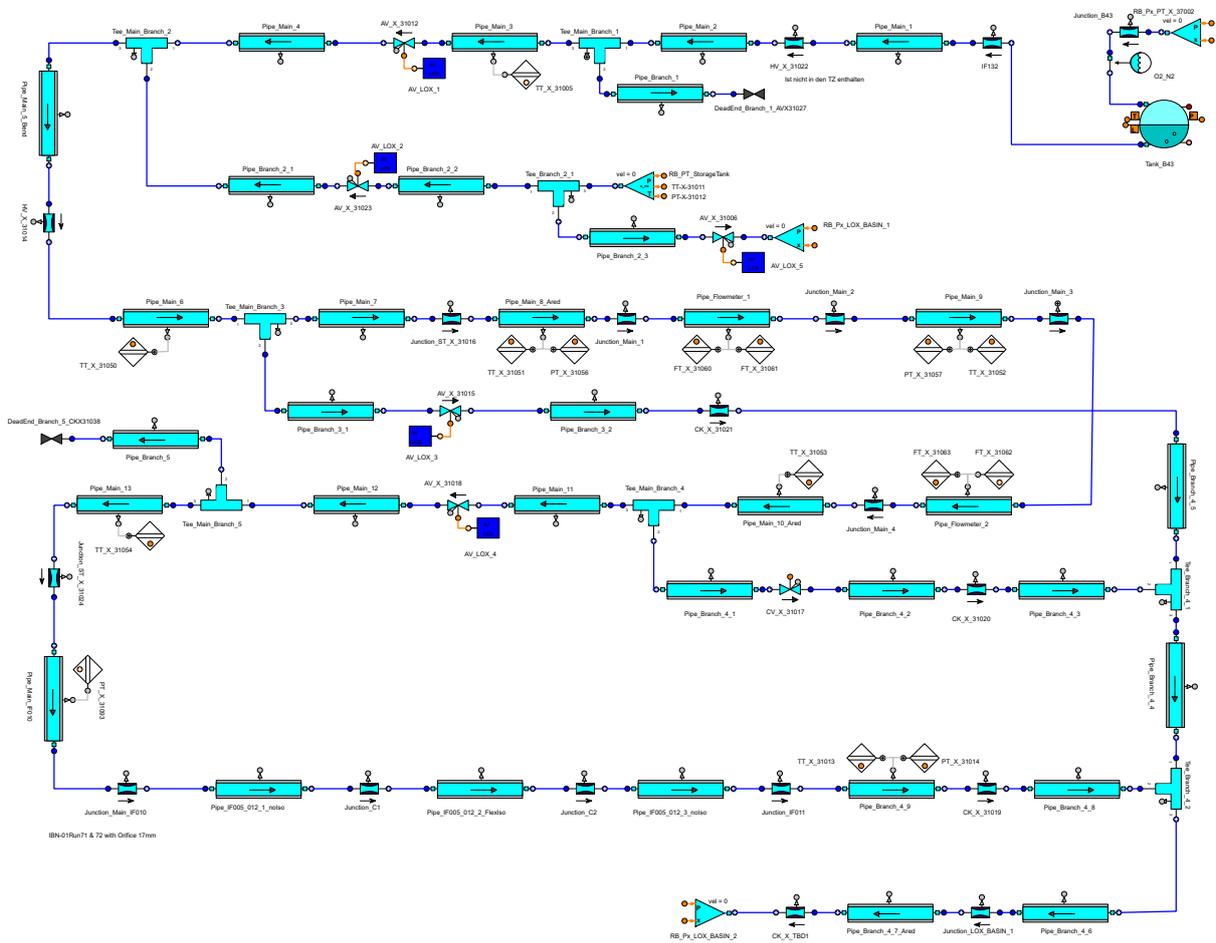


Abbildung A.1.: Ecosim/ESPSS-Modell des LOX Systems



## A.2. Parameter der Automatikventile

Hier sind alle Öffnungs- und Schließungszeiten, sowie Widerstandsbeiwerte der verwendeten Automatikventile eingetragen.

**Tabelle A.1.:** Parameter der Automatikventile des LOX Systems

Ventil	$\tau_{open} \cdot t_n$	$\tau_{close} \cdot t_n$	Zetawert $\zeta \cdot \zeta_n$
LOX Run Tank	0,374	0,056	0,36
LOX Bypass Lagertank	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,99
LOX Bypass LOX-Becken	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,99
LOX Entlastungsleitung	0,11	0,294	0,83
LOX Prüflingsschnittstelle	0,07	0,011	0,33
LNG Run Tank	0,374	0,042	0,39
LNG Bypass Lagertank	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,99
LNG Bypass LOX-Becken	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,99
LNG Entlastungsleitung	0,1	0,3	0,83
LNG Prüflingsschnittstelle	0,09	0,015	0,33

### A.3. Wärmeübertragungskoeffizienten

Zur Vollständigkeit sind hier alle verwendeten Wärmeübertragungskoeffizienten aufgelistet.

**Tabelle A.2.:** Wärmeübertragungskoeffizienten der Modelle

Rohrleitung	Wärmeübertragungskoeffizient $\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$
LOX Hauptleitung	0
LOX Bypass zum LOX-Becken	0,39
LOX Entlastungsleitung 1	0,45
LOX Entlastungsleitung 2	0,54
LOX Leitungen außerhalb der Testzelle	36,47
LOX Flexschlauch	8,4
LNG Hauptleitung	0
LNG Bypass zum LOX-Becken	0,39
LNG Entlastungsleitung 1	0,52
LNG Entlastungsleitung 2	0,60
LNG Leitungen außerhalb der Testzelle	38,02
LNG Flexschlauch	8,25