

Bachelorarbeit

Florian List

Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme eines komponentenbasierten Reagensdosiersystemprüfstands für den Auftauversuch

Florian List

**Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme
eines komponentenbasierten
Reagensdosiersystemprüfstands für den
Auftauversuch**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau/Antrieb und Fahrwerk
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
MAN Truck & Bus AG
Motorenwerk Nürnberg / Abt. EPXC
Vogelweiherstraße 33
90441 Nürnberg

Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Volkher Weißermel
Zweitprüfer : Herr Dipl.-Ing. (FH) Marc Andre Winterhoff

Industrieller Betreuer: Herr Dipl.-Ing. (FH) Marc Andre Winterhoff, EPXCE

Abgabedatum: 30.04.2014

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Florian List

Thema der Bachelorthesis

Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme eines komponentenbasierten Reagensdosiersystemprüfstands für den Auftauversuch

Stichworte

Prüfstandstechnik, Abgasnachbehandlungssystem, SCR-Katalysator, Zertifizierung, Messtechnik, Regelungstechnik, Programmierung, Mobile Maschinen

Kurzzusammenfassung

Beeinflusst durch steigenden Kostendruck und kürzer werdende Entwicklungszeiten besteht in der heutigen Motorentwicklung Bedarf nach effizienten Arbeitsmethoden. Es wird daher ein Prüfstand entwickelt, mithilfe dessen die Auftauvalidierung von Reagensdosiersystemen unter realitätsnah abgebildeten Bedingungen durchgeführt werden kann.

Durch den Einsatz einer Wasserpumpe, einer volumenangepassten Beheizungsstrecke und einer anwenderfreundlichen Prüfstandssteuerung entsteht die Möglichkeit zuvor im Fahrzeug aufgenommene Volumenströme und Temperaturverläufe nachzubilden und die erforderlichen Validierungsläufe zu wiederholen, vorzubereiten und auf veränderte Dosiersysteme zu übertragen.

Name of Student

Florian List

Title of the paper

Dimensioning, installation and initial operation of a component based reagent dosing system test bench for thaw process testing

Keywords

Test bench equipment, exhaust aftertreatment, SCR-catalyst, certification, measurement instrumentation, automatic control engineering, programming, nonroad

Abstract

Influenced by increasing cost pressure and and shortend development periods today´s engine development departments require efficient work methods.

Therefore a test bench is developed with the aid of whose thaw testing of reagent dosing systems can be carried out under real-life conditions.

By application of a water pump, a volume-fitted heating installation and an user-friendly control software the possibility to reproduce previously recorded flow rates and temperature profiles is created. Successful test runs can be repeated, prepared and transferred to modified dosing systems.

Danksagung

Zuerst gilt mein Dank an dieser Stelle der Abteilung EPXC der MAN Truck & Bus AG im Motorenwerk Nürnberg. Vielen Dank für das vergangene, hochinteressante Dreivierteljahr mit Euch.

Besonders erwähnen möchte ich die Herren Dipl.-Ing. Tobias Herrmann, Kai Otto, Franz Schmidt und Reinhard Lämmermann sowie die Herren Michael Manrique-Schwarz, Jürgen Hyna, Kay Krämer, Viktor Bachmann, Walter Streilein, Andreas Böllert, Andreas Hesse, Gernot Vogelhuber und Dominik Ganzer, die mit Ihrer individuellen Unterstützung und Ihrem Können zum Gelingen des Projektes beigetragen haben. Ich danke Euch.

Meinen Betreuern Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Weißermel und Herrn Dipl.-Ing. Marc Winterhoff danke ich für die Betreuung der Arbeit sowie viele fachlich anspruchsvolle Diskussionen und Denkanstöße, die mir geholfen haben, meine Aufgabe zu erfüllen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Danksagung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Liste der Abkürzungen	VIII
Glossar	X
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Formelverzeichnis	XVI
1 Einleitung	1
2 Der Stickoxidreduktionskatalysator	3
3 Zertifizierung von Offroad-Dieselmotoren	8
3.1 Europäische Union	8
3.2 Vereinigte Staaten von Amerika	11
4 Prüfstandskonzept	16
4.1 Anforderungen.....	16
4.2 Grundaufbau.....	16
4.3 Resultierende Arbeitsschritte	18
5 Dimensionierungsversuch	19
5.1 Versuchszweck.....	19
5.2 Versuchsmotor.....	19
5.3 Vermessene Komponenten	20
5.4 Prüfstands- und Messtechnik	21
5.5 Versuchsaufbauten.....	23
5.6 Versuchsdurchführung.....	25
5.7 Versuchsauswertung und Ergebnisdarstellung.....	26
5.8 Ergebnis	29
6 Berechnung der benötigten Wärmemenge	31
6.1 Arbeitshypothese Temperaturverlauf.....	31
6.2 Physikalische Grundlage	33

6.3	Fluidparameter.....	35
6.4	Angewandte Berechnung	37
7	Arbeitspaket Wasserpumpe.....	40
7.1	Lastenheft.....	40
7.2	Angebotseinholung / Auswahl	41
8	Arbeitspaket Heizungssystem	42
8.1	Lastenheft.....	42
8.2	Auswahl und Analyse	42
9	Elektrische Anlage des Prüfstands	46
9.1	Heizung	46
9.2	Anschluss der Wasserpumpe	48
10	Arbeitspaket Mess- und Steuerungssystem.....	50
10.1	Software und Programmierumgebung	50
10.2	Hardware	51
11	Prüfstandssoftware	53
11.1	Benutzeroberfläche.....	53
11.2	Programmstruktur	55
12	Konstruktion und Fertigung	61
12.1	CAD-Konstruktion	61
12.2	Fertigung der Druckleitung	66
12.3	Fertigung der Saugleitung	67
12.4	Weitere Komponenten	70
13	Montage des Prüfstands	71
14	Inbetriebnahme.....	74
14.1	Vorbereitung	74
14.2	Inbetriebnahme Manueller Modus	75
14.3	Inbetriebnahme Automatischer Modus	77

15	Projektabschluss / Ausblick	81
16	Literaturverzeichnis	82
17	Anhang.....	85
Anhang A	I
	Projektvorbereitende Präsentation	I
Anhang B	IV
	Übersicht Messergebnisse Dimensionierungsversuch	IV
Anhang C	VII
	Frontpanel Flo-Motion 2.0	VII
Anhang D-1	VIII
	Blockschaltprogramm im Modus „true“	VIII
Anhang D-2	IX
	Blockschaltprogramm im Modus „false“	IX
Anhang E-1	X
	Zeichnung Wasserpumpe.....	X
Anhang E-2	XI
	Zeichnung Ausgleichsbehälter	XI
Anhang E-3	XII
	Zeichnung Druckleitung.....	XII
Anhang E-4	XIII
	Zeichnung Schweißstutzen	XIII

Liste der Abkürzungen

AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
AI	Analog Input (dt.: Analogeingang)
AO	Analog Output (dt.: Analogausgang)
BNC	Bayonet Neill Concelman
CAD	Computer Aided Design (dt.: rechnerunterstütztes Konstruieren)
CARB	California Air Resources Board (dt.: Luftressourcenausschuss Kalifornien)
CEE	Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment (dt.: Internationale Kommission für die Regelung der Zulassung elektrischer Ausrüstungen)
EDC	Electronic Diesel Control (dt.: Elektronische Dieselmotorsteuerung)
EPA	Environmental Protection Agency (dt.: Umweltschutzbehörde)
ETK	Entwicklungstastkopf
EU	Europäische Union
FU	Frequenzumrichter, Frequenzumformer
HWKL	Heizwasserkreislauf
HWL	Harnstoffwasserlösung
I/O	Input / Output (dt.: Eingang / Ausgang)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LKW	Lastkraftwagen
Ltg	Leitung
MAN	MAN Truck & Bus AG
NRSC	Non-Road Steady Cycle (dt.: Nicht straßengebundener Stationärzyklus)
NRTC	Non-Road Transient Cycle (dt.: Nicht straßengebundener Transientzyklus)
NTE	Not to exceed (dt.: nicht zu verlassen)
OBD	On Board Diagnosis (dt.: Fahrzeugeigendiagnose)
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt.: Erstausrüster)

PST	Prüfstand
RDS	Reagensdosiersystem
SCR	Selective Catalytic Reaction (dt.: selektive, katalytische Reaktion)
T4F	Tier 4 Final
T4I	Tier 4 Interim
TÜV	Technischer Überwachungsverein
USA	United States of America (dt.: Vereinigte Staaten von Amerika)

Glossar

AdBlue®	AdBlue® ist der im europäischen Wirtschaftsraum hauptsächlich verwendete Handelsname für eine Lösung aus 31,8 bis 33,2 % Harnstoff und Wasser, die in der selektiven katalytischen Reaktion eingesetzt wird. [1]
CAN-Bus	Das Controller Area Network (CAN) stellt ein seriell aufgebautes Bussystem dar, über welches verschiedene Steuergeräte eines Fahrzeugs untereinander kommunizieren und Befehle austauschen. [2]
Case-Struktur	Bezeichnet eine Softwarestruktur, die das Umschalten zwischen zwei verschiedenen Fällen ermöglicht, denen jeweils bestimmte Funktionen zugewiesen sind. Case-Strukturen werden durch boolesche Operatoren geschaltet. [3]
Führungsgröße	Als Führungsgröße bezeichnet man in einem zu regelnden System den aktuellen Sollwert des Systems. [4]
Regelgröße	Unter der Regelgröße wird der Istwert des zu Regelkreises verstanden, der als Rückkopplung dem Regler zugeführt wird. [4]
Vector Canalyzer	Vector Canalyzer ist eine Software der Firma Vector Informatik GmbH, die zur Analyse und Befehlssendung im CAN-Bussystem eingesetzt wird.
While-Schleife	Bezeichnet eine Softwarestruktur, die bis zum Vorliegen einer Abbruchbedingung die enthaltenen Abläufe wiederholt. [5]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schema Abgasnachbehandlung	4
Abbildung 2-2: Funktionsschema RDS mit elektr. beheizten Reagensleitungen	5
Abbildung 2-3: Funktionsschema RDS mit kühlwasserbeheizten Reagensleitungen	6
Abbildung 4-1: Grundschemata Prüfstandsentswurf.....	18
Abbildung 5-1: Auswerteeinheit	22
Abbildung 5-2: Messfühler mit Ultraschallkopf	22
Abbildung 5-3: Messstelle pVAR6	22
Abbildung 5-4: Detailansicht Messverzweigung	22
Abbildung 5-5: Versuchsaufbauschema Ausgangszustand.....	23
Abbildung 5-6: Versuchsaufbauschema mit Kurzschluss	24
Abbildung 5-7: Harnstofftank im Prüfstand.....	24
Abbildung 5-8: Anschlussterminal Tankgeber	24
Abbildung 5-9: Anschluss Fördermodul.....	25
Abbildung 5-10: Fördermodul im Prüfstand.....	25
Abbildung 5-11: Magnettaktventil.....	25
Abbildung 5-12: Volumenströme über Motordrehzahl.....	26
Abbildung 5-13: Vorlaufdrücke über Motordrehzahl.....	27
Abbildung 5-14: Rücklaufdrücke über Motordrehzahl	27
Abbildung 5-15: Druckverlust im Heizwasserkreislauf über Motordrehzahl.....	28
Abbildung 5-16: Druckverlust der Komponenten über Motordrehzahl.....	28
Abbildung 5-17: Druckverlust über Motordrehzahl, Detailansicht	29
Abbildung 5-18: Druckverlust im Heizwasserkreislauf über Volumenstrom (Pumpkennfeld)	30

Abbildung 6-1: Kühlwasserverlauf des D26 T4I über der Zeit im EPA-Testzyklus.....	31
Abbildung 6-2: Ausschnitt aus Abb. 6-1, Gradienten nach Motorstart.....	32
Abbildung 6-3: Ausschnitt aus Abb. 6-1, maximaler Zyklusgradient.....	32
Abbildung 6-4: Wärmemengen in Abh. der Temperaturerhöhung über Gesamtvolumen	38
Abbildung 6-5: Heizleistungen in Abh. der Temperaturerhöhung über Gesamtvolumen	39
Abbildung 8-1: Hezelement mit Einschraubgewinde	43
Abbildung 8-2: Heizleistung über Gesamtvolumen, Detailansicht	44
Abbildung 8-3: Mögliches Gesamtvolumen in Abhängigkeit der Heizleistung.....	45
Abbildung 9-1: Schalteinheit Heizungssystem	47
Abbildung 9-2: Übersicht Schaltkomponenten	47
Abbildung 9-3: Verkabelung der Steckplätze	47
Abbildung 9-4: Schaltschrank Bedienpanel.....	49
Abbildung 9-5: Schaltschrank Innenansicht	49
Abbildung 10-1: I/O Modul	52
Abbildung 11-1: Bedienpanel Flo-Motion 2.0	53
Abbildung 11-2: Blockdiagrammüberblick Flo-Motion 2.0.....	55
Abbildung 11-3: Eingangskanalsetup	56
Abbildung 11-4: Ausgabekanalsetup	56
Abbildung 11-5: Zyklusdatei auswählen	56
Abbildung 11-6: Testergebnisdatei erzeugen.....	56
Abbildung 11-7: Messerfassung aktiviert.....	57
Abbildung 11-8: Messerfassung deaktiviert.....	57
Abbildung 11-9: Pumpe aktiviert	58

Abbildung 11-10: Pumpe deaktiviert.....	58
Abbildung 11-11: Heizung aktiviert	58
Abbildung 11-12: Heizung deaktiviert	58
Abbildung 11-13: Automatikmodus aktiviert	59
Abbildung 11-14: Automatikmodus deaktiviert	59
Abbildung 11-15: Signalverteilung Anzeigeelemente.....	60
Abbildung 12-1: Gitterboxmodell mit Hauptmaßen	61
Abbildung 12-2: Pumpenersatzkörper mit Hauptmaßen	62
Abbildung 12-3: Druckleitung mit Bohrungen	62
Abbildung 12-4: Stutzen auf Druckleitung	62
Abbildung 12-5: Vollständige Druckleitung mit Heizelementen	63
Abbildung 12-6: Pumpe mit Rohrleitungen auf Grundplatte.....	64
Abbildung 12-7: Frontansicht der Leitungen mit Heizelementen	64
Abbildung 12-8: Ausgleichsbehälter auf Standfüßen	65
Abbildung 12-9: Übersicht der Komponenten auf Grundplatte	65
Abbildung 12-10: Gesamtraumbedarf aller Komponenten in der Gitterbox.....	65
Abbildung 12-11: Schweißstutzen stehend	67
Abbildung 12-12: Schweißstutzen liegend	67
Abbildung 12-13: Druckleitung mit Messstellen und Einschraubstutzen	67
Abbildung 12-14: Wärme gedämmte Druckleitung.....	67
Abbildung 12-15: Saugleitung Teil 1 mit Ausgleichstankanschluss	68
Abbildung 12-16: Volumenstrommessuhr	68
Abbildung 12-17: Saugleitung Teil 2 mit Messstellen.....	69

Abbildung 12-18: Montierte Saugleitung.....	69
Abbildung 12-19: Wärmegeämmte Saugleitung.....	69
Abbildung 12-20: Leitungsständer	70
Abbildung 12-21: Schraubscnelle	70
Abbildung 12-22: Ausgleichsbehälter auf Ständer	70
Abbildung 13-1: RDS-Prüfstand.....	72
Abbildung 13-2: RDS-Prüfstand Pumpe	72
Abbildung 13-3: Kurzschlussleitung.....	72
Abbildung 13-4: Bedienplatz RDS-PST	73
Abbildung 14-1: Funktionsschema des RDS-Prüfstands	74
Abbildung 14-2: RDS mit elektr. beheizten Leitungen im Prüfstands Aufbau.....	75
Abbildung 14-3: Volumenstrommessung Manuelbetrieb	76
Abbildung 14-4: Wassertemperaturverlauf bei Sollwertsprung.....	76
Abbildung 14-5: Wassertemperaturverlauf 1 Automatikmodus.....	77
Abbildung 14-6: Volumenstrommessung Automatikbetrieb	78
Abbildung 14-7: Wassertemperaturverlauf 2 Automatikmodus.....	79
Abbildung 14-8: Wassertemperaturverlauf 3 Automatikmodus.....	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Emissionsgrenzen EU-Gesetzgebung [9]	10
Tabelle 3-2: Emissionsgrenzen US-Gesetzgebung [11]	13
Tabelle 4-1: Messstellenplan RDS-Prüfstand.....	17
Tabelle 5-1: Motorkenndaten Versuchsmotor	20
Tabelle 5-2: Übersicht Versuchskomponenten.....	21
Tabelle 5-3: Kanalübersicht Dimensionierungsversuch	23
Tabelle 5-4: Übersicht Messreihen	25
Tabelle 6-1: Übersicht spez. Wärmekoeffizient	35
Tabelle 6-2: Übersicht Dichte.....	36
Tabelle 6-3: Übersicht Wärmeleitfähigkeit	36
Tabelle 6-4: spez. Wärmekoeffizient in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung.....	37
Tabelle 6-5: Dichte in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung	37

Formelverzeichnis

Formel 6-1: Wärmekapazität.....	33
Formel 6-2: spezifische Wärmekapazität.....	33
Formel 6-3: Wärmemenge in Abhängigkeit der Wärmekapazität	33
Formel 6-4: Wärmemenge in Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität	33
Formel 6-5: Stoffmasse.....	34
Formel 6-6: Leistung	34
Formel 6-7: Einheitenumformung Stunden in Sekunden	34
Formel 6-8: Einheitenumformung Watt in Joulesekunden	34
Formel 9-1: Ohmsches Gesetz	46
Formel 9-2: Elektrische Leistung	46

1 Einleitung

Moderne Verbrennungsmotoren werden vom Gesetzgeber mit stetig strenger werdenden Emissionsbegrenzungen limitiert. Der verfahrens- und verbrennungstechnische, sowie der zur gesetzeskonformen Zertifizierung notwendige Aufwand steigt mit jeder neu in Kraft tretenden Emissionsstufe deutlich. Diese Rahmenbedingungen erfordern den Einsatz bedarfsgerechter Arbeitsmethoden und Validierungsverfahren, um in kurzen, kostenoptimierten Prozessen moderne Hochleistungsmotoren und deren Peripherie entwickeln zu können.

Im Segment der Dieselmotoren ist deshalb der Stellenwert einer effektiven, auf den entsprechenden Motor angepassten Abgasnachbehandlung (AGN) deutlich gestiegen. AGN-Systeme werden heutzutage konsequent in das Gesamtsystem „Dieselmotor“ integriert und von zentralen Stellen wie zum Beispiel der Electronic Diesel Control (EDC) überwacht, gesteuert und geregelt.

Zur Zertifizierung eines Dieselmotors nach den gültigen Richtlinien für den als Nonroad-Einsatz bezeichneten Betrieb sind daher in den letzten Jahren auch umfangreiche Funktionstests dieser immer komplexer werdenden AGN-Systeme notwendig geworden. Hierbei handelt es sich sowohl um Überprüfungen von Dauerfestigkeit und Funktionsstabilität, als auch den Nachweis der gesetzeskonformen Funktion bei Frost oder weiteren extremen Umweltbedingungen.

Im Laufe dieser Arbeit soll ein Prüfstand entwickelt werden, der die Validierung eines Mehrkomponenten-Reagensdosiersystemen (RDS) ermöglicht und den beschriebenen Anforderungen an eine effiziente Arbeitsmethodik entspricht.

Diese zu überprüfenden Systeme finden Einsatz im in der Dieselmotorik häufig verwendeten Technologiebereich der selektiven katalytischen Reaktion (SCR). Es handelt sich hierbei um die mittels eindosierter Harnstoffwasserlösung (HWL) unterstützte Reduktion von Stickoxidanteilen des Rohabgasstroms in einer verfahrenstechnischen Anlage aus vorgeschaltetem Mischer und daran angeschlossenen speziell beschichteten Katalysator. Dabei ist die Stickoxidreduktion im SCR-Katalysator direkt abhängig von der korrekten Funktion des RDS.

Besonderes Augenmerk benötigt das RDS im Geschäftsbereich „Externe Motoren“ eines Original Equipment Manufacturers (OEM), da hier häufig ein „Zuständigkeitsmix“ entsteht, in dem der Kunde Bestandteile des RDS selbst definiert, einkauft und später im Fahrzeug

montiert, der OEM jedoch bei der Zertifizierung für die Einhaltung der Emissionsgrenzen garantiert.

Daher ist eine genaue und effektive Überprüfung dieser oftmals erst sehr spät im Entwicklungsprozess definierten Bauteile im Zusammenspiel mit den OEM Komponenten notwendig. Es besteht erhöhter Bedarf nach einer kurzfristigen Durchführbarkeit des Prüfvorgangs, da sich in einem modernen, dynamischen Motorenentwicklungsprozess häufig kurze Zeitfenster ergeben, die über eine erfolgreiche oder eine gescheiterte Zertifizierung des entsprechenden Motors entscheiden können.

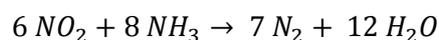
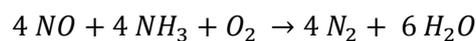
2 Der Stickoxidreduktionskatalysator

2.1.1 Funktionsweise des SCR-Katalysators

Wie bereits beschrieben erfordern moderne Dieselmotoren aufgrund vorgegebener Emissionsgrenzen den Einsatz einer effektiven Abgasreinigungsanlage. Das in dieser Arbeit betrachtete RDS stellt dabei einen Bestandteil der SCR-Katalyse dar.

Dabei handelt es sich um die Reduktion von NO_x -Schadstoffanteilen durch eine chemische Reaktionskette. Zuerst wird im vorgeschalteten, strömungsoptimierten Mischer der Rohabgasstrom mit der eindosierten HWL durchsetzt. Aus dieser entsteht im Laufe einer Vorreaktion der für die SCR-Katalyse notwendige Ammoniak. Diese Vorreaktion kann dabei entweder in einem vorgeschalteten Hydrolysekatalysator oder direkt im eigentlichen SCR-Katalysator ablaufen.

Nach Eintritt des Gemisches aus Rohabgas und Ammoniak (sowie einigen Abfallprodukten der Vorreaktion) erfolgt im speziell beschichteten SCR-Katalysator die Umsetzung der NO_x -Schadstoffe nach folgenden Reaktionsgleichungen (vgl. [6]):



Dabei laufen permanent alle drei gezeigten Reaktionsmechanismen parallel ab, in Abhängigkeit der Betriebstemperatur verschiebt sich jedoch das prozentuale Verhältnis.

Die Produkte der selektiven katalytischen Reaktion sind in jedem Fall Stickstoff (N_2) und Wasser (H_2O). Lediglich im Falle einer Überdosierung von HWL kommt es auch zu einem Austritt von Ammoniak. Zur Vermeidung von Geruchsbelästigung wird dieser Austritt im Regelfall durch einen NH_3 -Sperrkatalysator vermieden, der das Edukt Ammoniak ebenfalls zu den Produkten Wasser und Stickstoff oxidiert.

Abbildung 2-1 zeigt das Zusammenspiel von Motor und Abgasnachbehandlungsstrecke unter Einbeziehung des RDS. Der ebenfalls dargestellte Oxidationskatalysator stellt eine zusätzliche Möglichkeit zur Wirkungsgradsteigerung der SCR-Katalyse dar. Dieser ist nicht zwingend notwendig, unabhängig vom RDS und wird daher nicht weiter betrachtet.

vgl. [6]

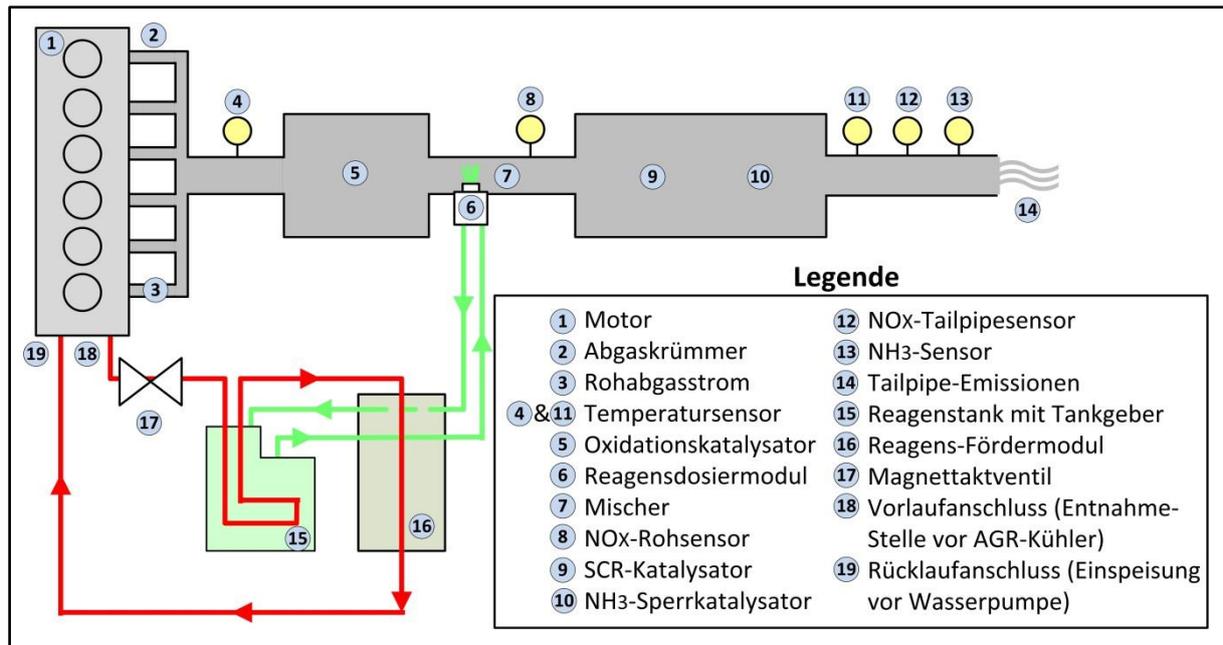


Abbildung 2-1: Schema Abgasnachbehandlung

2.1.2 Funktionsweise des RDS

Die Eindosierung der für die selektive katalytische Reaktion benötigten Harnstoffwasserlösung (AdBlue®) in den dem eigentlichen SCR-Katalysator vorgeschalteten Mischer kann auf verschiedenen Wegen realisiert werden.

In der Reagenzfördertechnik wird zwischen luftunterstützten und luftlosen Dosiersystemen unterschieden, wobei die ohne Luftunterstützung arbeitenden Systeme mittlerweile bevorzugt Verwendung finden. Gründe hierfür sind sowohl der geringfügige Verbrauchsvorteil entstehend aus dem dann nicht mehr permanent belasteten Luftpresser als auch der durch reduzierte Leitungsanzahl entstehende Bauraumvorteil. Das entscheidendste Kriterium ist jedoch die Einsatzmöglichkeit in Fahrzeugapplikationen ohne vorhandenen Luftpresser.

Deutlich geringere Abweichungen weisen die verschiedenen RDS hinsichtlich der Funktionssicherstellung auf.

Bedingt durch den Gefrierpunkt der HWL von -11°C besteht Bedarf nach einer intermediär zuschaltbaren Lösung zur Beheizung des gesamten RDS. Anwendung findet hier herstellerübergreifend die bedarfsabhängige Systembeheizung unter Verwendung von abgezweigtem Motorkühlwasser. Bei geöffnetem Magnettaktventil wird dieses über die verbauten Heizleitungen, den Tankgeber sowie die Heizkanäle im Fördermodul durch die Dosiersystemstrecke geleitet und anschließend wieder in den innermotorisch umlaufenden Kühlwasserstrom eingespeist. Der Beheizungsvorgang wird zum Schutz der Komponenten

vor Überhitzung beim vollständigen Erreichen der Dosierfähigkeit durch Schließen des Magnettaktventils unterbrochen.

Der Hauptunterschied zwischen den verschiedenen Systemkonzepten liegt meist in der Beheizungsstrategie der Reagensförderleitungen, welche entweder elektrisch oder ebenfalls mittels Motorkühlwasser beheizt werden.

Die Schemata 2-2 und 2-3 zeigen die beschriebenen Beheizungskonzepte und den Grundaufbau der verschiedenen Beheizungsstrategien. Das Förderprinzip im Betrieb mit und ohne Luftunterstützung wird aus dieser Betrachtung ausgeklammert, da durch die Arbeitsweise kein Einfluss auf die Funktionalität besteht.

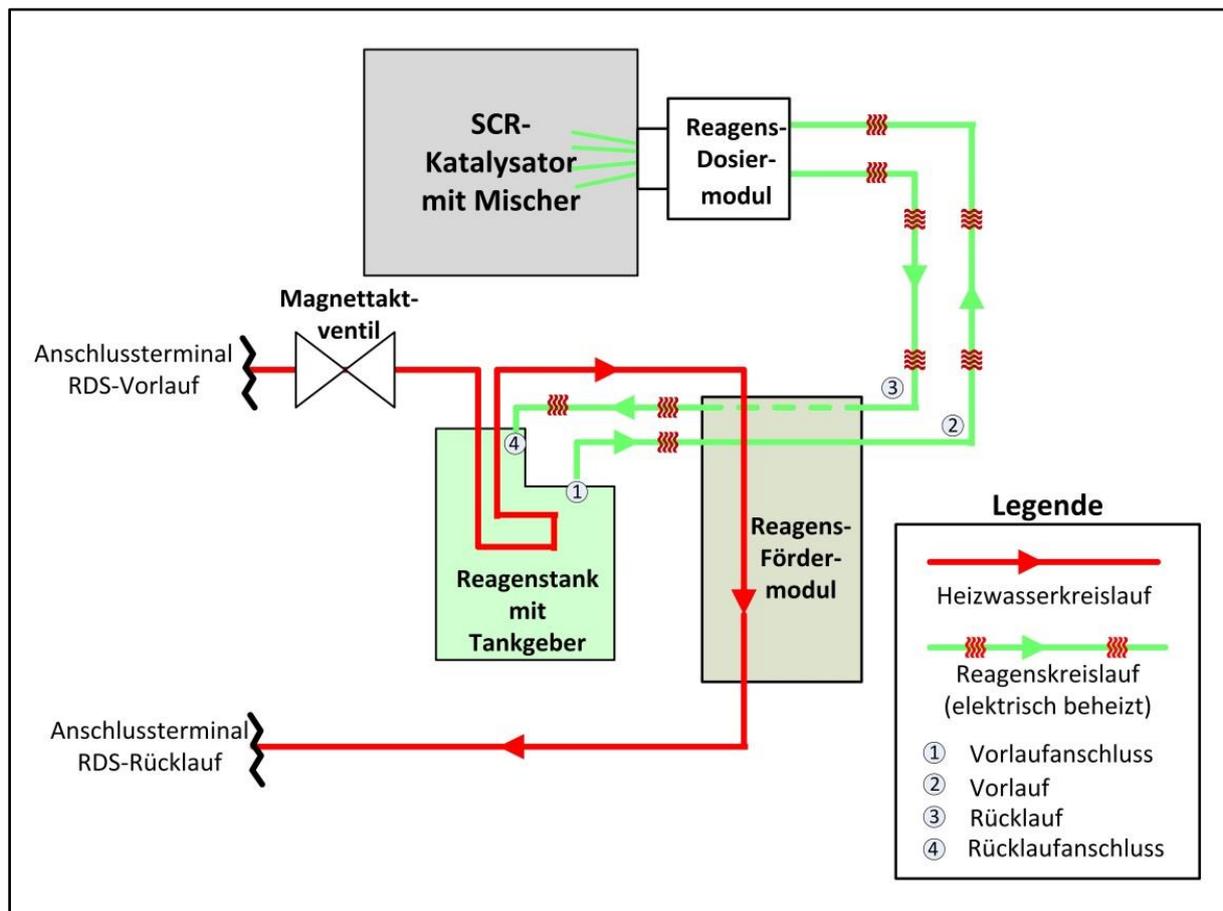


Abbildung 2-2: Funktionsschema RDS mit elektr. beheizten Reagensleitungen

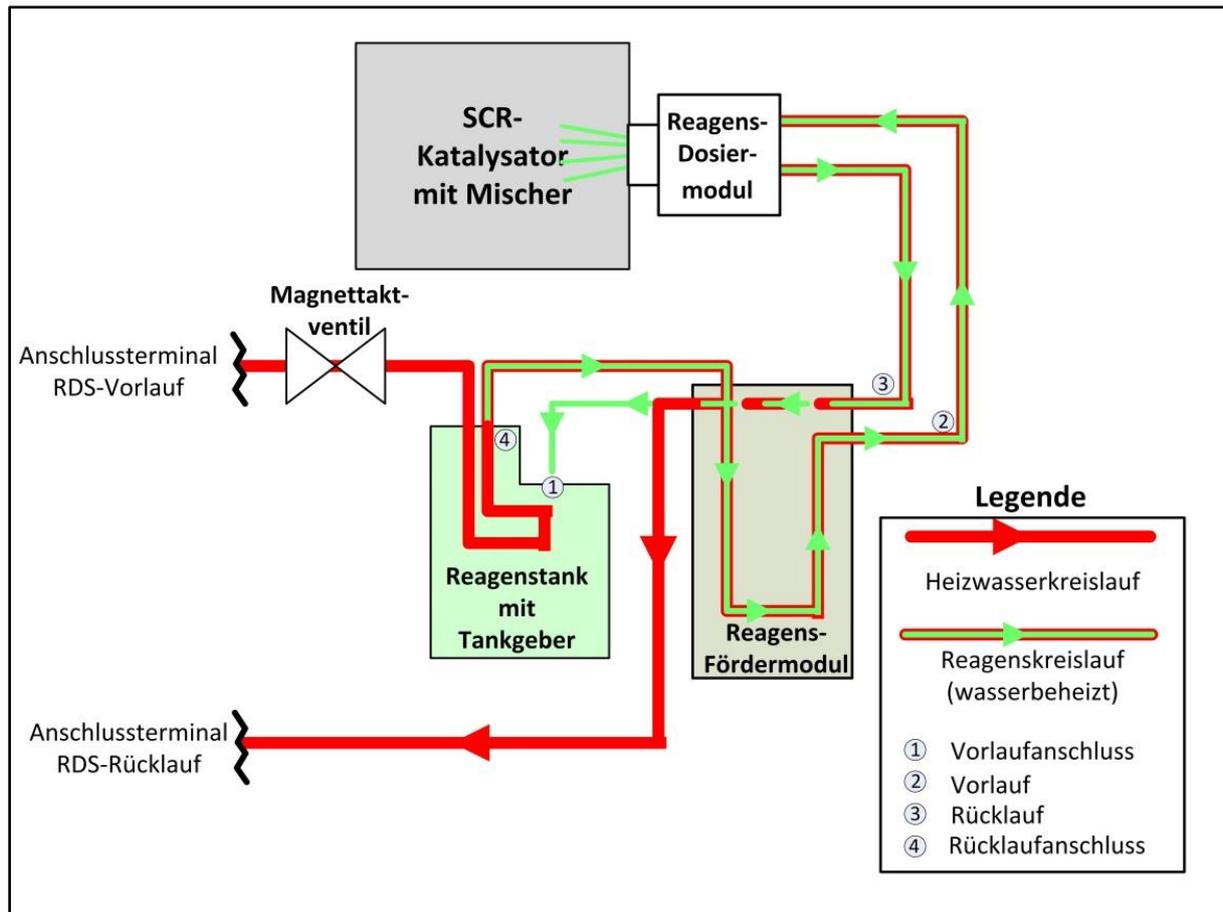


Abbildung 2-3: Funktionsschema RDS mit kühlwasserbeheizten Reagensleitungen

Zur Gewährleistung eines ausreichenden Druckgefälles zur Aufrechterhaltung eines stabilen Wasserstroms durch die Heizleitungen wird als Entnahmestelle der Wasserkrümmer vor dem AGR-Kühlereintritt gewählt, der Rücklaufanschluss befindet sich im Ansaugbereich der Wasserpumpe. Das abgezweigte Motorkühlwasser wird nach dem Eintritt in die Heizleitungen als Heizwasserkreislauf (HWKL) bezeichnet, darüber hinaus spricht man vom Heizungsvor- und rücklauf.

Zur Förderung des Reagens wird durch die im Fördermodul verbaute Membranpumpe Reagens aus dem Tank angesaugt und zum Dosiermodul gepumpt. Der Reagensförderpfad ist dabei als Kreislauf angelegt, so dass permanent mehr Reagens als benötigt gefördert und die nicht dosierte Menge über den Rücklauf zum Tank zurückgeführt wird. Durch diese konstante Umlaufmenge wird im Regelbetrieb der Abgasnachbehandlungsstrecke neben der Dosierbereitschaft auch die Kühlung des auf dem SCR-Mischer verbauten und damit den hohen Abgastemperaturen ausgesetzten Dosiermoduls gewährleistet.

Besondere Bedeutung fällt dabei der auf den jeweiligen Betriebspunkt abgestimmten Reagens-Dosiermenge zu. Basierend auf der Abgastemperatur vor dem SCR-Katalysator und der Raumgeschwindigkeit des Abgasmassenstroms ermittelt die Motorsteuerung aus

hinterlegten Kennfeldern den aktuell gültigen Wert für den maximalen NO_x -Umsatz und die Selektivität. Der Quotient dieser Faktoren wird mit dem vorliegenden Sensorwert des im Rohabgasstrom verbauten NO_x -Sensors und dem aus angesaugter Luftmasse und eingespritztem Kraftstoff errechneten Abgasmassestrom multipliziert. Nach Einbeziehung eines physikalischen Korrekturfaktors steht die zu dosierende Reagensmenge in Gramm pro Stunde fest, die zur optimalen Stickoxidminderung in diesem Betriebspunkt benötigt wird. Um exakt diese Menge einzudosieren, wird die Bestromung des Dosiermoduls abschließend kennfeldgestützt ermittelt.

vgl. [6], [7]

3 Zertifizierung von Offroad-Dieselmotoren

Der von der MAN mit Motoren für mobile Arbeitsmaschinen und Geräte (sog. „Offroad-Motoren“) bediente Markt und damit auch der Ursprung der Entwicklungsziele im Hinblick auf einzuhaltende Schadstoffgrenzen entstammt zum großen Teil der Europäischen Union (EU) und den Vereinigten Staaten von Amerika (USA).

Die darüber hinaus belieferten Zielländer liegen mit ihrer Emissionsgesetzgebung noch hinter den heutigen Standards der Obengenannten zurück. Ferner werden zur Abnahme eines Motors häufig nur stationäre Überprüfungen vorgenommen. Die Einhaltung der vorgeschriebenen Limits ist folglich weniger kompliziert als unter Verwendung der teilweise hochdynamischen Zertifizierungstests der EU sowie der USA.

Zur Darstellung sowohl des rechtlichen als auch des technischen Kontextes, sollen im sich anschließenden Kapitel die aktuell gültigen Zertifikate für das Inverkehrbringen von neu entwickelten Offroad-Motoren vorgestellt werden. Betrachtung finden werden dabei die Entwicklung der Emissionsgrenzen sowie eine Kurzdarstellung der zur erfolgreichen Zertifizierung notwendigen Vorgehensweise.

3.1 Europäische Union

3.1.1 EG-Richtlinie

Die aktuell geltenden Emissionsgrenzwerte der Gesetzgebung für Motoren für mobile Maschinen und Geräte der EU legt die Richtlinie „97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates“ vom 16. Dezember 1997 fest. Diese stellt den Ursprung der europäischen Bemühungen zur Reduzierung von Schadstoffausstoß durch Verbrennungsmotoren im Sektor der nicht straßengebundenen Motoren dar. Durch die Einbeziehung verschiedener Vereinbarungen erweitert und aktualisiert, ist die aktuell gültige Fassung die „Richtlinie 2012/46/EU der Kommission vom 6. Dezember 2012“ [8].

Im Abschnitt 5 dieser Richtlinie ist das Gefahrenpotential durch den Ausstoß von NO_x und Rußpartikeln durch Motoren mit Kompressionszündung beschrieben. Durchgeführte Untersuchungen haben darauf aufbauend zur Erweiterung der Emissionsregulierungen auf den Offroad-Sektor und zur Erstellung der genannten EU-weit gültigen Richtlinie geführt. Mit der Einführung der Abgasregulierungsstufe „Stufe I“ wurden europaweit geltende Vorgaben erstmalig angewandt und neu entwickelte Motorbaureihen hinsichtlich ihrer Emissionswerte beschränkt.

Die EU besitzt keine europaweit agierende Behörde zur Überwachung der Einhaltung der Emissionsgrenzen, sondern delegiert diese Aufgabe an nationale Ämter wie das Kraftfahrtbundesamt in Deutschland (KBA). Zum Einsatz bei der Abnahme kommen auf nationaler Ebene agierende Prüfinstitutionen, wie zum Beispiel der deutsche technische Überwachungsverein (TÜV), die nach erfolgreich abgeschlossenen Zertifizierungsläufen einen Prüfbericht zur Vorlage beim entsprechenden nationalen Amt ausstellen. Aufgrund der grenzübergreifenden Bestimmungen der EU ist es möglich, einen in Deutschland entwickelten und vom TÜV überprüften Motor auch einer im europäischen Ausland angesiedelten Behörde vorzustellen und somit ein Zertifikat einer ausländischen Behörde zu beantragen.

Als vorteilhaft für die Prozesse in der Motorenentwicklung haben sich die in der Richtlinie und den zugehörigen Anhängen genau beschriebenen Verfahren zur erfolgreichen Zertifizierung eines Motors herausgestellt. Die der Zertifizierungsbehörde vorzulegenden Prüflaufergebnisse und die für die Durchführung einzustellenden Rahmenbedingungen sind von der EU definiert, so kann im Laufe der Entwicklungsphase regelmäßig der positive Entwicklungsfortschritt überprüft werden. Zur Vermessung der Emissionswerte eines Offroad-Motors sind innerhalb der EU der „Non-Road-Transient-Cycle“ (NRTC) sowie der „Non-Road-Stationary-Cycle“ (NRSC) vorgeschrieben. In einem weiteren, speziell definierten Bereich des Motorkennfelds, der sogenannten „Not-to-exceed“ (NTE)-Zone wird darüber hinaus die Einhaltung der Emissionsgrenzen aller Last und Drehzahlkombinationen stationär überprüft. Hierbei dürfen die Emissionswerte der geltenden Richtlinie um maximal 100 Prozent überschritten werden.

vgl. [8], [9]

3.1.2 Das Emissionszertifikat der EU

Das im Hoheitsgebiet der europäischen Union vergebene Zertifikat für mobile Arbeitsmaschinen trägt die Bezeichnung „Stufe“ mit der angehängten Ordnungsnummer zur Definition der aktuell gültigen Regularien.

Vom Gesetzgeber werden die Stufen I, II, IIIA, IIIB und die für aktuell in der Entwicklung befindliche Motoren geltende Stufe IV unterschieden, dabei werden die Motoren in Leistungsklassen mit jeweils individuellen Grenzwerten mit zugehörigen Einführungsterminen eingeteilt.

Die Tabelle 3-1 zeigt die klassenabhängigen Grenzwerte für die vier einzuhaltenden Schadstofftypen Kohlenstoffmonoxid (CO), unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC),

Stickoxide (NO_x) und Rußpartikel (PM) für die in bestimmten Leistungsklassen noch bis maximal 1. Oktober 2014 gültige Stufe IIIB sowie die ab 1. Januar 2014 schrittweise in Kraft tretende Stufe IV.

Stufe	Leistungsklasse	Einführung	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
IIIB	37-55 kW	01/2013	3,5	4,7		0,025
	56-74 kW	01/2012	5,0	0,19	3,3	0,025
	75-129 kW	01/2012	5,0	0,19	3,3	0,025
	130-560 kW	01/2011	5,0	0,19	2,0	0,025
IV	56-129 kW	10/2014	5,0	0,19	0,4	0,025
	130-560 kW	01/2014	3,5	0,19	0,4	0,025

Tabelle 3-1: Emissionsgrenzen EU-Gesetzgebung [9]

Mit dem Wechsel von Stufe IIIB auf Stufe IV sank damit in der höchsten Leistungsklasse die Emissionsgrenze von 2,0 g NO_x pro kWh auf 0,4 g/kWh. Dies entspricht einer Reduktion um 80%. Zudem muss seit Einführung der Stufe IIIA der sich einstellende Verschlechterungsfaktor eines Motors über die Lebensdauer nachgewiesen werden. Hierbei wird ein Faktor ermittelt, der die durch Alterung des Motors ansteigenden Emissionswerte beschreibt.

Neben den Emissionsgrenzen und dem Verschlechterungsfaktor ist als weitere Zertifizierungsbedingung die korrekte Funktionsweise der Emissionsminderungsstrategie „unter allen auf dem Gebiet der Europäischen Union regelmäßig anzutreffenden Umgebungsbedingungen und insbesondere bei niedrigen Umgebungstemperaturen“ [aus [8], Seite 54, Abschnitt 8.4.3] gefordert. Unter der Emissionsminderungsstrategie werden alle Komponenten, die für die zum Zertifizierungszeitpunkt vorliegende Funktionsweise der Emissionsminderungseinrichtung notwendig sind, verstanden. Durch den massiven Rückgang der NO_x-Emissionsobergrenze steigt die Anwendungszahl von SCR-Katalysatoren im Bereich der mobilen Maschinen für den europäischen Markt sprunghaft, da dieses System ein sicheres Verfahren zur Erlangung des Stufe IV-Zertifikats darstellt. Aus diesem Grund und zur Verhinderung eines Ausbleibens der Emissionsminderung durch ein nicht funktionierendes, mit dem SCR-Katalysator verwendetes RDS, werden durch die EU explizite Anweisungen zum Funktionsverhalten der Emissionsminderungseinrichtung unter Frost und Auftaubedingungen beschrieben. Diese klimatischen Bedingungen stellen den am häufigsten auftretenden Auslöser einer Fehlfunktion dar. Weiterhin ist die Überwachung von Reagensqualität und Tankfüllstand vorgeschrieben. Bei Abweichung des Systems von der normalen Funktionalität ist der Maschinenbediener über eine Warnleuchte zu informieren. Um steigende Emissionswerte durch eine Fehlfunktion der Abgasnachbehandlungsstrategie

zu vermeiden, werden zudem Konzepte vorgeschlagen, die als „Aufforderung“ und „starke Aufforderung“ zur Behebung der Fehlfunktion verwendet werden sollen. Diese gehen einher mit einer definierten Leistungsreduktion des Motors und somit auch dem Verlust der Arbeitsfähigkeit der angetriebenen Maschine. Auf diese Weise soll die korrekte, emissionskonforme Verwendung der Maschine durch den Bediener sichergestellt werden.

In Kapitel M8 unter Abschnitt 2.3 der Richtlinie werden die Anforderungen und Prüfverfahren für das Auftauverhalten eines RDS-Systems festgeschrieben. Es wird dabei ein Prüfzyklus definiert, der wie folgt durchzuführen ist:

1. Das RDS-System wird für 72 h oder bis zur vollständigen Erstarrung des verwendeten Reagens bei -18°C eingefroren.
2. Danach wird eine Umgebungstemperatur von -7°C eingestellt, der Motor angelassen und 10 bis 20 min im unteren Leerlauf betrieben. Daran schließen sich maximal 50 min mit 40% der maximalen Motorlast bei Motorenndrehzahl an.
3. Nach Ablauf von 70 min nach Motorstart muss die Dosierfähigkeit des RDS-Systems spätestens erreicht sein.

Bei Bestehen des Tests kann das RDS als tauglich gewertet werden, andernfalls ist es nicht einsatzfähig. Zusätzlich verlangt die EU-Richtlinie für den Fall von besonders hartnäckigem Frost bei einer permanenten Umgebungstemperatur von -7°C oder weniger ebenfalls das Aktivieren einer Bedienerwarnung, um auf die Fehlfunktion des RDS hinzuweisen.

vgl. [8]

3.2 Vereinigte Staaten von Amerika

3.2.1 EPA und CARB

Die USA unterhalten mit der Environmental Protection Agency (EPA) und dem California Air Resources Board (CARB) zwei Organisationen, die für die Erteilung von Zertifikaten und die Überwachung der Grenzwerteinhaltung zuständig sind.

Das aktuell gültige aber bereits nicht mehr erhältliche Zertifikat der USA wird als „Tier4Interim“ (T4I) bezeichnet. Momentan in der Entwicklung befindliche Aggregate werden aber schon mit dem Entwicklungsziel „Tier4Final“ (T4F) entwickelt, welches seit 2014 für Neuzulassungen wirksam ist.

Problematisch stellt sich für viele Motorenhersteller dabei die ungenaue Vorgabenpolitik der EPA sowie der CARB dar. Insbesondere die Testzyklen zur Ermittlung eines sogenannten

Verschlechterungsfaktors werden teilweise entsprechend des Lebensdauerlastprofils des Motors individuell abgestimmt. Dies ermöglicht zwar eine Einflussnahme auf das zu absolvierende Programm, jedoch bleibt daher auch der später zu durchlaufende Zyklus unbekannt. Eine regelmäßige Validierung des Applikationsstandes im tatsächlichen Prüfprogramm kann nicht durchgeführt werden.

Lediglich die Zyklen zur Emissionsmessung sind festgelegt, analog zur EU kommen auch bei einer US-Zertifizierung nach T4F der NRSC, der NRTC sowie die NTE-Zone zum Einsatz. Die von der EPA akzeptierte Überschreitung der Emissionsgrenzen während der NTE-Überprüfung liegt im Gegensatz zur EU bei nur maximal 50 Prozent.

Eine weitere Schwierigkeit stellt auch die Selbstzertifizierungspolitik der EPA dar. Vom Hersteller eines Motors wird erwartet, dass der für die Abnahmeläufe eingesetzte Motorprüfstand nach Vorgaben der EPA ausgerüstet und kalibriert ist. Die jeweiligen Messungen werden dann in Eigenregie durchgeführt und der Behörde vorgelegt. Auf dieser Grundlage wird im Anschluss über die Erteilung eines Zertifikates entschieden. Um die eingereichten Testresultate zu überprüfen und die Einhaltung der Emissionsgrenzen zu validieren, behält sich die EPA vor, Motoren vom Hersteller einzufordern und diese auf einem eigenen Prüfstand zu vermessen. Dieses Procedere stellt sich in der Praxis als schwierig heraus, da zum Beispiel eine leichte Streuung durch Fertigungseinflüsse nicht vermieden werden kann. Sollte es durch ein solches Phänomen zum Nichtbestehen der von der EPA durchgeführten Vermessung kommen, drohen den Herstellern nach mehreren Wiederholungsprüfungen mit weiteren Motoren der Baureihe hohe Geldstrafen bis hin zur Stilllegung aller mit diesem Zertifikat in den US-Markt eingeführten Motoren.

vgl. [10], [11]

3.2.2 Abgaslabel Tier

Das momentan für Neuentwicklungen zu erreichende Zertifikat T4F stellt eine erneute Verschärfung der Stufe T4I dar. Die Tabelle 3-2 zeigt die Grenzwerte der einzelnen Schadstoffklassen im Vergleich.

	Rated Power (kW)	Tier	Model Year	NMHC (g/kWh)	NMHC + NOx (g/kWh)	NOx (g/kWh)	PM (g/kWh)	CO (g/kWh)	Smoke ^a (%)	Useful Life (hours/years) ^b	Warranty Period (hours/years) ^b		
Federal	kW < 8	1	2000-2004	-	10,5	-	1,00	8,0	20 / 15 / 50	3,000/ 5	1,500/2		
		2	2005-2007	-	7,5	-	0,80	8,0					
		4	2008+	-	7,5	-	0,40 ^c	8,0					
	8 ≤ kW < 19	1	2000-2004	-	9,5	-	0,80	6,6				3,000/ 5	1,500/2
		2	2005-2007	-	7,5	-	0,80	6,6					
		4	2008+	-	7,5	-	0,40	6,6					
	19 ≤ kW < 37	1	1999-2003	-	9,5	-	0,80	5,5		5,000/ 7 ^d	3,000/5 ^e		
		2	2004-2007	-	7,5	-	0,60	5,5					
		4	2008-2012	-	7,5	-	0,30	5,5					
	37 ≤ kW < 56	4	2013+	-	4,7	-	0,03	5,5					
		1	1998-2003	-	-	9,2	-	-					
		2	2004-2007	-	7,5	-	0,40	5,0					
		3 ^f	2008-2011	-	4,7	-	0,40	5,0					
		4 (Option 1) ^g	2008-2012	-	4,7	-	0,30	5,0					
	56 ≤ kW < 75	4 (Option 2) ^g	2012	-	4,7	-	0,03	5,0					
		4	2013+	-	4,7	-	0,03	5,0					
		1	1998-2003	-	-	9,2	-	-					
		2	2004-2007	-	7,5	-	0,40	5,0					
		3	2008-2011	-	4,7	-	0,40	5,0					
	75 ≤ kW < 130	4	2012-2013 ^h	-	4,7	-	0,02	5,0					
		4	2014+ ⁱ	0,19	-	0,40	0,02	5,0					
		1	1997-2002	-	-	9,2	-	-					
		2	2003-2006	-	6,6	-	0,30	5,0					
	130 ≤ kW < 225	3	2007-2011	-	4,0	-	0,30	5,0					
		4	2012-2013 ^h	-	4,0	-	0,02	5,0					
		4	2014+	0,19	-	0,40	0,02	5,0					
		1	1996-2002	1,3 ^j	-	9,2	0,54	11,4					
	225 ≤ kW < 450	2	2003-2005	-	6,6	-	0,20	3,5					
3		2006-2010	-	4,0	-	0,20	3,5						
4		2011-2013 ^h	-	4,0	-	0,02	3,5						
4		2014+ ⁱ	0,19	-	0,40	0,02	3,5						
450 ≤ kW < 560	1	1996-2000	1,3 ^j	-	9,2	0,54	11,4						
	2	2001-2005	-	6,6	-	0,20	3,5						
	3	2006-2010	-	4,0	-	0,20	3,5						
	4	2011-2013 ^h	-	4,0	-	0,02	3,5						
560 ≤ kW < 900	4	2014+ ⁱ	0,19	-	0,40	0,02	3,5						
	1	1996-2001	1,3 ^j	-	9,2	0,54	11,4						
	2	2002-2005	-	6,6	-	0,20	3,5						
	3	2006-2010	-	4,0	-	0,20	3,5						
kW > 900	4	2011-2013 ^h	-	4,0	-	0,02	3,5						
	4	2014+ ⁱ	0,19	-	0,40	0,02	3,5						
	1	2000-2005	1,3 ^j	-	9,2	0,54	11,4						
	2	2006-2010	-	6,4	-	0,20	3,5						
kW > 900	4	2011-2014	0,40	-	3,5 ^k	0,10	3,5						
	4	2015+ ⁱ	0,19	-	3,5 ^k	0,04 ^l	3,5						
	4	2015+ ⁱ	0,19	-	3,5 ^k	0,04 ^l	3,5						

Tabelle 3-2: Emissionsgrenzen US-Gesetzgebung [11]

Die dabei nicht weiter ausgeführten Indices stellen spezielle Fälle dar, auf die nicht weiter eingegangen werden soll. Deutlich sichtbar werden die Leistungsklassen und somit auch die zugehörigen, geltenden Zulassungsbedingungen. Auffällig ist besonders der NO_x-Grenzwert, der im Zeitraum von 14 Jahren von 9,2 über 3,5 auf bis zu 0,4 g/kWh abgesenkt wurde, was einer Reduktion der erlaubten Masse von bis zu 95,7% entspricht. Die Tabelle gibt zudem Auskunft über die definierte Nutzlebensdauer in Betriebsstunden oder Jahren, die für die Leistungsklassen festgelegt ist. Zum Erreichen des Tier-Abgaslabels verlangen EPA und CARB zum einen den Nachweis über die Einhaltung der aus der Tabelle ersichtlichen Limits, weiterhin besteht die Forderung, diese Limits während der Nutzlebensdauer niemals zu überschreiten. Analog zur Richtlinie der EU ist auch zur Erlangung des US-Zertifikats ein Nachweis eines Verschlechterungsfaktors über die Nutzlebensdauer des Motors zu erbringen. Dazu muss unter Verwendung eines möglichst realitätsnahen Dauerlaufprogramms am Prüfstand ein sogenannter Verschlechterungsfaktor zur

Extrapolation auf die tabellarisch gelistete Nutzlebensdauer ermittelt werden, mit dem dann die Emissionsgrenzen zur Motorauslegung berechnet werden können.

Zur Ermittlung des Faktors ist ein Testzyklus von 4000 h vorgesehen, zu dessen Beginn sowie zum Ende der Motor ausführlich vermessen und die aufgetretene Verschlechterung dann auf die Nutzlebensdauer skaliert wird. In der Praxis bedeutet diese Forderung, dass ein grenzwertig ausgelegter Motor über seine Lebensdauer keine effektive Verschlechterung der Emissionswerte aufzeigen darf. Eine solche Konstanz ist jedoch nicht möglich, daher sind die zu entwickelnden Ausgangsemissionen um einen zu wählenden Faktor geringer zu wählen, um dauerhaft die rechtsgültigen Grenzen zu wahren.

Da speziell die streng limitierten NO_x -Emissionen nicht mehr ausschließlich mit innermotorischen Maßnahmen zu bewältigen sind, wird von OEM's auch für den US-Markt verstärkt auf die Verwendung von SCR-Katalysatoren gesetzt, die mittels extern zugeführtem Reduktionsmittel die NO_x -Emissionen nach dem im Kapitel 2.1.1 beschriebenen Verfahren deutlich absenken können. Diese Systeme werden von der EPA als Emissionsminderungseinrichtung eingestuft und für den Motorbetrieb als notwendig betrachtet. Daher verlangt eine erfolgreiche US-Zertifizierung auch nach einer durchgeführten Validierung aller zugehörigen Komponenten.

Im Falle des RDS-Systems ist sowohl eine Überwachung des Füllstandes des HWL-Tanks als auch eine fahrzeuginterne Diagnose der HWL-Qualität gefordert. Die On-Board-Diagnose (OBD) des Fahrzeugs muss so konfiguriert sein, dass ein dauerhafter Motorbetrieb ohne HWL oder mit HWL verminderter Qualität dem Verwender nicht gestattet wird. Dieser Eingriff in die Funktion des Motors erfolgt zur Gewährleistung von konstanten Emissionswerten und nicht aufgrund technischer Notwendigkeit. Die Behörden stellen so sicher, dass der Motor die unter Verwendung des SCR-Systems ermittelten Emissionsgrenzen einhält und ein Überschreiten durch Vernachlässigung der Betankung mit HWL nicht möglich ist. Dieses war im Zuge vergangener Emissionsstufen ohne OBD-Eingriff häufig der Fall, da der Betreiber auf diesem Weg die Betriebskosten der Maschine um den Anteil der nicht getankten HWL reduzieren konnte. Zudem werden genaue Vorgaben an die Dosierbereitschaft des verwendeten RDS-Systems gestellt, der Schwerpunkt der Betrachtung liegt hier auf dem kritischen Fall eines durchgefrorenen Systems.

Die EPA definiert in dem am 26. Juli 2011 als Webinar (Web Seminar) erschienenen Konzept „Nonroad SCR Certification“ [12] zum Auftauverhalten einen möglichen Ablauf für die Auftauvalidierung eines RDS-Systems zur Eindosierung in einen SCR-Katalysator. Dieser sieht folgendes Vorgehen vor:

1. Das RDS-System ist vollständig aufgebaut, der HWL-Tank ist befüllt, die Temperatur des Mediums beträgt zum Start der Konditionierung (Phase 2) maximal 20°F (-7°C).
2. Zu Beginn der Konditionierungsphase von 72 h wird die Umgebungstemperatur auf 0°F (-18°C) eingestellt. Diese Phase kann abgekürzt werden, wenn die HWL vorher fest durchgefroren ist. Im Anschluss beginnt das Auftauen (Phase 3).
3. Bei konstanter Umgebungstemperatur von 0°F (-18°C) wird der Motor gestartet und 20 min im unteren Leerlauf betrieben. Im Anschluss erfolgt für 50 min eine Lastaufschaltung von maximal 40% der Vollast bei Nenndrehzahl.
Nach 70 min muss das RDS-System aufgetaut und vollständig dosierbereit sein, um als funktionstüchtig eingestuft zu werden.

Verglichen mit dem in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Prüfablauf zur Erlangung eines EU-Zertifikats liegt der Unterschied in der konstant gehaltenen Umgebungstemperatur von -18°C während der gesamten Durchführung.

Dieses Vorgehen wird aufgrund der schärferen Temperaturvorgaben in den kommenden Ausführungen als Arbeitshypothese für die Entwicklung des Auftauprüfstands als durchzuführende Variante betrachtet. Der beschriebene Testablauf wird im nachfolgenden Teil der Arbeit zur Vereinfachung als „Auftautest EPA“ bezeichnet.

vgl. [10], [11], [12]

4 Prüfstandskonzept

4.1 Anforderungen

Ziel der Arbeit ist ein Komponenten-Prüfstand, der die Validierung des Auftauverhaltens verschiedener, motorkühlwasserbeheizter RDS-Systeme unter Berücksichtigung folgender Kriterien ermöglicht:

- Vorgabe realer Volumenstromverläufe
- Vorgabe realer Temperaturverläufe
- Kosten- und zeiteffiziente Einsetzbarkeit
- An vorhandene Lagermöglichkeiten angepasster Aufbau
- Hohe Variabilität und Erweiterbarkeit
- Vollständige Bedienbarkeit aus dem Kontrollraum der Kältezelle

Weiterhin soll der Einsatz eines Verbrennungsmotors bei der Überprüfung des Auftauverhaltens vermieden werden, da die Kältezelle der MAN nicht über eine Belastungsmaschine verfügt. Die in Abschnitt 3.1.2 und 3.2.2 aufgezeigten Prüfabläufe zur Feststellung eines korrekten Auftauverhaltens können aufgrund dieser Tatsache aktuell nicht durchgeführt werden.

Es soll daher eine alternative Lösung zur Abbildung der realen Kühlwasserumlaufmenge und des Motorwassertemperaturverlaufes bei entsprechendem Lastverlauf erarbeitet werden.

Besonderer Wert wird hierbei auf die zu berücksichtigende Option gelegt, mittels externer Stufentabellen, bestehend aus sekundlich aufgetragenen Sollwerten für Volumenstrom und Temperatur, später die Realverläufe des Motorkühlwasserverhaltens nachzubilden. Diese Stufentabellen sollen entweder mittels Simulation oder Messungen am Motorprüfstand erzeugt oder einmalig in einer externen Kältekammer unter Verwendung eines Gesamtfahrzeugs oder eines Motors mit Belastungsmaschine gemessen und für den RDS-Prüfstand (PST) aufbereitet werden.

Die extrem niedrigen Umgebungstemperaturen während der Konditionierungs- und Testphase und die im Verhältnis dazu sehr schnell ablaufende Aufheizung der Komponenten erfordern eine hohe Widerstandsfähigkeit aller Einzelkomponenten.

4.2 Grundaufbau

Die beschriebenen Anforderungen führten in der Konzeptionsphase dazu, den Umlauf des Motorkühlwassers durch die Heizleitungen des zu prüfenden Dosiersystems unter

Verwendung speziellen Wasserpumpe abzubilden. Diese muss trotz unterschiedlicher Druckverluste der einzelnen RDS-Komponenten die Volumenströme mehrerer Motorbaureihen abdecken. Um den Wärmeeintrag des Motors unter den bereits beschriebenen Testbedingungen nach EPA auf das Kühlwasser darstellen zu können, muss ein Konzept zur Beheizung des im PST umlaufenden Wassers erarbeitet werden. Nach Möglichkeit wird angestrebt, die Beheizung des simulierten Motorkühlwassers weitestgehend über ein pumpenseitig verbautes Heizelement durchzuführen. Sollte der Bedarf an Heizleistung durch eine derartige Lösung nicht zu decken sein, kann der Einsatz von Tauchsiedern, einem Durchlauferhitzer oder einer an der Rohraußenseite aufgebrauchten Rohrbegleitheizung geprüft werden.

Um Aussagen über den Funktionszustand des RDS während eines Prüflaufes zu treffen, werden Messstellen vorgesehen, aus deren Ergebnissen später wichtige Parameter abgeleitet werden und die zudem zur automatischen Durchführung eines Auftautests die softwareseitig verwendeten Regler mit den benötigten Istwerten versorgen können.

Die geplanten Sensoren und Messstellen zeigt die Tabelle 4-1, die festgelegten Normnamen richten sich soweit möglich nach dem MAN Normnamenschema.

Sensortyp / Messgerät	Messstelle	Kanalname	Einheit
Temperatursensor	nach Pumpenausritt	TWAnPumpe	°C
	vor Eintritt HWKL des zu prüfenden RDS	TWAvDosSys	
	nach Austritt HWKL des zu prüfenden RDS	TWAnDosSys	
Drucksensor	nach Pumpenausritt	pWAnPumpe	bar
	vor Eintritt HWKL des zu prüfenden RDS	pWAvDosSys	
	nach Austritt HWKL des zu prüfenden RDS	pWAnDosSys	
Volumenstrommessuhr	vor Pumpeneintritt	VpWA_Ist	l/min

Tabelle 4-1: Messstellenplan RDS-Prüfstand

Ausgehend von den Messergebnissen der Druck- und Temperatursensoren vor Eintritt sowie nach Austritt des umlaufenden Wassers in den Heizwasserkreislauf des zu prüfenden RDS, ist es möglich, sowohl Aussagen über den systemseitig verursachten Druckverlust als auch über die tatsächlich abgeführte Wärmemenge während des gesamten Versuches zu treffen.

Das normalerweise direkt am SCR-Mischer verbaute und durch den heißen Abgasstrom erhitzte Dosiermodul wird im Prüfstandsbetrieb unter Verwendung eines Flansches auf eine Heizplatte gelegt und erfährt so einen vergleichbaren Wärmeeintrag.

Der geplante Aufbau des Prüfstands ist als erster Entwurf in folgendem Schema 4-1 dargestellt:

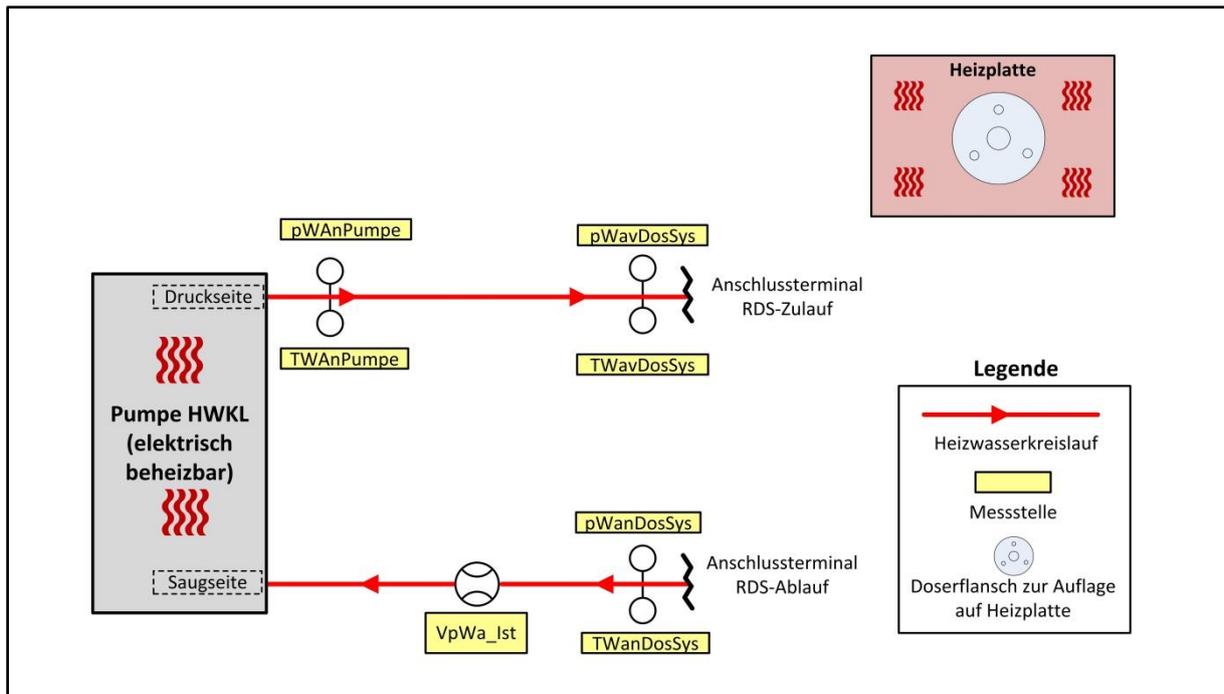


Abbildung 4-1: Grundschemata Prüfstandsentswurf

Diese Schemazeichnung stellt einen Ausgangsentwurf zu Beginn des Projektes dar und wird im Weiteren aktualisiert.

4.3 Resultierende Arbeitsschritte

Aus dem Konzept zur Erstellung des RDS-PST für den Auftauversuch ergeben sich folgende Arbeitsschritte zur Fertigstellung des Prüfstands:

- Durchführung eines Dimensionierungsversuchs
- Berechnung der benötigten Wärmemenge
- Auswahl und Beschaffung der Wasserpumpe
- Auswahl und Beschaffung von Steuerungssoft- und Hardware
- Programmierung einer Bedienoberfläche inklusive vollautomatisierter Regelung
- Auslegung und Beschaffung eines Heizungssystems
- Auslegung und Aufbau der elektrischen Anlage
- Konstruktion des Prüfstandes mit CAD
- Fertigung von Sonderbauteilen
- Montage aller Komponenten
- Inbetriebnahme

5 Dimensionierungsversuch

5.1 Versuchszweck

Zur Dimensionierung der benötigten PST-Komponenten wird ein Dimensionierungsversuch durchgeführt, der die Ermittlung von realen Größen für die Parameter Heizungsvorlaufdruck, Heizungsrücklaufdruck und Volumenstrom zum Ziel hat. Es sollen dabei die entstehenden Druckverluste so darstellbar werden, dass der Einfluss jeder einzelnen Komponente abzulesen ist.

Entsprechende Erfahrungen zur exakten, in Abhängigkeit der Motordrehzahl über die RDS-Heizung abgeleiteten Wassermenge liegen MAN-intern bisher nicht vor. Zur Auslegung vor allem der benötigten Wasserpumpe ist eine Ausgangsgröße jedoch zwingend erforderlich.

Die zentrale Aufgabe der Betrachtung ist es, die für den Druckverlust hauptsächlich verantwortliche Komponente zu identifizieren, um anhand dieser allgemein gültige Annahmen zu treffen. Mittels aller bekannten Größen kann daraufhin der sich einstellende Volumenstrom für andere Motorbaureihen abgeschätzt und der PST für zukünftige Entwicklungsaufgaben zweckdienlich aufgebaut werden.

5.2 Versuchsmotor

Für den Dimensionierungsversuch wird der aktuell in der Entwicklungsphase befindliche Reihensechszylinderdieselmotor „D2676LE131“ gewählt. Ein Wasserkrümmer mit Entnahmestellen für den Heizwasserkreislauf ist montiert.

Beim D2676LE131 handelt es sich um einen mit neusten Technologien ausgestatteten Motor, der speziell für den Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen entwickelt wird. Neben einer externen, wassergekühlten Abgasrückführung und einem Turbolader mit variabler Turbinengeometrie wird der D2676LE131 zudem mit einem SCR-Katalysator inklusive integriertem Ammoniak-Sperrkatalysator in den Markt eingeführt. Die angestrebten Zertifikate sind die bereits in den Kapiteln 3.1.2 und 3.2.2 beschriebenen Stufe IV- bzw. T4F-Zertifikate.

Ein aus Gründen der Geheimhaltung gekürztes Datenblatt zum Versuchsmotor zeigt die Tabelle 5-1. Entscheidend für die Durchführung ist ausschließlich das Drehzahlband von 600 bis 2120 min^{-1} , da die Kühlwasserfördermenge proportional zu diesem ist.

Größe	Einheit	Wert
Zylinderzahl Anordnung Ventile pro Zylinder	-	6 in Reihe, stehend 4
Nenn-Leistung nach ECE R 120	kW PS	383 520
Nenn-Drehzahl	min ⁻¹	1950
Max. Drehmoment n. ECE R 120 / bei Drehzahl	Nm min ⁻¹	2400 1150...1500
Minimale untere Leerlaufdrehzahl	min ⁻¹	600
Maximale obere Leerlaufdrehzahl ohne Last	min ⁻¹	2120
Abregelbeginn (unter Last)	min ⁻¹	1960
Hub Bohrung	mm mm	166 126
Hubvolumen	l	12,419
Verdichtungsverhältnis	-	17:1
Minimal erforderl. Kühlmittelumlaufmenge bei Nenn-Drehzahl	l/min	390

Tabelle 5-1: Motorkenndaten Versuchsmotor

5.3 Vermessene Komponenten

Aufgebaut wird ein HWL-Dosiersystem aus verschiedenen Bestandteilen. Es kommt der Harnstofftank eines MAN LKW der Emissionsstufe Euro-6 mit 80 l Tankvolumen zum Einsatz, der dazu passende Tankgeber sowie das für den Offroad-Motor vorgesehene HWL-Fördermodul und das zur Produktreihe gehörende Dosiersystem. Da die Komponenten HWL-Tank und Tankgeber für den D2676LE131 noch nicht endgültig vom Abnehmer des Motors definiert sind, muss hier auf die LKW-Lösung zurückgegriffen werden.

Leitungsseitig wird ein standardisierter Wasserschlauch mit 17 mm Außendurchmesser und einem Innendurchmesser von 10 mm verwendet. Zur Stabilisierung der Strömung vor dem Eintritt in die Messstelle wird ein Edelstahlrohr mit identischem Innendurchmesser verbaut.

Die Tabelle 5-2 definiert die vermessenen Komponenten, soweit möglich, mit der zugehörigen MAN Sachnummer. Das Dosiermodul ist nicht Bestandteil des wasserbeheizten Systems, wird der Vollständigkeit halber aber aufgeführt.

Komponente	MAN Sachnummer	Bezeichnung	Sonstiges
HWL-Tank	81.15400-6129	Euro 6	80l Tank
HWL-Tankgeber	81.15408-6032	Euro 6	für 80l Tank
HWL-Fördermodul	51.15403-6013	Offroad T4F	24V System
HWL-Dosiermodul	51.154.036.006	Offroad T4F	24V System
Magnettaktventil	81.15407-6022	Offroad T4F	24V System

Tabelle 5-2: Übersicht Versuchskomponenten

5.4 Prüfstands- und Messtechnik

5.4.1 Motorprüfstand

Verwendet wird der MAN-Prüfstand mit der Ordnungsnummer 110. Dieser hochdynamische Entwicklungsprüfstand für Verbrennungsmotoren ist ausgestattet mit einer Prüfstandssteuerung vom Typ „Puma Open“ der Firma AVL und verfügt über eine Asynchron-Belastungsmaschine vom Typ Schorch HB2408X. Es können Motordrehzahlen bis 3000 min^{-1} und Motormomente bis 3250 Nm abgerufen werden, was einer maximalen Leistung von 650 kW entspricht. In diesem Bereich sind sowohl stationäre Betriebspunkte als auch dynamische Fahrzyklen darstellbar.

5.4.2 Volumenstrommessung

Die Erfassung des Volumenstroms erfolgt unter Verwendung eines Siemens Messgerätes vom Typ „Sitrans F M Magflo MAG 6000“ mit zugehöriger Auswerteeinheit. Das Funktionsprinzip beruht auf der Verwendung des aus der Messtechnik hinreichend bekannten Doppler-Verfahrens. Dabei erfolgt eine kontaktlose Erfassung des Volumenstroms auf Basis der Ultraschalltechnik. Dieses Messverfahren zeichnet sich durch einen sehr geringen Druckverlust aus, was dem Versuchsziel entgegen kommt. Der Messbereich des Gerätes reicht von 0 bis 300 l/h, dabei wird von der Auswerteeinheit des Messsystems eine korrespondierende Signalspannung von 0-10 V ausgegeben und mittels BNC-Kabel direkt auf einen Analogeingang des Prüfstands geleitet, PumaOpen erfasst diese Messgröße im Testresultat. Die Abbildung 5-1 zeigt die Auswerteeinheit, in Abbildung 5-2 ist der Messfühler mit dem als Einlaufberuhigung verwendeten Edelstahlrohr zu erkennen.



Abbildung 5-1: Auswerteeinheit



Abbildung 5-2: Messfühler mit Ultraschallkopf

5.4.3 Druckmessung

Zur Erfassung des Vor- und Rücklaufdruckes werden kurz hinter bzw. vor Aus- und Eingang des Wasserkrümmers T-Stücke montiert, an deren rechtwinkligen Abgang eine Teflon-Leitung eingespannt ist, die auf eine Auffangdose zum Schutz des Drucksensors geführt wird. Bestimmt wird der Druck durch einen piezoresistiven Drucksensor, dessen Ausgangssignal im Bereich der für Messsysteme typischen Signalspannung von 0 bis 10 V liegt. Das Signal wird vom Prüfstandssystem PumaOpen erfasst und entsprechend skaliert abgespeichert. Zu sehen ist in Abbildung 5-3 die Messstelle Vorlaufdruck pVAR6 am Kühlmittelkrümmer des Motors, in Abbildung 5-4 ist die Verschraubung des Rücklaufes pVAR7 dargestellt.

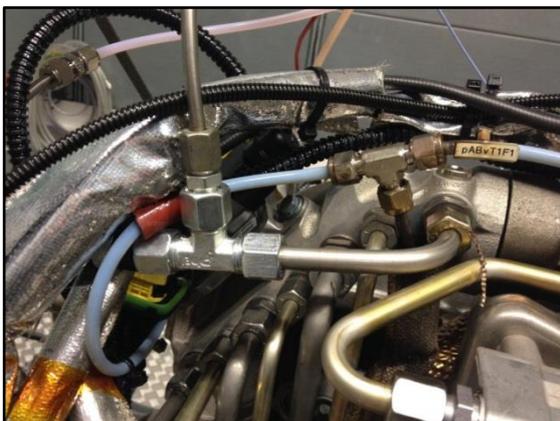


Abbildung 5-3: Messstelle pVAR6

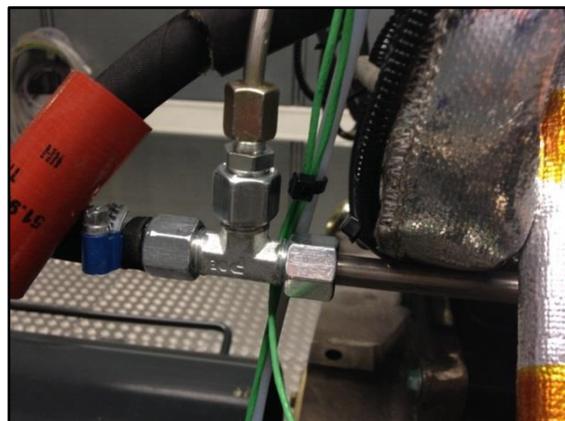


Abbildung 5-4: Detailansicht Messverzweigung

5.4.4 Druckverlust erfassung

Der Druckverlust berechnet sich als Differenz der Größen Vorlaufdruck pVAR6 und Rücklaufdruck pVAR7. Die Berechnung erfolgt dabei jeweils aus den Werten einer Messung direkt in PumaOpen und wird vom Prüfstandssystem in den Kanal „dpHWKL“ gespeichert.

5.4.5 Drehzahlerfassung

Unter Verwendung eines Kurbelmarkengebers, der von der MAN als Serienteil (Sachnummer 51.27120-7038) geführt wird, erfasst die PST-Automatisierung die Motordrehzahl. Zudem steht für eine Validierung des Drehzahlsignals auch die Bremsendrehzahl als Größe in PumaOpen zur Verfügung.

5.4.6 Messkanalübersicht

Die Tabelle 5-3 zeigt alle relevanten Messgrößen des Dimensionierungsversuchs und die zugeordneten Abkürzungen, welche als Kanalnamen in der Prüfstandssoftware eingetragen werden:

Größe	Einheit	Kanalname
Motordrehzahl	min^{-1}	nMOT
Volumenstrom Heizwasserkreislauf	l/min	VpWAVAR1
Vorlaufdruck Heizwasserkreislauf	mbar	pVAR6
Rücklaufdruck Heizwasserkreislauf	mbar	pVAR7
Druckverlust im Heizwasserkreislauf	mbar	dpHWKL

Tabelle 5-3: Kanalübersicht Dimensionierungsversuch

5.5 Versuchsaufbauten

Der Grundaufbau der Messung wird im folgenden Schema 5-5 dargestellt:

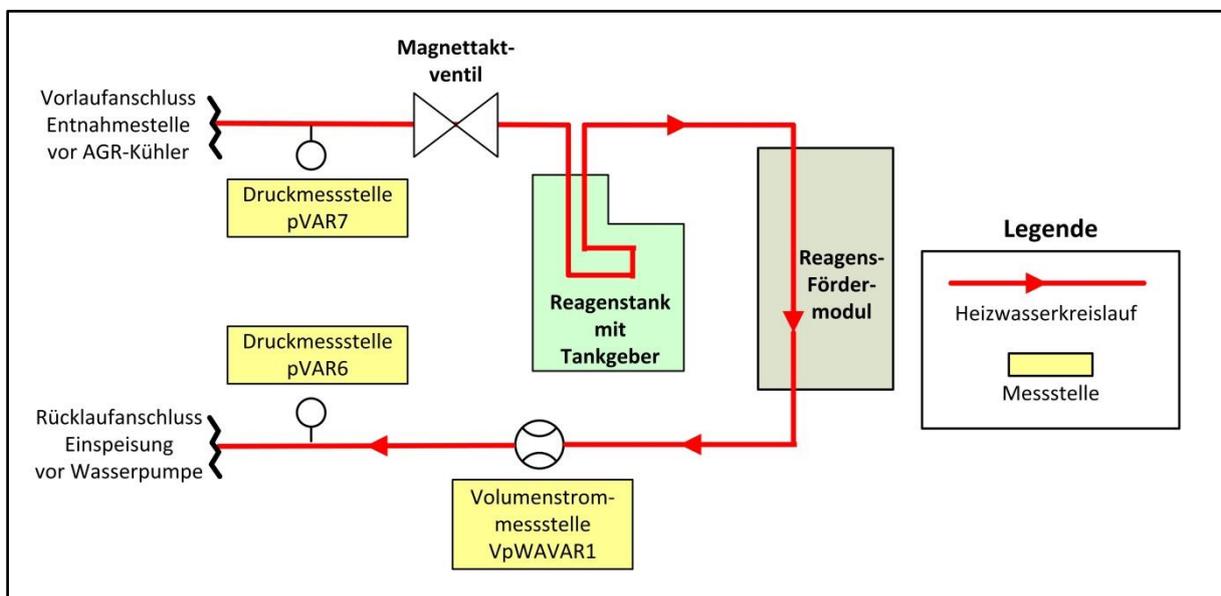


Abbildung 5-5: Versuchsaufbauschema Ausgangszustand

Der Reihe nach wird nun eine Komponente entfernt und ein direkter Kurzschluss mit der folgenden Komponente erzeugt. Somit ergeben sich fünf Versuchsaufbauten, in denen jeweils die bereits genannten Größen über das vollständige Drehzahlband erfasst werden.

Das Schema in Abbildung 5-6 stellt die Veränderung des in Abbildung 5-5 gezeigten Grundschemas beispielhaft für den Kurzschluss über den Tankgeber dar. Analog erfolgt dieses in den weiteren Messungen für die verbliebenen Komponenten.

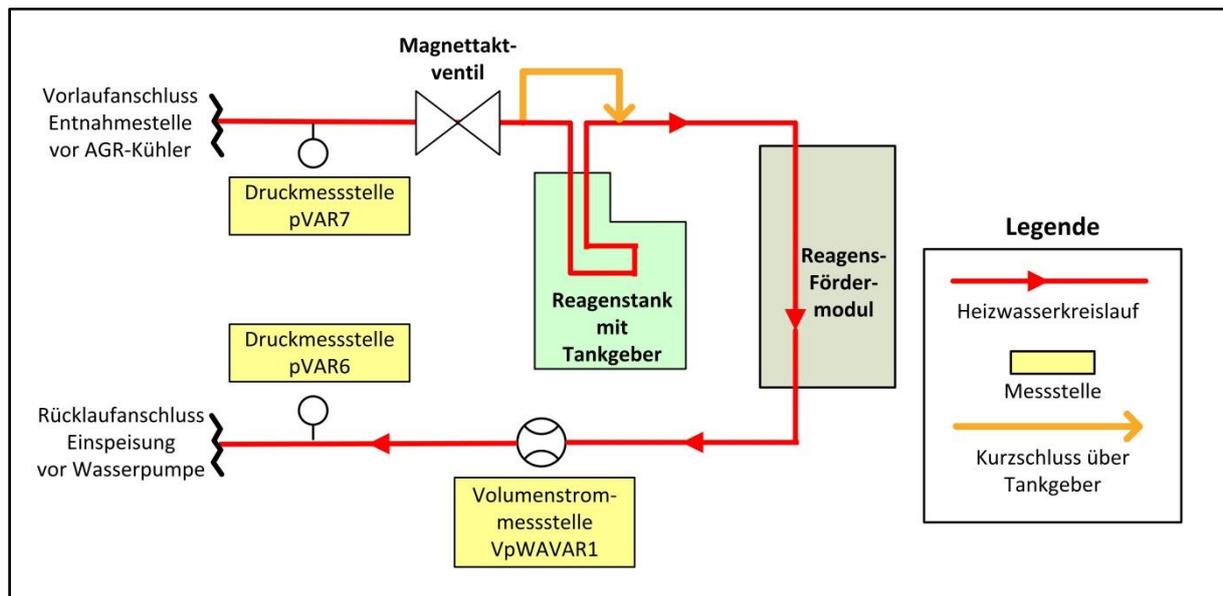


Abbildung 5-6: Versuchsaufbauschema mit Kurzschluss

Die im Prüfstand aufgebauten Komponenten sind in den Abbildungen 5-7 bis 5-11 dargestellt.



Abbildung 5-7: Harnstofftank im Prüfstand



Abbildung 5-8: Anschlussterminal Tankgeber



Abbildung 5-9: Anschluss Fördermodul



Abbildung 5-10: Fördermodul im Prüfstand



Abbildung 5-11: Magnetventil

Die Tabelle 5-4 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Messreihen:

Nummer Datum	Protokoll- name	entfernte Komponente	Notizen
1 10.12.2013	Heizung_vollst	-	Leitungslänge gesamt 7,70 m
2 11.12.2013	Heizung_o_Tankgeber	Tankgeber	Leitungslänge gesamt 7,70 m
3 12.12.2013	Heizung_o_FMod	Fördermodul	Leitungslänge gesamt 7,70 m
4 17.12.2013	Heizung_o_Ventil	Magnetventil	Leitungslänge gesamt 7,70 m
5 18.12.2013	Heizung_o_alle_kurze_Ltg	Alle Komponenten	Kurschluss mit Leitung der Länge 2,65 m

Tabelle 5-4: Übersicht Messreihen

5.6 Versuchsdurchführung

Nach Motorstart und ausreichender Aufwärmphase, während der auf eine konstante Kühlwassertemperatur an der Messstelle vor Motor zu warten ist, wird das Magnetventil über die EDC geöffnet.

Das Drehzahlband von 600 bis 2120 min^{-1} wird abgefahren. Die Schrittweite beträgt jeweils 100 min^{-1} , mit zusätzlichen Messpunkten bei 1950 min^{-1} (Nenn Drehzahl) sowie 2120 min^{-1} (Abregeldrehzahl). Als Motormoment wird in den mittleren Drehzahlen ein Wert von 1000 Nm eingestellt, im Leerlauf beträgt das Moment 0 Nm, in der Abregelung treten Schleppmomente entsprechend dem Motorreibverhalten auf. Das Motordrehmoment dient lediglich der Konstanthaltung der Kühlwassertemperatur, ein Einfluss auf den Kühlwasservolumenstrom ist nicht darstellbar.

Nach dem Anfahren eines neuen Messpunktes wird auf das Erreichen eines konstanten Volumenstroms im Heizwasserkreislauf gewartet. Ist dieses Kriterium erfüllt, wird die Messerfassung von PumaOpen gestartet. Die Messung erfolgt jeweils für 30 s, PumaOpen bildet dann selbstständig den Mittelwert und speichert diesen als Messpunkt im Testergebnis ab. Die Messreihen sind im Anhang B ab Seite IV dieser Arbeit vollständig einsehbar.

5.7 Versuchsauswertung und Ergebnisdarstellung

Es stellen sich folgende Volumenstromverläufe ein:

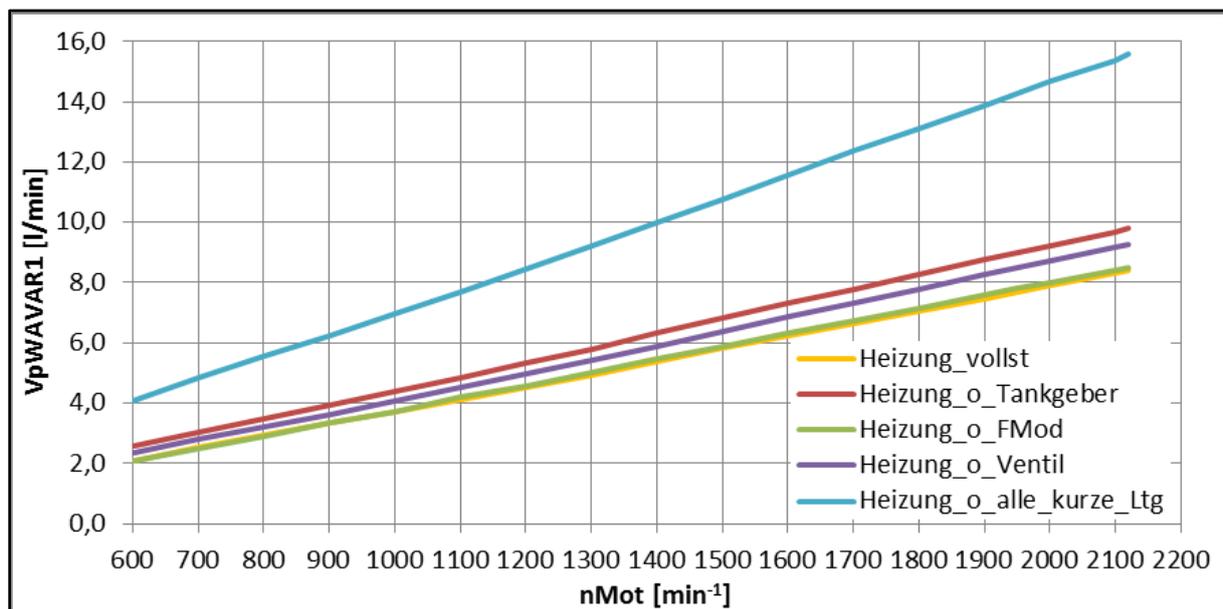


Abbildung 5-12: Volumenströme über Motordrehzahl

Es zeigt sich, dass der Volumenstrom deutliche Abhängigkeiten von der Leitungslänge aufweist. Der sich im hohen Drehzahlbereich bei kurzer Leitungsführung einstellende Wert ist dabei fast doppelt so hoch, wie alle mit langer Leitungsführung und durchflossenen Systemkomponenten aufgenommenen Messergebnisse.

Dagegen liegt der Unterschied zwischen den Messreihen mit je einer kurzgeschlossenen Komponente im zu vernachlässigenden Bereich.

Dementsprechend verhält sich die Druckmessung entgegengesetzt zur Volumenstrommessung. Die Vorlaufdrücke, gemessen kurz nach dem Abgriff des Kühlmittelkrümmers können als identisch bezeichnet werden, die auftretenden Schwankungen im unteren Drehzahlband entstehen durch die „Tagesform“ des Motors und sind für die Betrachtung vernachlässigbar. Bei den aufgetragenen Rücklaufdrücken stellt sich entgegengesetzt proportional zu den Volumenströmen ein deutlich erhöhter Rücklaufdruck und somit ein verringerter Druckverlust für die Messreihe „kurze_Ltg“ ein. Die verbleibenden Messreihen weisen wieder einen nahezu identischen Druckverlust auf.

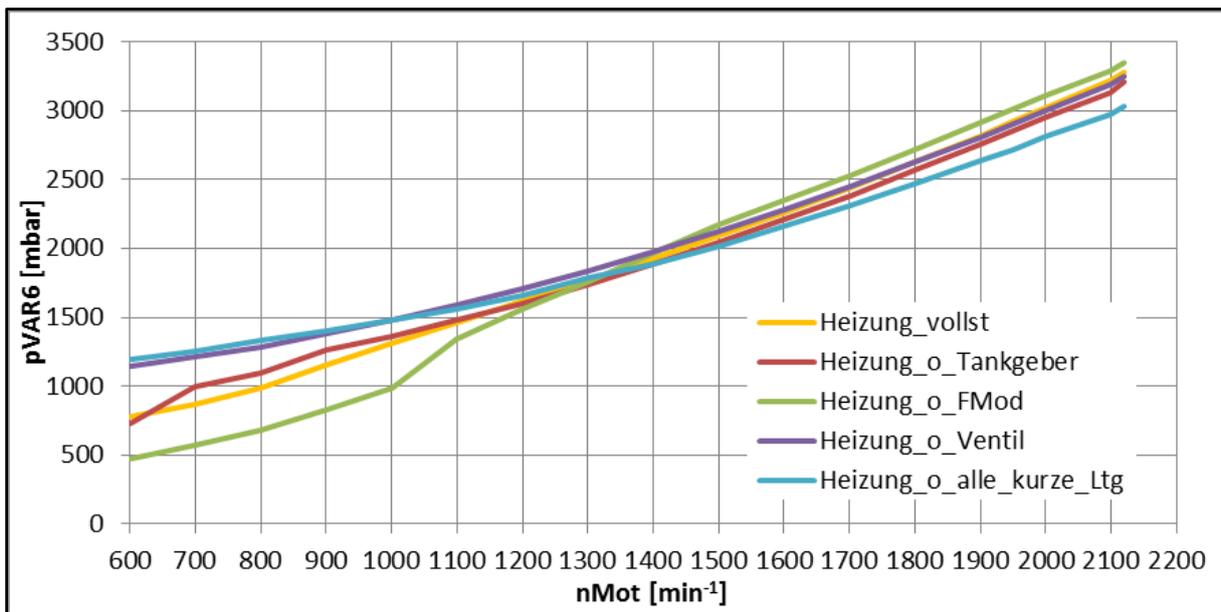


Abbildung 5-13: Vorlaufdrücke über Motordrehzahl

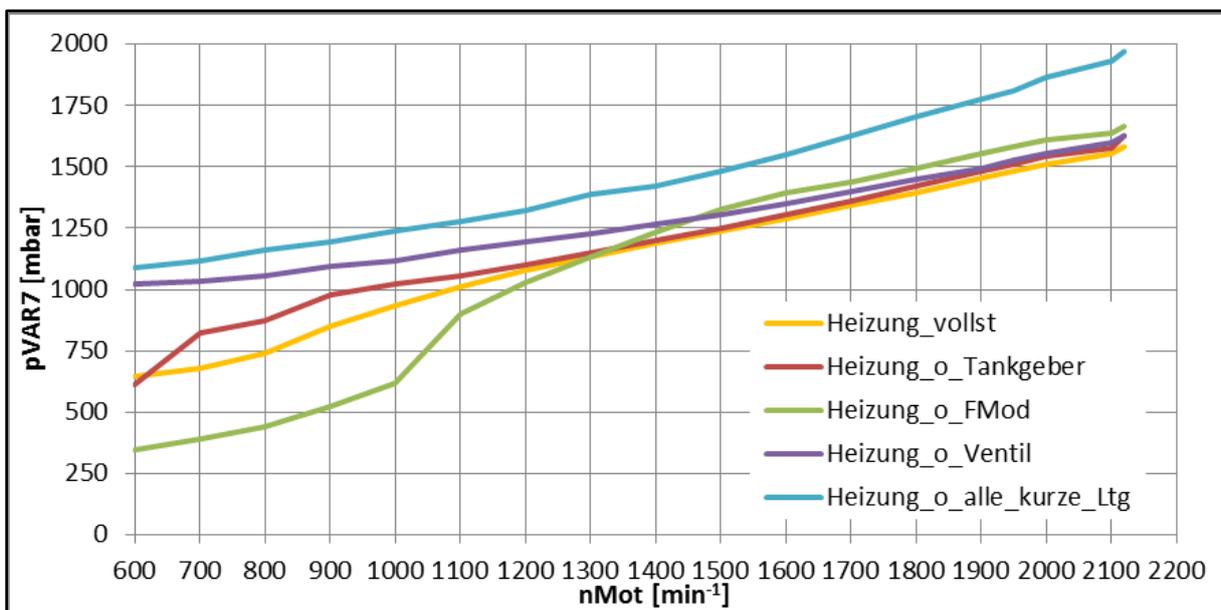


Abbildung 5-14: Rücklaufdrücke über Motordrehzahl

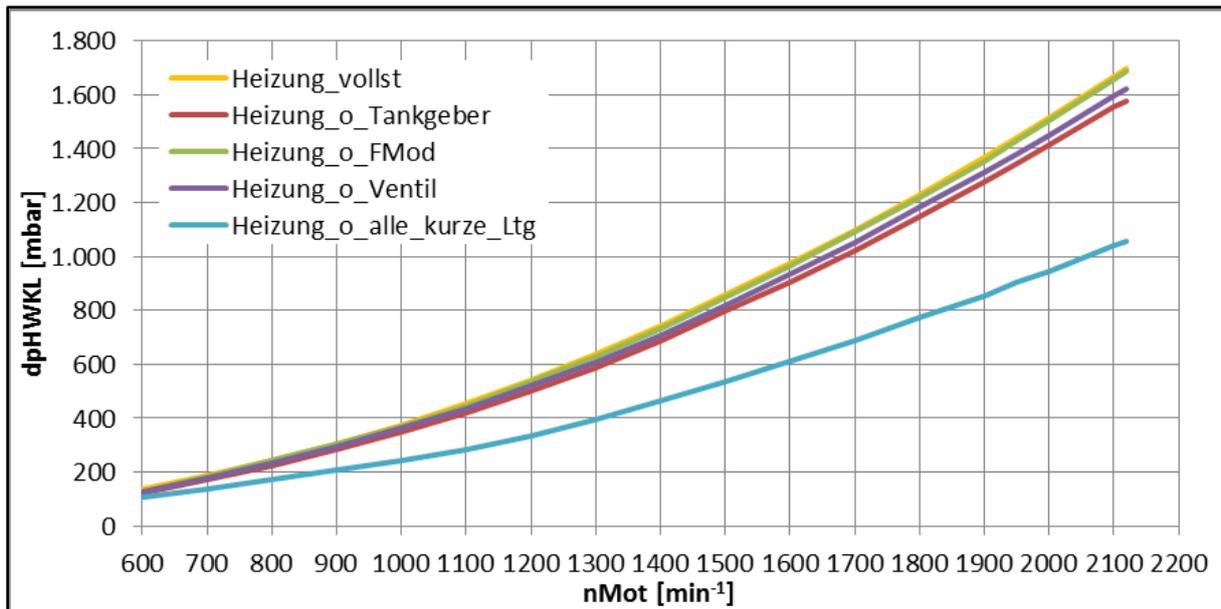


Abbildung 5-15: Druckverlust im Heizwasserkreislauf über Motordrehzahl

Dieses visualisiert auch die Abbildung 5-16, welche aus den Druckverlusten der Kurzschlussmessreihen (Nr. 2-4) bezogen auf die Ergebnisse des Gesamtsystems (Nr. 1) die Druckverlustwerte der einzelnen Komponenten über der Drehzahl aufzeigt:

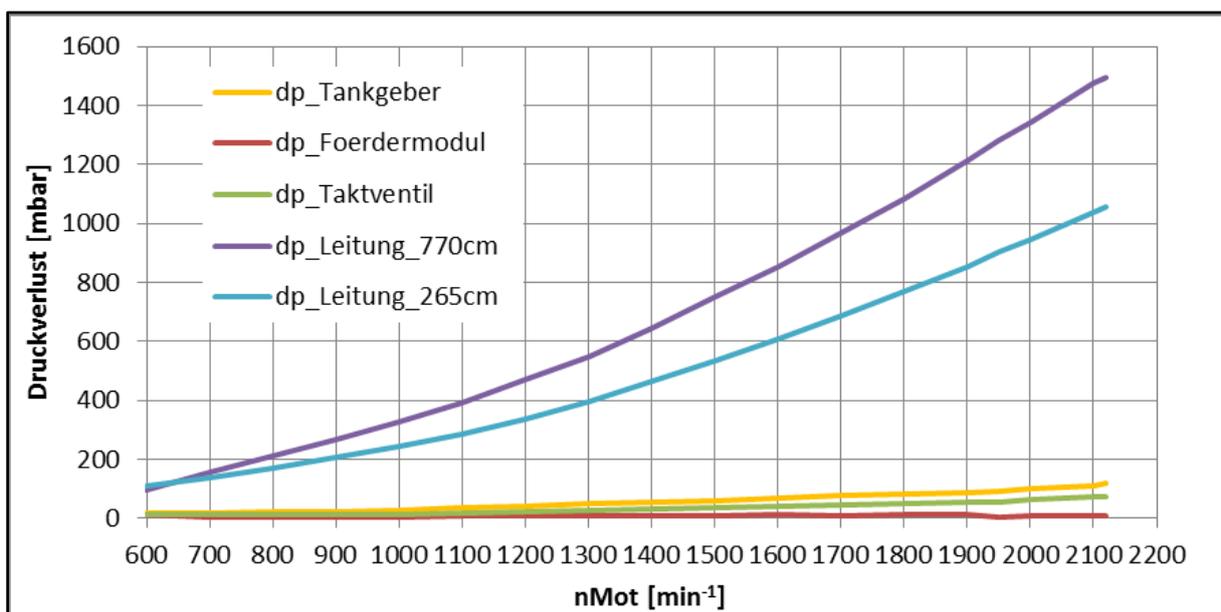


Abbildung 5-16: Druckverlust der Komponenten über Motordrehzahl

Die Abbildung 5-17 veranschaulicht die Druckverlustkennlinien der Komponenten Dosiersystem, Taktventil und Tankgeber noch einmal im Ausschnitt.

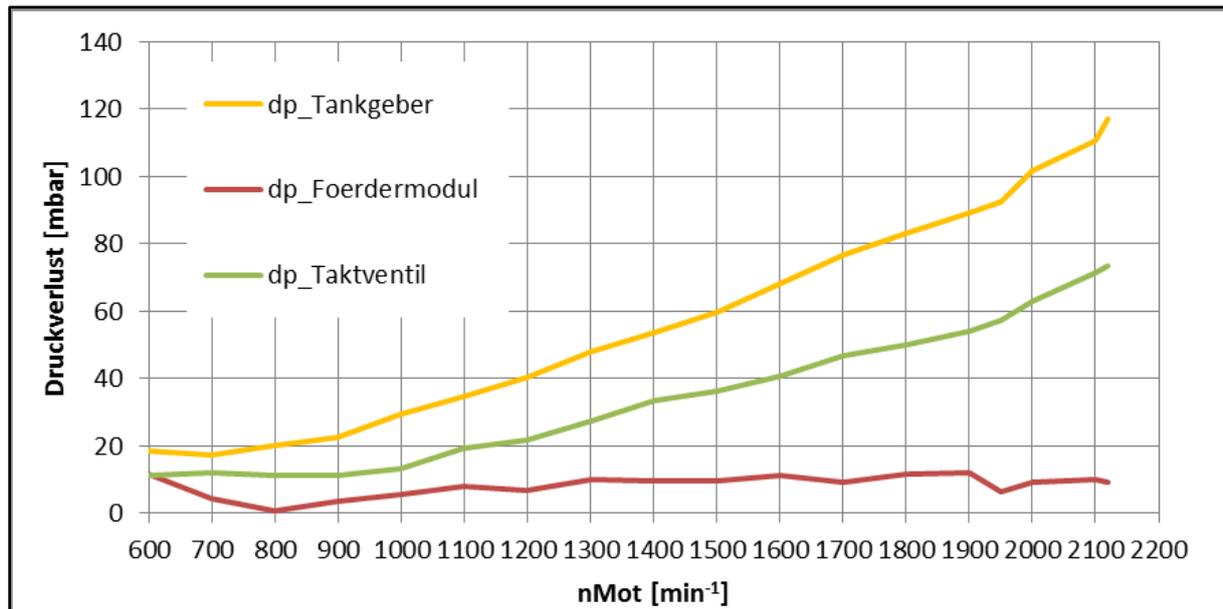


Abbildung 5-17: Druckverlust über Motordrehzahl, Detailansicht

Es wird ersichtlich, dass der Druckverlust im Wesentlichen durch die innerhalb der Leitung auftretende Reibung entsteht, eine kurze Leitungsführung und damit eine geringere Reibungsfläche führen zu weniger Druckverlust und in Abhängigkeit dazu zu steigendem Volumenstrom. Nachteilig bewertet werden muss an dieser Stelle die Verwendung eines Schlauches zur Verbindung aller Einzelkomponenten, zur Optimierung des HWKL empfiehlt sich der im PST aus Platz- und Aufwandsgründen nicht berücksichtigte Einsatz von Edelstahlleitungen.

Den deutlichsten Einfluss auf den Druckverlust des Gesamtsystems nimmt komponentenseitig der Tankgeber, gefolgt vom Magnetventil. Die durch das Fördermodul auftretenden Verluste liegen im Bereich von 0 – 12 mbar, was als vernachlässigbar klein angesehen werden kann.

5.8 Ergebnis

Die Einflussnahme der Dosiersystemkomponenten auf den Druckverlust stellt sich am Heizwasserkreislauf des D2676LE131 als klein heraus. Der höchste gemessene Druckverlust ist am Tankgeber festzustellen. Bei einer Drehzahl von 2120 min⁻¹ ist ein Wert von 117 mbar darstellbar, der Druckverlust der verwendeten Leitung liegt zu bei identischer Drehzahl bei 1496 mbar und damit mehr als zehn Mal so hoch.

Aufgrund dessen wird der komponentenseitige Druckverlust für die Auslegung als nicht relevant eingestuft. Der Versuch zeigt, dass eine bedarfsgerechte Dimensionierung der PST-Pumpe anhand der maximal zu erwartenden Leitungslänge, dem minimalen Leitungsdurchmesser und der Wasserumlaufmenge des entsprechenden Motors möglich ist.

Bedingt durch die nicht optimalen Platzverhältnisse im Prüfstand ist die im Versuchsaufbau verwendete Leitung mit einer Länge von 7,65 m im Bereich der auftretenden maximalen Verrohrungslänge anzusiedeln, die Versuchsergebnisse können daher direkt als Auslegungsgrundlage verwendet werden.

Um ein Lastenheft für verschiedene Lieferanten zur Angebotserstellung zusammenstellen zu können, wird ein typisches Pumpkennfeld erarbeitet. Dabei werden die zu erwartenden Druckverluste über dem sich einstellenden Volumenstrom aufgetragen.

Abbildung 5-18 zeigt das erstellte Pumpkennfeld des D2676LE131 über den RDS-HWKL zur Weitergabe an die Lieferanten. Es lässt sich sowohl der maximal zu erwartende Volumenstrom als auch der zu überwindende Druckverlust ablesen.

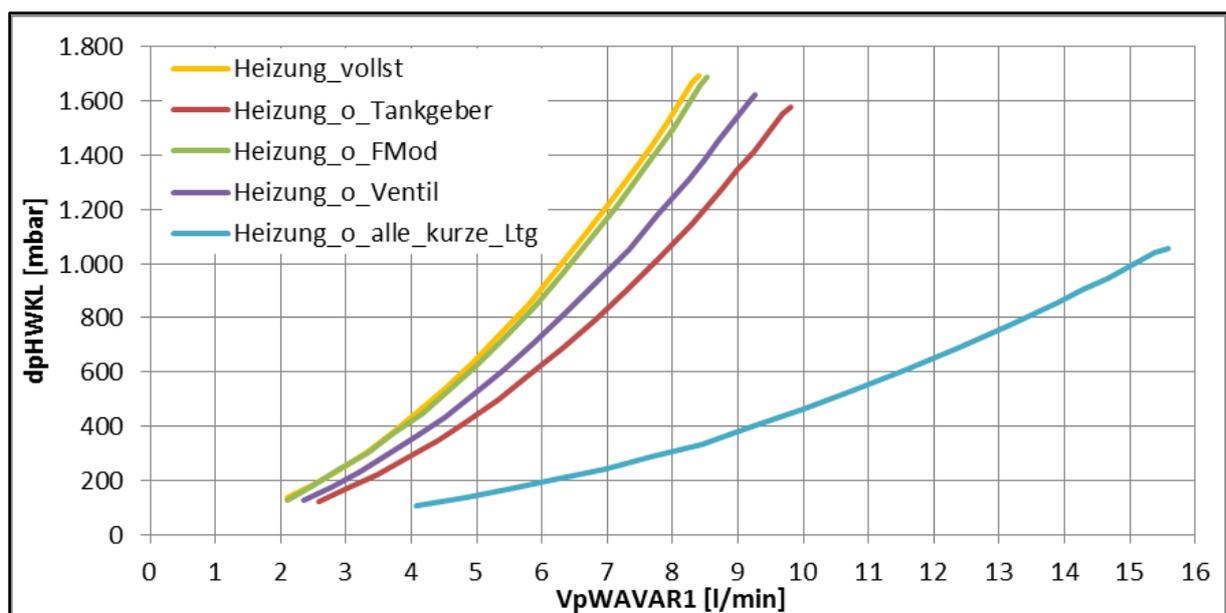


Abbildung 5-18: Druckverlust im Heizwasserkreislauf über Volumenstrom (Pumpkennfeld)

6 Berechnung der benötigten Wärmemenge

6.1 Arbeitshypothese Temperaturverlauf

Ziel der durchzuführenden Berechnung ist die Erarbeitung einer bedarfsgerechten Lösung zur Beheizung des simulierten Motorwasserstroms unter Verwendung eines bereits bekannten, von MAN-Ingenieuren gemessenen Temperaturverlaufs, einer Abschätzung des sich ergebenden Gesamtvolumens und den stoffabhängigen Parametern der verwendeten Motorkühlwassermischung als Eingangsgrößen.

Als Arbeitshypothese für die PST-Entwicklung wird eine Wassertemperaturmessung herangezogen, die zu einem früheren Zeitpunkt in einer externen Kältezelle unter Verwendung einer Belastungsmaschine am Stufe IIIB-D26-Motor ermittelt wurde. Der durchgeführte Prüfzyklus entsprach den Vorgaben des in Abschnitt 3.2.2 eingeführten Auftautests der EPA.

Die Abbildung 6-1 zeigt die von der EDC erfasste Kühlmittel-, sowie Vor- und Rücklaufemperatur des Heizwasserkreislaufes während der gesamten Messdauer von 80 min, welche bewusst länger vorgeschrieben gewählt wurde, um zusätzlich zum geforderten Zeitintervall den Verlauf der Wassertemperatur kurz nach dem erfolgreich absolvierten Auftauversuch zu dokumentieren.

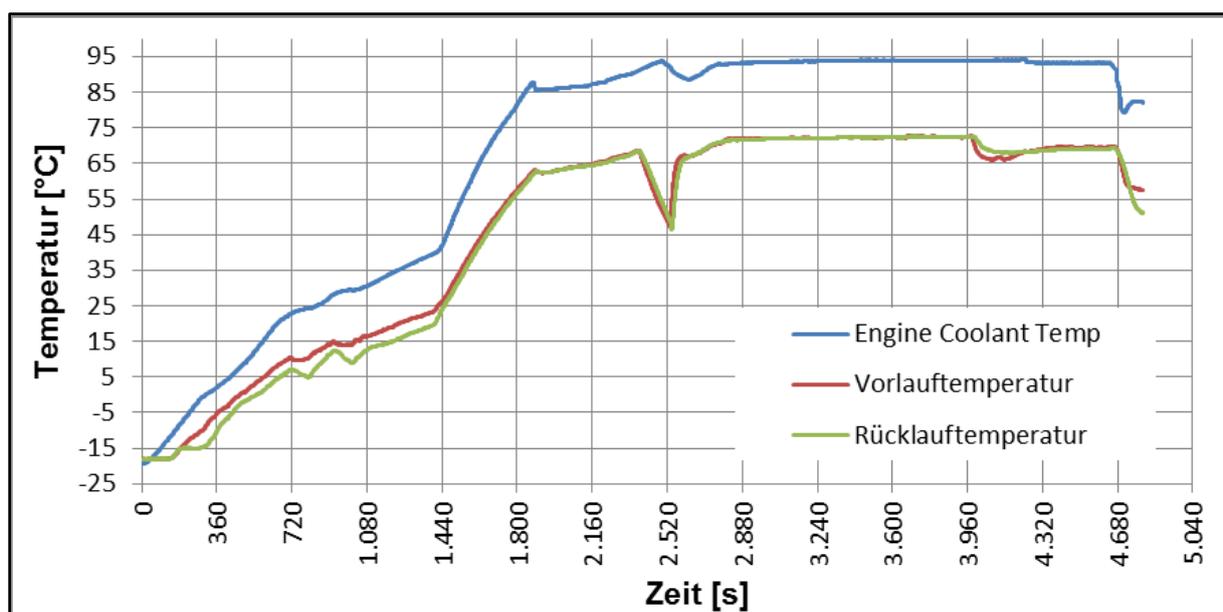


Abbildung 6-1: Kühlwasserverlauf des D26 T4I über der Zeit im EPA-Testzyklus

In den sich anschließenden Abbildungen 6-2 und 6-3 sind ausschnittsweise aus der Gesamtübersicht der Messung die Bereiche besonders hoher Heizintensität dargestellt.

Diese Abschnitte der Kurve lassen sich zum einen als Zeitpunkt des Testbeginns und zum anderen als der Bereich identifizieren, in dem laut des im Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Auftautests der EPA die Teillastaufschaltung auf den Motor erfolgt. Somit findet an dieser Stelle der maximal im Testzyklus vorkommende Wärmeeintrag des Motors in das umlaufende Motorkühlwasser statt.

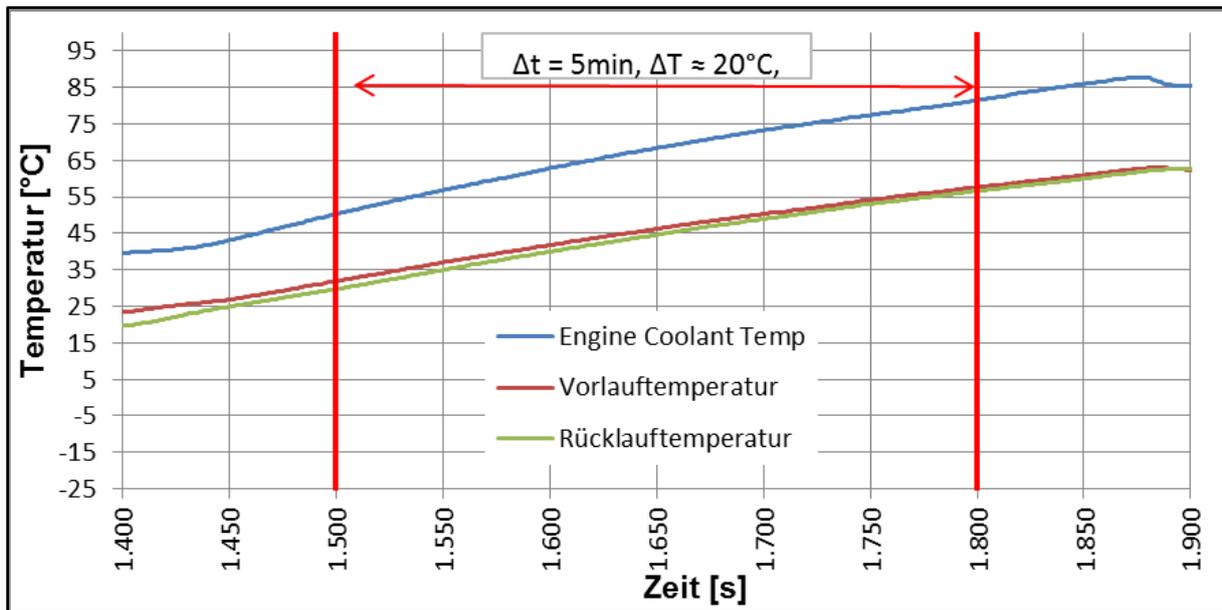


Abbildung 6-2: Ausschnitt aus Abb. 6-1, Gradienten nach Motorstart

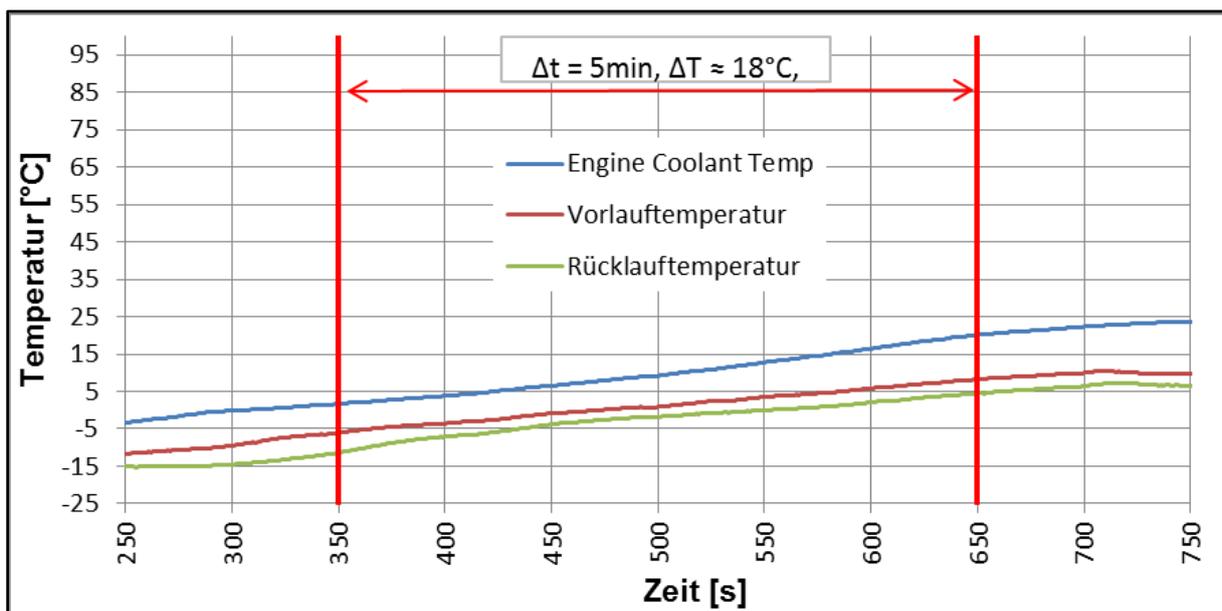


Abbildung 6-3: Ausschnitt aus Abb. 6-1, maximaler Zyklusgradient

Im Bereich der maximalen Steigung aller drei aufgetragenen Temperaturkurven, sichtbar in Abbildung 6-3, erfolgt ein Temperaturanstieg um ca. 20°C im Zeitintervall von 5 min. Dieser Wert wird als Grundlage für die folgenden Betrachtungen festgelegt. Die Wärmemenge zum

Erreichen einer entsprechenden Temperatursteigerung unter Verwendung der noch zu definierenden Motorkühlwassermischung ist zu errechnen.

6.2 Physikalische Grundlage

Wärmemengen lassen sich entweder anhand der masseabhängigen Wärmekapazität C_p oder der auf die Masse normierten spezifischen Wärmekapazität c_p jeweils in Verbindung mit der zu erwartenden beziehungsweise gewünschten Temperatursteigerung ΔT bestimmen.

Während es sich bei der Wärmekapazität eines Stoffes um eine extensive Zustandsgröße handelt, welche sich mit dem zu betrachtenden System verändert, stellt die spezifische Wärmekapazität eine intensive, auf die Stoffmasse bezogene und damit von der Systemgrenze unabhängige Größe dar.

Unter Verwendung einer dieser Größen besteht die Möglichkeit, die notwendige thermische Energie Q , in den folgenden Betrachtungen als Wärmemenge bezeichnet, zur Temperaturerhöhung um ΔT bei Annahme von adiabaten Randbedingungen zu berechnen.

Folgende thermodynamische Grundgleichungen sollen als Berechnungsgrundlage eingeführt werden (vgl. [13], [14]):

$$C_p = \frac{Q}{\Delta T} \left[\frac{J}{K} \right] \quad (\text{F 6.1})$$

$$c_p = \frac{Q}{m * \Delta T} \left[\frac{J}{kg * K} \right] \quad (\text{F 6.2})$$

mit:

- C_p = Wärmekapazität [J/K]
- c_p = spezifische Wärmekapazität [J/(kg*K)]
- Q = thermische Energie, hier Wärmemenge [J]
- ΔT = Temperaturänderung [K]
- m = Stoffmasse [kg]

Nach Equivalenzumformung lässt sich die zur Auslegung gesuchte Wärmemenge Q in Form der Gleichungen F 6.3 und F 6.4 darstellen:

$$Q = C_p * \Delta T [J] \quad (\text{F 6.3})$$

$$Q = c_p * m * \Delta T [J] \quad (\text{F 6.4})$$

Diese Wärmemenge kann nach den bekannten physikalischen Grundlagen auch als Arbeit aufgefasst werden, die an einem Stoff verrichtet werden muss, um so die gewünschte Temperaturerhöhung um das bekannte ΔT zu erreichen.

Soll der Einfluss von thermischer Energie auf ein Fluid beschrieben werden, besteht Bedarf nach einem Bezug von Stoffmasse m zu den temperaturabhängigen Größen Stoffdichte ρ und Stoffvolumen V .

Es gilt der Zusammenhang F 6.5 (vgl. [13]):

$$m = \rho * V [kg] \quad (F 6.5)$$

mit:

- ρ = Stoffdichte [kg/m³]
- V = Stoffvolumen [m³]

Unter Berücksichtigung der eingeführten Berechnungsgleichungen zur Wärmemenge und zur Stoffmasse kann, bekannte Werte für die Größen spezifischer Wärmekoeffizient, Volumen und Dichte oder Stoffmasse sowie für die zu berechnende Temperaturerhöhung vorausgesetzt, nun die benötigte Leistung P ermittelt werden.

Es ergibt sich die Gleichung F 6.6:

$$P = \frac{Q}{t} \left[\frac{J}{s} \right] \quad (F 6.6)$$

mit:

- t = Zeitdauer der Temperaturerhöhung [s]

Das Ergebnis dieser Berechnung gibt die Leistung an, welche exakt im Zeitintervall der Temperaturerhöhung aufgebracht werden muss.

Zur Auslegung eines Heizungssystems wird die Leistungsangabe auf eine Stunde normiert, was durch Anwendung der Beziehung F 6.7 umgesetzt wird:

$$\begin{aligned} 3600 \text{ s} &\triangleq 1 \text{ h} \\ 1 \text{ s} &\triangleq \frac{1}{3600} \text{ h} \end{aligned} \quad (F 6.7)$$

Geläufiger als eine Leistungsangabe in Joule ist, gerade bei Verwendung von elektrischen Systemen, die Ergebnisdarstellung in Watt [W] oder Kilowatt [kW]. Der Umrechnungsfaktor beträgt dabei:

$$\begin{aligned} 1 \text{ W} &= 0,001 \text{ kW} \\ &= 1 \frac{J}{s} = 0,001 \frac{kJ}{s} \end{aligned} \quad (F 6.8)$$

vgl. [13], [14]

6.3 Fluidparameter

Zur möglichst exakten Simulation des Fluidverhaltens des Motorkühlwasserstroms über den HWKL des zu prüfenden RDS durch den aufzubauenden Prüfstand, findet eine zum realen Motorbetrieb identische Mischung aus Wasser und Frostschutzmittel Verwendung.

Das zur Verfügung stehende Frostschutzmittel, welches unter dem Handelsnamen „Havoline XLC – Antifreeze Concentrate“ vertrieben wird, ist eine aus Ethylenglykol bestehende Flüssigkeit, deren Einsatz zudem notwendig ist, um ein Gefrieren des im Prüfstand befindlichen Wassers während der Konditionierungsphase und eine damit einhergehende wahrscheinliche Zerstörung des Prüfstands in der Kältezelle zu vermeiden.

Zur genauen Bestimmung der benötigten Wärmemenge und der daraus resultierenden, notwendigen Heizleistung, bedarf es bei der Berechnung eines auf das Mischungsverhältnis abgestimmten spezifischen Wärmekoeffizienten $c_{p,Wasser-Glykol-Mischung}$. MAN Versuchsmotoren werden unabhängig vom Versuchszweck immer mit frostschutzversetztem Kühlwasser befüllt, um so realitätsnahe Bedingungen zu erzeugen. Zur Erstellung von Motorwärmebilanzien existieren deshalb bereits Kennfelder für die sich einstellenden Stoffparameter Dichte $\rho_{Wasser-Glykol-Mischung}$, spezifischer Wärmekoeffizient $c_{p,Wasser-Glykol-Mischung}$ und die Wärmeleitfähigkeit $\kappa_{Wasser-Glykol-Mischung}$ in Abhängigkeit der Medientemperatur und des Mischungsverhältnisses.

Diese Kennfelder, dargestellt in den Tabellen 6-1 bis 6-3, sollen als Berechnungsgrundlage herangezogen werden. Dabei sind die aufgetragenen prozentualen Angaben immer auf die volumetrische Menge Glykol im Wasser bezogen.

Spezifische Wärmekapazität c_p [kJ/kgK]		Konzentration von Havoline AFC in Wasser (Vol%)											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Temperatur [°C]	-50	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	2,6354	2,4787	2,1592	Freez	Freez
	-40	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	2,7232	2,5606	2,2561	Freez	Freez
	-30	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	2,9467	2,8067	2,6391	2,3488	2,3140	Freez
	-20	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	3,3276	3,0291	2,8859	2,7140	2,4370	2,3460	Freez
	-10	Freez	Freez	Freez	3,7250	3,3966	3,1068	2,9609	2,7855	2,5209	2,3809	2,1900	
	0	Freez	4,0475	3,9124	3,7708	3,4603	3,1797	3,0316	2,8535	2,6004	2,4186	2,2400	
	10	4,1986	4,0544	3,9486	3,8119	3,5187	3,2478	3,0981	2,9180	2,6755	2,4591	2,2900	
	20	4,1891	4,0616	3,9802	3,8483	3,5717	3,3112	3,1604	2,9790	2,7462	2,5026	2,3400	
	30	4,1826	4,0691	4,0073	3,8802	3,6194	3,3698	3,2183	3,0366	2,8126	2,5489	2,3900	
	40	4,1791	4,0769	4,0299	3,9074	3,6617	3,4237	3,2720	3,0906	2,8746	2,5980	2,4400	
	50	4,1786	4,0850	4,0480	3,9299	3,6987	3,4728	3,3215	3,1412	2,9322	2,6500	2,4900	
	60	4,1812	4,0934	4,0616	3,9478	3,7304	3,5171	3,3667	3,1883	2,9854	2,7049	2,5400	
	70	4,1868	4,1020	4,0707	3,9611	3,7568	3,5567	3,4077	3,2318	3,0343	2,7626	2,5900	
	80	4,1954	4,1110	4,0752	3,9698	3,7778	3,5916	3,4444	3,2719	3,0788	2,8231	2,6400	
	90	4,2070	4,1202	4,0752	3,9738	3,7934	3,6217	3,4768	3,3086	3,1189	2,8866	2,6900	
	100	Boil	4,1297	4,0708	3,9732	3,8038	3,6470	3,5050	3,3417	3,1546	2,9529	2,7400	
	110	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	3,5289	3,3713	3,1860	3,0220	2,7900	
120	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	3,2130	3,0940	2,8400		

Tabelle 6-1: Übersicht spez. Wärmekoeffizient

Temperatur [°C]	Dichte ρ [kg/m ³]	Konzentration von Havoline AFC in Wasser [Vol%]										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
-50	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	1164,4800	1173,0000	1166,5000	Freez	Freez
-40	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	1144,7556	1155,1444	1155,5481	Freez	Freez
-30	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	1111,5864	1129,5455	1141,0909	1146,1227	1155,2636	Freez
-20	Freez	Freez	Freez	Freez	1077,2909	1101,4636	1117,7545	1129,9091	1137,8273	1147,3364	Freez	Freez
-10	Freez	Freez	Freez	1055,0424	1073,8731	1093,3330	1108,4283	1120,7899	1130,3178	1139,8559	1148,3964	Freez
0	Freez	1019,5954	1034,4273	1052,6891	1069,9079	1086,5248	1100,7527	1113,0455	1123,3030	1132,6752	1140,8863	Freez
10	999,7839	1017,2212	1032,8455	1049,4818	1065,4742	1080,4803	1094,0545	1106,1091	1116,5439	1125,6697	1133,4497	Freez
20	998,0833	1013,9842	1029,8768	1045,5515	1060,6276	1074,7512	1087,8010	1099,5354	1109,8542	1118,7377	1126,1154	Freez
30	995,6312	1010,2828	1026,0000	1041,0000	1055,4000	1069,0000	1081,6000	1093,0000	1103,1000	1111,8000	1118,8973	Freez
40	992,4276	1006,3233	1021,5000	1035,9000	1049,8000	1063,0000	1075,2000	1086,3000	1096,2000	1104,8000	1111,7947	Freez
50	988,4725	1002,1209	1016,4677	1030,2952	1043,8128	1056,6351	1068,4901	1079,3535	1089,1254	1097,7038	1104,7915	Freez
60	983,7660	997,4987	1010,8000	1024,2000	1037,4000	1049,9000	1061,5000	1072,2000	1081,9000	1090,5000	1097,8571	Freez
70	978,3080	992,0887	1004,2000	1017,6000	1030,5000	1042,9000	1054,4000	1065,0000	1074,8000	1083,2000	1090,9457	Freez
80	972,0986	985,3310	996,1768	1010,4515	1023,0276	1035,8512	1047,5010	1058,0354	1067,3542	1075,8377	1083,9968	Freez
90	965,1377	976,4741	986,0455	1002,6818	1014,8742	1029,0803	1041,2545	1051,7091	1060,3439	1068,4697	1076,9347	Freez
100	Boil	964,5751	972,9273	994,1891	1005,9079	1023,0248	1036,2527	1046,5455	1053,8030	1061,1752	1069,6693	Freez
110	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	1033,2283	1043,1899	1048,0178	1054,0559	1062,0950	Freez
120	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	1043,3273	1047,2364	1054,0916	Freez

Tabelle 6-2: Übersicht Dichte

Temperatur [°C]	Wärmeleitfähigkeit k [W/mK]	Konzentration von Havoline AFC in Wasser (Vol%)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
-50	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	0,4265	0,4171	0,3890	Freez	Freez
-40	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	0,4214	0,4094	0,3818	Freez	Freez
-30	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	Freez	0,4283	0,4164	0,4019	0,3746	0,3413	Freez
-20	Freez	Freez	Freez	Freez	0,4400	0,4258	0,4113	0,3947	0,3674	0,3352	Freez	Freez
-10	Freez	Freez	Freez	0,4618	0,4410	0,4232	0,4062	0,3876	0,3602	0,3291	0,3174	Freez
0	Freez	0,5346	0,4977	0,4665	0,4419	0,4207	0,4012	0,3807	0,3530	0,3229	0,3117	Freez
10	0,5746	0,5460	0,5060	0,4710	0,4425	0,4181	0,3961	0,3740	0,3458	0,3168	0,3056	Freez
20	0,5950	0,5568	0,5138	0,4754	0,4430	0,4156	0,3910	0,3676	0,3386	0,3107	0,2992	Freez
30	0,6130	0,5670	0,5213	0,4795	0,4432	0,4130	0,3860	0,3613	0,3314	0,3046	0,2923	Freez
40	0,6286	0,5766	0,5283	0,4834	0,4433	0,4105	0,3809	0,3552	0,3241	0,2985	0,2850	Freez
50	0,6418	0,5856	0,5350	0,4872	0,4431	0,4079	0,3758	0,3494	0,3169	0,2923	0,2773	Freez
60	0,6526	0,5940	0,5412	0,4907	0,4428	0,4054	0,3707	0,3437	0,3097	0,2862	0,2692	Freez
70	0,6610	0,6018	0,5471	0,4940	0,4422	0,4028	0,3657	0,3382	0,3025	0,2801	0,2608	Freez
80	0,6670	0,6090	0,5525	0,4971	0,4415	0,4003	0,3606	0,3330	0,2953	0,2740	0,2519	Freez
90	0,6706	0,6156	0,5576	0,5001	0,4405	0,3977	0,3555	0,3279	0,2881	0,2679	0,2426	Freez
100	Boil	0,6216	0,5622	0,5028	0,4394	0,3952	0,3505	0,3230	0,2809	0,2617	0,2329	Freez
110	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	0,3454	0,3183	0,2737	0,2556	0,2228	Freez
120	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	Boil	0,2665	0,2495	0,2124	Freez

Tabelle 6-3: Übersicht Wärmeleitfähigkeit

Verwendung findet üblicherweise ein Mischungsverhältnis von 50% Wasservolumen zu 50% Glykolethylenvolumen, daher erfolgt die Berechnung auf Basis dieses Verhältnisses. Weiterhin ist ein Einsatz im Temperaturbereich von -20°C bis 100°C geplant, die weiteren Betrachtungen werden daher auf diesen fokussiert.

Somit sind die sich einstellende Dichte und der sich einstellende spezifische Wärmekoeffizient für die Berechnungsschritte auf Grundlage der oben gezeigten Kennfelder zu bestimmen. Dabei wird die Heizleistung immer für Temperaturerhöhungen um 20°C absolut berechnet, die Bestimmung der aktuellen stoffspezifischen Parameter erfolgt per Mittelwertbildung.

Am Beispiel des Temperatursprunges von -20°C auf 0°C wird die Berechnung dargestellt, die übrigen, in der Tabelle 6-4 aufgelisteten Stufen berechnen sich analog.

$$c_{p, \text{Temperatursprung } -20^\circ\text{C auf } 0^\circ\text{C}} = \frac{c_{p, -20^\circ\text{C}} + c_{p, -10^\circ\text{C}} + c_{p, 0^\circ\text{C}}}{3} = \frac{3,0291 + 3,1068 + 3,1797}{3} = 3,105$$

Temperaturerhöhung ΔT [°C]	spez. Wärmekoeffizient c_p [kJ/(kg·K)]
-20 auf 0	3,11
0 auf 20	3,25
20 auf 40	3,37
40 auf 60	3,47
60 auf 80	3,56
80 auf 100	3,62

Tabelle 6-4: spez. Wärmekoeffizient in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung

Die Tabelle 6-5 zeigt die nach gleichem Verfahren berechneten mittleren Dichten für die Temperatursprünge:

Temperaturerhöhung ΔT [°C]	Dichte ρ [kg/m ³]
-20 auf 0	1093,77
0 auf 20	1080,59
20 auf 40	1068,92
40 auf 60	1056,51
60 auf 80	1042,88
80 auf 100	1029,32

Tabelle 6-5: Dichte in Abhängigkeit der Temperaturerhöhung

6.4 Angewandte Berechnung

Mittels der Grundlagen aus Abschnitt 6.2 und den in Abschnitt 6.3 hergeleiteten Parametern für das eingesetzte Fluidgemisch lassen sich die erforderliche Wärmemenge sowie die zur Erzeugung benötigte Heizleistung nun errechnen. Um den Verlauf bei steigender Temperatur abbilden und bei der Beschaffung von Heizkomponenten auf die maximal benötigte Heizleistung zurückgreifen zu können, werden weiterhin sechs einzelne Berechnungen durchgeführt, die sich jeweils auf die Temperaturerhöhungen beziehen. Die Betrachtung wird dabei adiabatisch, also ohne Berücksichtigung etwaiger Wärmeverluste durchgeführt.

Wiederum wird der Ablauf der Berechnung am Beispiel der Temperaturerhöhung von -20°C auf 0°C dargestellt. Zur Betrachtung eines Systems mit unbekannter Gesamtmasse bei definierter Umgebungsbedingung erweist sich eine Berechnung der Wärmemenge unter Einbeziehung der spezifischen Wärmekapazität als sinnvoll. Durch Einsatz der Beziehung F 6.5 lässt sich die Stoffmasse durch die in Abschnitt 6-3 hergeleitete Dichte sowie das Gesamtvolumen des Prüfstands ersetzen.

Unter Zuhilfenahme einer vom noch unbekanntem Gesamtvolumen abhängigen Parameterstudie kann bereits jetzt eine Aussage zur benötigten Wärmemenge und der daraus abgeleiteten Heizleistung getroffen werden.

Hierfür wird die Gleichung F 6.4 unter der bereits erwähnten Einbeziehung der Beziehung F 6.5 als Funktion des Gesamtvolumens des Prüfstands dargestellt. Es fließen Zahlenwerte von 0 bis 60 l in die Betrachtung ein, was 0 bis 0,06 m³ entspricht.

Erneut wird am Beispiel der Temperaturerhöhung von 0°C auf -20°C die Berechnung exemplarisch aufgezeigt:

$$Q_{(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})}(m) = c_{p,(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})} * \Delta T_{(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})} * m_{\text{ges.Kreislauf}}$$

$$Q_{(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})}(m) = c_{p,(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})} * \Delta T_{(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})} * \rho_{(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})} * V_{\text{ges.Kreislauf}}$$

$$Q_{(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})}(V) = 3,11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 20\text{K} * 1093,774 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * V_{\text{ges.Kreislauf}}$$

$$Q_{(-20^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C})}(V) = 68032,74 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} * V_{\text{ges.Kreislauf}}$$

mit $V_{\text{ges.Kreislauf}} \in [0 \text{ m}^3; 0,06 \text{ m}^3]$

Abbildung 6-4 zeigt die graphische Aufbereitung der benötigten und vom Volumen abhängigen Wärmemengen Q für alle definierten Temperaturerhöhungen, zur einfacheren Bezugsherstellung wird die auslegungsrelevante Einheit Liter gewählt.

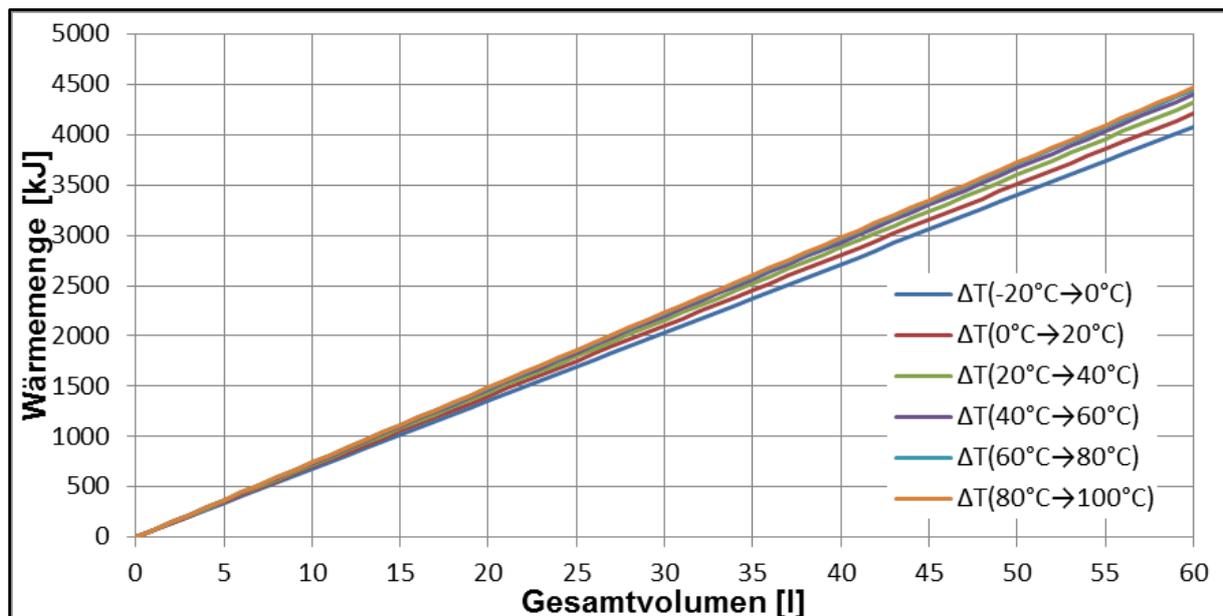


Abbildung 6-4: Wärmemengen in Abh. der Temperaturerhöhung über Gesamtvolumen

Unter der postulierten Annahme, dass die Temperaturerhöhungen wie im Kapitel 6.1 aufgezeigt in jeweils fünf Minuten (300 s) darstellbar sein sollen, ergibt sich die benötigte

Heizleistung $P_{\text{Heiz,Prüfstand}}$ des Prüfstands pro Stunde unter Einbeziehung der Grundgleichung F 6.6 sowie der Erweiterungen F 6.7:

$$P_{\text{Heiz,Prüfstand}}(Q) = Q(V, \Delta T, c_p, \rho) * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{1}{300 \text{ s}}$$

Die pro Stunde abgegebene Leistung ist eine standardisierte Größe, das vom Volumen parametrisch abhängige Ergebnis wird mittels Gleichung F 6.8 in kW umgerechnet und in Abbildung 6-5 dargestellt.

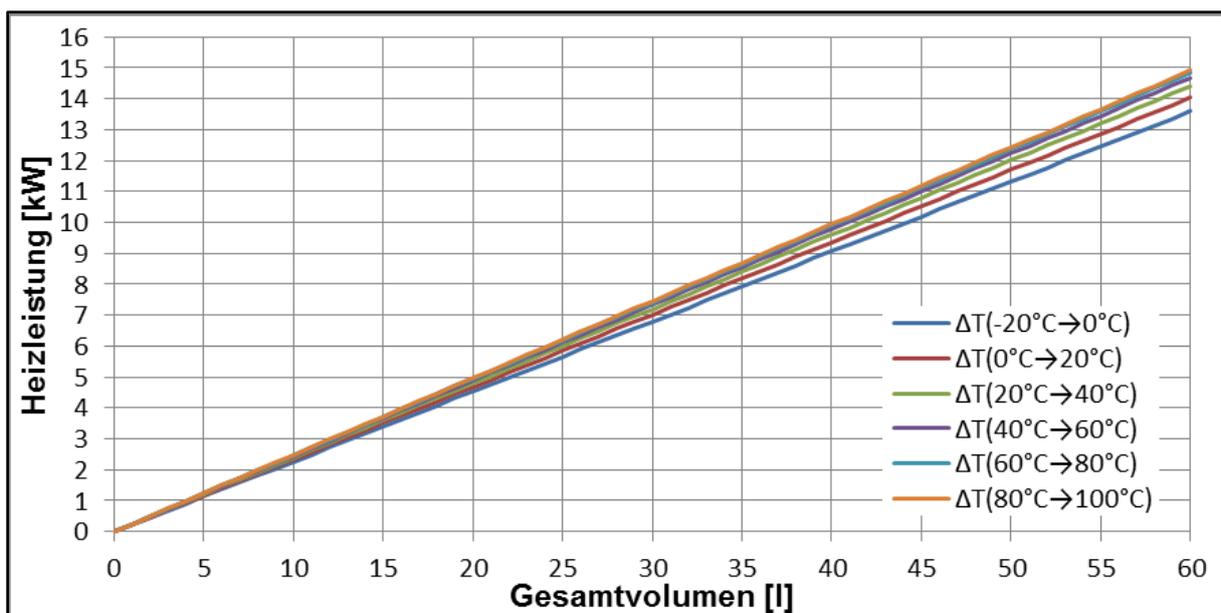


Abbildung 6-5: Heizleistungen in Abh. der Temperaturerhöhung über Gesamtvolumen

Diese Parameterstudie dient als Grundlage für die Konstruktion des Prüfstands, insbesondere muss untersucht werden, wie das Rohrleitungspaket so ausgelegt werden kann, dass ein möglichst geringes Gesamtvolumen ins System eingebracht werden muss, wodurch der Heizleistungsbedarf minimiert werden kann. Limitierende Faktoren dieser Untersuchung stellen hierbei der drohende Leerlauf der Pumpe sowie auftretende Kavitation dar.

7 Arbeitspaket Wasserpumpe

7.1 Lastenheft

Da die Wasserpumpe, die Hauptkomponente des Prüfstands, von einem externen Zulieferer bezogen werden muss, besteht Bedarf nach einem Lastenheft zur Anfrage bei verschiedenen Anbietern von industriell einsetzbaren Pumpen.

Auf Grundlage der bisher identifizierten Größen für auftretende Volumenströme, Vor- und Rücklaufdrücke, Druckverluste und die benötigte Heizleistung wird eine Informationsunterlage erstellt, die den kontaktierten Fremdfirmen übermittelt werden kann.

Mangels Volumenstrommessungen an anderen, vornehmlich größeren Motorbaureihen der MAN, muss der maximal durch den Prüfstand bereitzustellende Volumenstrom geschätzt werden, um so auch einen für kommende Entwicklungsaufgaben einsatzfähigen Prüfstand aufzubauen.

Im Lastenheft werden folgende Anforderungen an die Pumpe festgeschrieben:

- Effektiver Volumenstrom: 0 – 30 l/min
 - Regelbarkeit des Volumenstroms über Frequenzumrichter (FU)
 - Steuerspannungseingang am FU: -10 V bis +10 V für Sollwertvorgabe
 - Zu überwindender Druckverlust (bei allen Volumenströmen): 3,0 bar
 - Umgebungstemperatur: -20°C – 30°C
 - Medientemperatur: -20°C – 100°C
 - Medium: Wasser/Glykol im Mischungsverhältnis 50/50
 - Heizleistung: bis zu 15 kW
- (Temperaturerhöhung von $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ soll in $t = 5$ min stattfinden)

Bedingt durch die sehr hoch angesetzte, geforderte Heizleistung, die vermutlich nicht über die verhältnismäßig kleine Kontaktfläche der Pumpe aufgebracht werden kann, wird diese Anforderung nicht als Ausschlusskriterium für die Auswahl einer Pumpe definiert.

Der geforderte Volumenstrom von maximal 30 l/min liegt fast doppelt so hoch wie der im Kapitel 5 gemessene maximale Volumenstrom von ca. 15,5 l/min. Dieser Sicherheitsfaktor wird veranschlagt, um auch V-12-Motorkomponenten validieren zu können. In der Anfrage an die ausgewählten Zulieferer wird ebenfalls ein zum Antrieb der Pumpe geeigneter FU angefragt. Die als Kriterium definierte Regelbarkeit des Volumenstroms über diesen Umrichter bedarf eines analogen Sollwerteingangs im Bereich von -10 bis +10 V. Hierdurch

kann in der im weiteren Projektverlauf zu definierenden Automatisierungslösung eine stufenlose Volumenstromregelung realisiert werden.

Die im Lastenheft benannten Bereiche für Umgebungs- und Fluidtemperatur ergeben sich aus den bereits umfänglich beschriebenen Testbedingungen der EPA sowie der Arbeitshypothese für den Motorkühlwassertemperaturverlauf.

7.2 Angebotseinholung / Auswahl

Unter Einbeziehung der zusammengefassten Anforderungen werden durch Internetrecherche ermittelte Lieferanten von Industrie- und Prozesspumpen kontaktiert. Nach Vorabtelefonaten erfolgt eine konkrete Anfrage durch Versendung der Anfrageunterlagen an mehrere Firmen, ausgewählt wird schließlich die Firma LEWA GmbH:

LEWA GmbH, Ulmer Straße 10, 71229 Leonberg

Das übermittelte Angebot bezieht sich auf eine Industriepumpe des Typs „Viking H124E“, die als innenverzahnte Zahnradpumpe ausgeführt ist, den zum Antrieb geeigneten Elektromotor und einen mittels Sollwertvorgabe steuerbaren FU der Firma Siemens mit der Typbezeichnung „Sinamics G120C“.

Die Kenndaten der Pumpe enthalten einen maximal geförderten Volumenstrom von 56,6 l/min (3,4 m³/h), einen Spitzendruck von 14 bar, einen Medientemperaturbereich von -20°C bis 90°C und eine Umgebungstemperaturspanne von -20°C bis 40°C.

Gehäuse sowie Rotor der Pumpe sind aus Grauguss gefertigt, die Rotorwelle besteht aus Stahl. Weiterhin besitzt die Pumpe drei Heizpatronen, die eine elektrische Fluidbeheizung mit einer Leistung von 275 W ermöglichen. Die angebotene Anlage aus Pumpe und Motor liegt damit in allen Punkten innerhalb der festgelegten Spezifikationen, die Heizleistung ist jedoch sehr gering und muss durch die zusätzliche Verwendung eines externen Heizsystems erweitert werden. Mittels des angebotenen FUs kann die Pumpe stufenlos betrieben werden, ein entsprechender Analogeingang zur Sollwertvorgabe ist vorhanden.

Der Angebotspreis von 3.384,00 Euro netto liegt im Rahmen der Budgetvorgabe von maximal 10.000 Euro, der maximale Förderstrom stellt sogar mehr Spielraum als gefordert zur Verfügung, was gerade im Hinblick auf die bisher unbekanntenen Volumenströme der V-Motor-Baureihe als positiv eingestuft wird. Auf diese Weise steigt die Wahrscheinlichkeit, den Prüfstand auch für kommende Entwicklungsaufgaben ausreichend dimensioniert aufzustellen erneut.

8 Arbeitspaket Heizungssystem

8.1 Lastenheft

Das Heizungssystem des Prüfstands muss die im Kapitel 6.1 vorgestellte Temperatursollkurve darstellen können, optimaler Weise ist der Leistungsspielraum groß genug, um sogar schnellere Aufheizkurven zu erreichen.

Nach der im Kapitel 6.4 durchgeführten Parameterstudie ist, unter der Annahme, dass ca. fünf bis zehn Liter Gesamtvolumen im Prüfstand vorhanden sind, eine Heizleistung von mindestens ein bis zweieinhalb Kilowatt pro Stunde notwendig. Dieses entspricht jedoch der benötigten Heizleistung bei einem adiabaten System und optimaler Übertragung der Heizenergie auf das umlaufende Fluid. Da auch der Wandwärmeübergang von den Leitungsrohren auf das Fluid beachtet werden muss und sich der als Werkstoff verwendete Edelstahl eher negativ auswirkt, ist es erforderlich die Heizleistung höher zu wählen.

Zur Auswahl stehen verschiedene Konzepte, die hinsichtlich ihrer technischen Umsetzbarkeit und der erzielbaren Heizleistung bewertet werden müssen. Jedes Konzept bedarf weiterhin einer Überprüfung der elektrischen Realisierbarkeit in der Kältezelle, so dass der Betrieb mit den vorhandenen elektrischen Anschlusssteckdosen durchgeführt werden kann. In Betracht gezogen werden:

- Rohrbegleitheizung mit um die Leitungsrohre gewickelten Heizbändern
- In den Wasserkreislauf integrierte Durchlauferhitzer
- In den Wasserkreislauf integrierte Tauchsieder

8.2 Auswahl und Analyse

Die Verwendung einer Rohrbegleitheizung ist nicht geeignet, da die lieferbaren Produkte Heizleistungen von ca. 60 W/m Heizband bieten. Ein weiterer Negativpunkt ist die benötigte Heizbandlänge von ca. 83 m, mit der eine Heizleistung von 5 kW auf die Verrohrung aufgebracht werden könnte. Zudem erfolgt die Applikation der Heizleistung dann über die Verrohrung und nicht direkt ins umlaufende Prüfstandswasser, was den bereits niedrigen Wirkungsgrad der Rohrbegleitheizung für diesen Einsatz weiter senkt. Ein zur Verfügung gestelltes Heizband wird nach einem Funktionstest als unzureichend eingestuft.

Ebenfalls problematisch stellt sich der Einsatz eines Durchlauferhitzers dar. Die im PST umlaufende Wassermenge müsste erhöht werden um ein zusätzlich in den Kreislauf

eingebrautes Gerät zu füllen. Die bereits beschriebenen Temperaturkurven wären so wahrscheinlich nicht erreichbar.

Verwendung finden soll ein Tauchsieder, abgebildet in Bild 8-1, der als Serienteil in MAN Motoren zur Vorwärmung des Motorkühlwassers eingesetzt wird. Dieses Heizelement trägt die Sachnummer 51.06700-7010, wird über einen externen 230 Volt Wechselstrom Anschluss gespeist und gibt in der Stunde 1,1 kW Heizleistung ab. Das Heizelement ist mit einem M28 Einschraubgewinde versehen. Die Eintauchtiefe beträgt 50 mm, vorteilhaft stellt sich dar, dass die Wärmeabgabe nur im tatsächlich eingetauchten Bereich des Heizelements stattfindet, die oberhalb der Einschraubmutter befindlichen Bereiche werden im Betrieb nicht erwärmt.



Abbildung 8-1: Heizelement mit Einschraubgewinde

Über noch zu definierende Flansche wird dieses Heizelement stehend in den Zuwasserstrom eingebracht. Für die Erstausrüstung des Prüfstands sollen sechs dieser Heizelemente verbaut werden, die einer nominellen Wärmeleistung von 6,6 kW entsprechen. Der Vorteil in der Verwendung eines MAN Serienteils liegt auch in der Möglichkeit der Beschaffung von weiteren Heizelementen. Sollte die Heizleistung von 6,6 kW externer und 0,275 kW über die Pumpe aufgebracht Heizleistung nicht ausreichend sein, kann der Prüfstand durch diese Standardkomponente problemlos erweitert werden.

Zum Lieferumfang des Heizelementes gehört weiterhin ein passender Anschlusskabelsatz, der aus zwei Teilstücken besteht und bereits auf bestehende Kältetauglichkeit erprobt ist. Das erste Teilstück des Anschlusskabels kann fest am Prüfstand verbaut werden, die zusätzlich vorhandene Masseleitung kann auf die Gitterbox gelegt werden, um so eine Bestromung der Gitterbox zu vermeiden.

Aufgrund dieser Festlegung ist das im Prüfstand befindliche Gesamtvolumen eingeschränkt, es können maximal 20 l im vorgegeben Zeitraum um 20°C erwärmt werden. Hierbei handelt

es sich jedoch um eine adiabate Betrachtung ohne Wandwärmeverluste. Die erfolgreiche Beheizung ist in einem ersten Versuch zu validieren und gegebenenfalls um oben beschriebene Elemente zu erweitern. Eine Anpassung des maximalen Gesamtvolumens des Prüfstands auf den durch die Auslegung des Heizungssystems als realistisch identifizierten Volumenbereich bis maximal 20 l ergibt die in Abbildung 8-2 zu erkennende Veränderung des bereits aus Abschnitt 6.4 bekannten Diagrammes 6-5. Es wird deutlich, dass die gewählte Heizleistung von 6,6 kW zumindest theoretisch ausreichend ist, um 20 l Wasser entsprechend den Vorgaben zu beheizen.

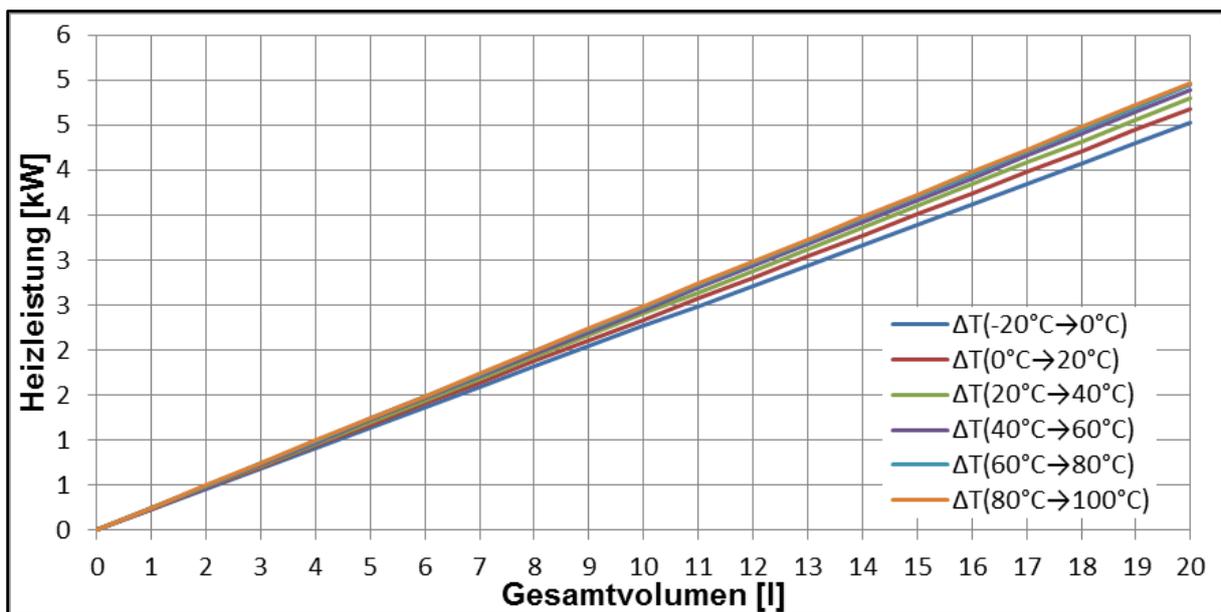


Abbildung 8-2: Heizleistung über Gesamtvolumen, Detailansicht

Da die kritische Temperaturerhöhung im Bereich von 80°C auf 100°C liegt, wird nun zur besseren Darstellung des maximalen Gesamtvolumens dieses in Abbildung 8-3 über der Heizleistung aufgetragen:

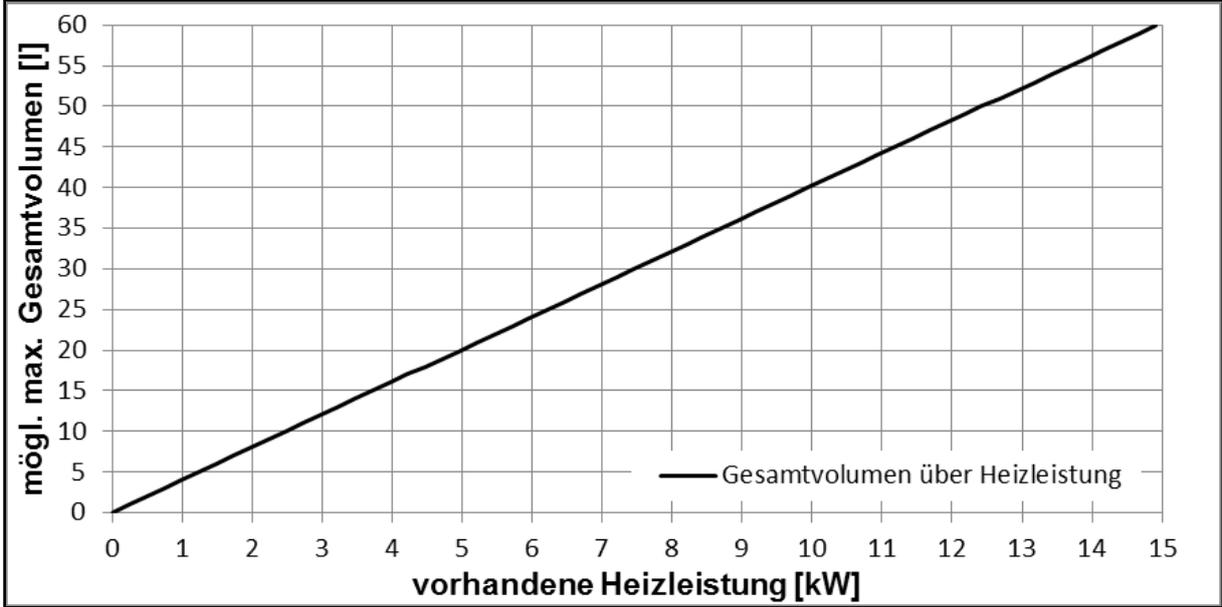


Abbildung 8-3: Mögliches Gesamtvolumen in Abhängigkeit der Heizleistung

9 Elektrische Anlage des Prüfstands

9.1 Heizung

Die Gesamtleistung der sechs verwendeten Heizelemente von 6,6 kW erlaubt eine Verwendung von 230 V Wechselstrom aus der haushaltsüblichen Steckdose nur bedingt. Berechnet man aus der Leistung und der anliegenden Spannung den fließenden Strom, so ergeben sich unter Anwendung des Ohmschen Gesetzes (vgl. [15]) folgende Werte:

$$U = R * I \quad (\text{F 9.1})$$

Unter Verwendung der Leistung stellt sich dieses Gesetz wie folgt dar:

$$P = U * I \quad (\text{F 9.2})$$

Somit berechnet sich aus den in diesem Fall gültigen Werten der folgende fließende Strom:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{5500 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 23,91 \text{ A}$$

Da die Nutzstromsteckdose mit 230 V nur bis maximal 16 A Sicherungen betrieben wird, können somit nicht alle Heizelemente parallel geschaltet betrieben werden. Es besteht zwar die theoretische Möglichkeit, jedes Heizelement an einer anderen Steckdose zu betreiben, dazu würden jedoch getrennt abgesicherte Steckdosen benötigt. Weiterhin müsste eine ausreichende Anzahl solcher Steckdosen in unmittelbarer Nähe vorhanden sein, was diese Applikation in der Kältezelle ausschließt. Dieses Konzept erweist sich zudem als unpraktikabel, da der zur Verfügung stehende Raum in der Kältezelle durch das Verlegen von bis zu fünf Stromleitungen in unterschiedliche Richtungen stark eingeschränkt würde.

Alternativ dazu kann die Stromversorgung der Heizelemente auch über einen vorhandenen 400 V Drehstromanschluss erfolgen. Unter Verwendung desselben Berechnungsweges ergeben sich so nur 13,75 A Stromstärke. Drehstromleitungen werden üblicherweise mit 16 A je Phase abgesichert und bieten so ausreichend Leistung zur Beheizung des Prüfstands. Auch eine Erweiterung der Heizleistung wäre so problemlos über den Drehstromanschluss möglich. Jedoch bedarf es zur Verwendung einer Überführung des Drehstroms in für die Heizelemente verwendbaren zweiphasigen Wechselstrom.

Es wird daher eine entsprechende Schalteinheit zum Ein- und Ausschalten der einzelnen Heizelemente mittels 10 V Steuerspannung realisiert, die über einen Anschluss an die

Drehstromsteckdose des Kältezellenbedienraums verfügt. Ausgangsseitig werden vorerst sechs Schutzkontaktsteckdosen, sichtbar in Abbildung 9-1, zum Anschluss der Heizelemente vorgesehen, da das verwendete Netzteil bis 7 kW belastbar ist. Soll die Heizung des Prüfstands um weitere Heizelemente erweitert werden, muss eine weitere Schalteinheit mit getrennter Anschlussdose verbaut werden. Links auf der Schalteinheit befindet sich der Eingang für die Steuerspannung.



Abbildung 9-1: Schalteinheit Heizungssystem

Das Innenleben der Heizungsschalteinheit stellen Abbildung 9-2 und Abbildung 9-3 dar, auf welchen die Verkabelung der Steckdosen und der Aufbau der Schaltelektronik sichtbar sind.

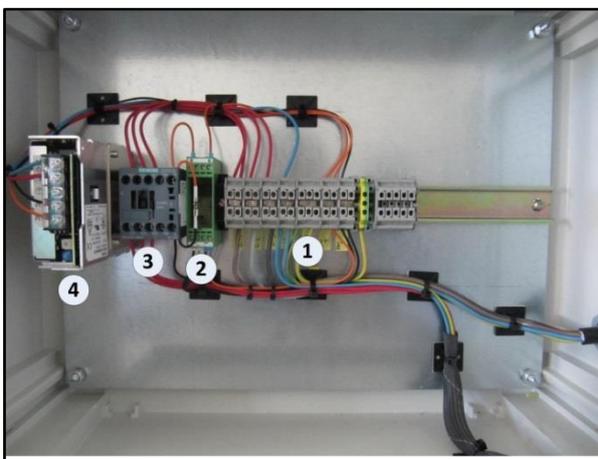


Abbildung 9-2: Übersicht Schaltkomponenten

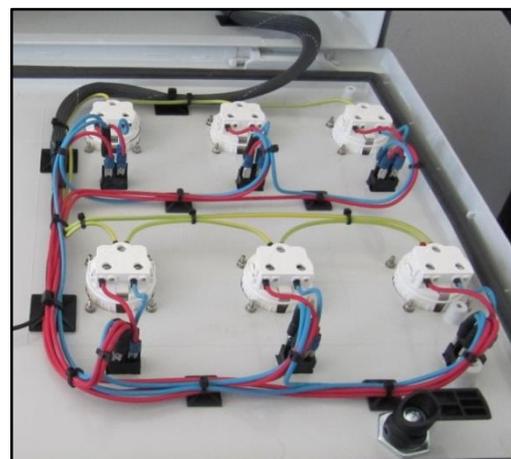


Abbildung 9-3: Verkabelung der Steckplätze

Aufgebaut sind dabei von rechts nach links auf einer Hutschiene Schraubklemmen zum Aufteilen der fünf eingehenden Leiter (①), gefolgt von einem Vorschaltrelais zum Schalten eines 24 V Lastschaltstroms (②), dem Hauptschaltrelais zum Schalten des Leistungsstroms (③) und einem 24 V Netzteil (④). Wenn über die Prüfstandssteuerung die Heizung aktiviert wird, liegen an der in Abbildung 9-1 sichtbaren BNC-Buchse (⑤) 10 V Steuerspannung an.

Diese Steuerspannung wird auf das Vorschaltrelais geleitet, schaltet dort den 24 V Hauptschaltstrom aus dem Netzteil frei, welcher wiederum den Leistungsstrom über das Hauptschaltrelais freigibt. Das über Zwischenstationen aufgebaute Schaltverhalten ist notwendig, da eine Leistung von bis zu 6,6 kW bei gleichzeitigem Betrieb aller Heizelemente nicht über den nahezu stromlosen 10 V Analogausgang der National Instruments Hardware geschaltet werden kann.

Da bei falscher Verwendung von Drehstrom oder fehlerhaftem Aufbau der Schalteinheit Lebensgefahr besteht, wird diese Komponente von der Abteilung für Prüfstandselektronik / Prüfstandselektrik angefertigt und entspricht so den Sicherheitsbestimmungen der MAN.

9.2 Anschluss der Wasserpumpe

Die Stromversorgung des Elektromotors zum Antrieb der Wasserpumpe erfolgt über den bereits beschriebenen Frequenzumrichter, der mittels Frequenzvariation die Motordrehzahl vom Stillstand bis zum Maximalwert variiert. Entsprechende Geräte sind immer für den Einbau in einen Schaltschrank vorgesehen und besitzen daher keine verschlossenen Anschlussklemmen für die Stromleitungen. Um den bestellten Frequenzumrichter mobil nutzen zu können, bedarf es einer Ersatzlösung, die einen sicheren und gleichzeitig effektiven Einsatz ermöglicht.

Verwendung finden soll ein mobiler Schaltschrank, in diesen wird der Frequenzumrichter (①) entsprechend den sicherheitsrelevanten Vorgaben montiert. Zum Anschluss des Umrichters an das Drehstromnetz wird ein fünfpoliges Kabel (②) mit CEE-Drehstromsteckverbinder verbaut, welches über einen Hauptschalters sowie eine Sicherung (③) mit dem Eingang des Frequenzumrichters verbunden wird.

Ausgangsseitig wird ein ebenfalls fünfpoliges, jedoch geschirmtes Kabel (④) eingesetzt. So wird die elektromagnetische Verträglichkeit des RDS-Prüfstands gewährleistet. Beim Einsatz von frequenzmoduliertem Strom ist ein Einfluss auf umliegende Sensoren in der Kältezelle sonst nicht sichergestellt. Angelehnt an das Konzept, den PST gleichzeitig mit anderen Versuchsobjekten in der Kältezelle betreiben zu können, ist dieser Faktor von entscheidender Bedeutung. Zur einfachen Trennung der Verbindung zwischen Umrichter und Elektromotor wird ein Harting-Stecker (⑤) verbaut, dessen Anschlussbuchse in der Schaltschrankwand verschraubt (⑥) ist. Der benötigte Sollwerteingang wird durch zwei Eingänge (⑦) realisiert, die auf die entsprechenden Pins des FUs geführt werden.

Um die vom Umrichter abgegebene Wärme aus dem Gehäuse abzuführen, ist zudem ein Lüfter (⑧) im Gehäuseboden verbaut, der über das eingesetzte 24 V Netzteil (⑨) betrieben

wird. Das zum FU gehörende Bedienpanel (⑩) wird in der Schaltschrankwand montiert und kann von außen erreicht werden. Über einen Wahlschalter (③) kann der Motor der Pumpe eingeschaltet werden.

Der beschriebene Aufbau ermöglicht die Aufstellung des Schaltschranks im Bediengang der Kältezelle, der Harting-Stecker kann nach Aufbau der Pumpe in der Kältezelle durch die vorhandene Schleuse gereicht und mit dem Schaltschrank verbunden werden.

Abbildung 9-4 und 9-5 zeigen das Bedienpanel sowie den Schaltungsaufbau des mobilen Schaltschranks.



Abbildung 9-4: Schaltschrank Bedienpanel

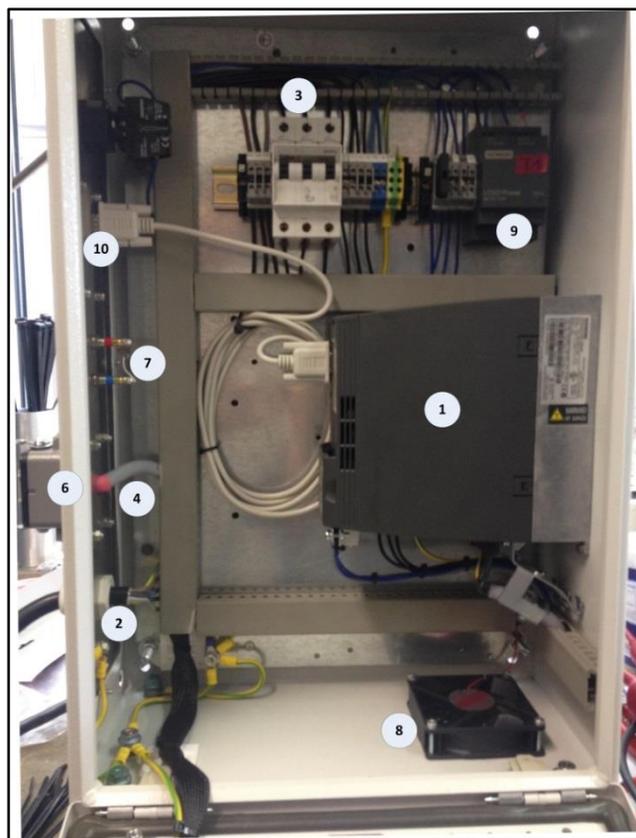


Abbildung 9-5: Schaltschrank Innenansicht

10 Arbeitspaket Mess- und Steuerungssystem

10.1 Software und Programmierumgebung

Um den Prüfstand automatisieren, die Messgrößen erfassen und speichern und vor allem die verschiedenen Bedieneingaben von zentraler Stelle aus durchführen zu können, bedarf es einer möglichst frei programmierbaren Mess- und Steuerungsumgebung, in der ein Interface für den Prüfstand erzeugt werden kann oder einer geeigneten Programmierumgebung. Ein entscheidendes Kriterium ist zudem die Kompatibilität mit geeigneter und wirtschaftlicher wie mobiler Hardware.

Typische dem Anwendungsgebiet entsprechende Programmierumgebungen sind Mathworks „Matlab“ mit der Integrationsoberfläche „Simulink“ und National Instruments „LabView“. Außerdem stehen fertig entwickelte Softwarelösungen von Anbietern vollständiger Prüfstände wie AVL oder Kratzer zur Verfügung, deren Umfang und Kosten den Bedarf an dieser Stelle jedoch weit überschreiten.

Um vorhandene Ressourcen zu nutzen, fällt die Entscheidung auf eine bereits in der MAN vorhandene „LabView Developers Suite“ Lizenz. Sie liegt als Float-Lizenz vor, worunter man eine von mehreren Nutzern geteilte Lizenz versteht, die in dieser Form nur während des Prüfstandsbetriebes und der Entwicklungszeit der Software belegt wird. Somit wird nicht nur eine bereits vorhandene Lösung eingesetzt, sondern ebenfalls eine höhere Auslastung der vorhandenen Lizenz erreicht.

LabView enthält in der vorliegenden Version zudem das Regler-Erweiterungspaket zur späteren Integration von P-, I-, D- oder kombinierten PID-Reglern in die Steuerungs- und Erfassungssoftware für den RDS-Prüfstand. Das Reglerpaket bietet so eine verhältnismäßig einfache Möglichkeit zur späteren Realisierung einer Volumenstromregelung über die Sollwertvorgabe aus der Software und der Messgröße aus der in den Wasserkreislauf integrierten Volumenstrommessuhr, sowie einer Automatisierung der Heizung über den Vergleich der erfassten und der vorgegebenen Wassertemperatur und einer dadurch gesteuerten Zu- und Abschaltung der Heizelemente. Das Ziel der Verwendung von externen Stufentabellen zur Sollwertvorgabe kann auf diese Weise erreicht werden.

vgl. [3], [16]

10.2 Hardware

10.2.1 Input-Output-Modul

Da der Hersteller der gewählten Software, National Instruments, Hardwarekomponenten anbietet, die zur Kommunikation mit LabView konzipiert sind, wird ein Angebot über eine solche Hardware angefordert.

Benötigt werden hardwareseitig Analogkanäle für Ein- und Ausgang von Signalen im Bereich von -10 bis +10 V. Diese Steuer- und Signalspannung stellt eine allgemein akzeptierte Größe unter Herstellern verschiedener Komponenten dar, auch der zur Prüfstandpumpe bestellte FU besitzt einen entsprechenden Eingang zur Sollwertvorgabe.

Auch die prüfstandsseitige Messtechnik wie Druckaufnehmer, Volumenstrommessuhr und Temperaturfühler können so angeschlossen und die Signale in der Software erfasst, verarbeitet und ausgegeben werden. Dabei arbeitet die Hardware von National Instruments als Digital/Analog-Wandler zwischen der Software und den spannungsgesteuerten Prüfstandskomponenten. Mittels eines ebenfalls erhältlichen Digitaleingangs können zudem beliebige Signale aus dem Motorprüfstand der Kältezelle übernommen werden. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel die Umgebungstemperatur der Kältezelle oder mittels Temperaturelement am Harnstofftank gemessene Temperaturen an die Erfassung des Dosiersystemprüfstands weitergeben.

Es können folgende Anforderungen an die zu beschaffende Hardware präzisiert werden:

- mind. 4 Analogeingänge -10 bis +10 V
- mind. 4 Analogausgänge -10 bis +10 V
- mind. 1 Digitaleingang
- mind. 4 Eingänge für Thermoelemente
- Anbindung über USB 2.0 Schnittstelle

Die Entscheidung fällt auf ein modular aufgebautes Input-Output-Modul mit der Bezeichnung „Compact DAQ“. Dabei handelt es sich um ein Chassis mit vier Einsteckplätzen für Signalverarbeitungskarten. Die endgültige Konfiguration kann dabei frei gewählt werden, ebenfalls ist ein Wechsel der Module möglich, um so einen größeren Einsatzbereich zu ermöglichen. Zum Einsatz mit dem RDS-PST werden folgende Module ausgewählt:

- NI 9201, Analogeingangsmodul, 8 Kanäle, -10 bis +10 V
- NI 9263, Analogausgangsmodul, 4 Kanäle, -10 bis +10 V
- NI 9421, Digitaleingangsmodul, 8 Kanäle, 24 V

- NI 9211, Thermoelementeingangsmodule, 4 Kanäle, Typ J, K

Das Chassis besitzt einen Analog-Digital-Wandler und einen internen Messwertepuffer und kann daher über eine softwareseitig vorgegebene Taktrate gesteuert werden, die Kommunikation mit dem Prüfstands-PC erfolgt über eine USB 2.0 Schnittstelle auf Basis eines mitgelieferten Treiberpaketes. Abbildung 10-1 zeigt das mit Modulen bestückte Chassis.



Abbildung 10-1: I/O Modul

10.2.2 Prüfstands-PC

Basierend auf der Annahme, dass der Prüfstand nur gelegentlich zur Validierung neuer Dosiersysteme Anwendung findet, fällt die Entscheidung auf einen der Abteilung zur Verfügung stehenden Laptop der Firma Lenovo. Es handelt sich dabei um ein Lenovo ThinkPad X230 mit Intel i5 Prozessor und ausreichender Leistung sowie Arbeitsspeicher um den Prüfstand in Echtzeit zu betreiben. Während der Prüfstand eingelagert ist, kann dieser Computer abteilungsintern weiterhin anderweitig eingesetzt werden. Analog zur LabView Float-Lizenz werden so vorhandene Ressourcen genutzt und keine weiteren Anschaffungskosten generiert.

11 Prüfstandssoftware

11.1 Benutzeroberfläche

Unter Verwendung der beschafften I/O-Hardware wird auf Basis der graphischen Programmierumgebung LabView ein „virtuelles Instrument“ zur Bedienung des Prüfstands entwickelt. Es handelt sich um eine Softwareapplikation, die im Betrieb die Überwachung und Steuerung aller für den Prüfstand relevanten Funktionen übernehmen und eine Messerfassung ermöglichen soll. Die Bedienoberfläche wird auf den Namen „Flo-Motion“ getauft, die erste lauffähige Version trägt die Nummer 1.0 und ist zur Inbetriebnahme und zu Testzwecken geeignet, der im Folgenden beschriebene Entwicklungsstand stellt bereits die um eine Volumenstrom- und Heizungsregelung sowie einen automatischen Prüflaufmodus erweiterte Version 2.0 dar.

Die zur Interaktion mit dem Benutzer gestaltete Oberfläche zeigt die Abbildung 11-1, zur besseren Übersicht befindet sich eine vergrößerte Darstellung im Anhang C auf Seite VII.

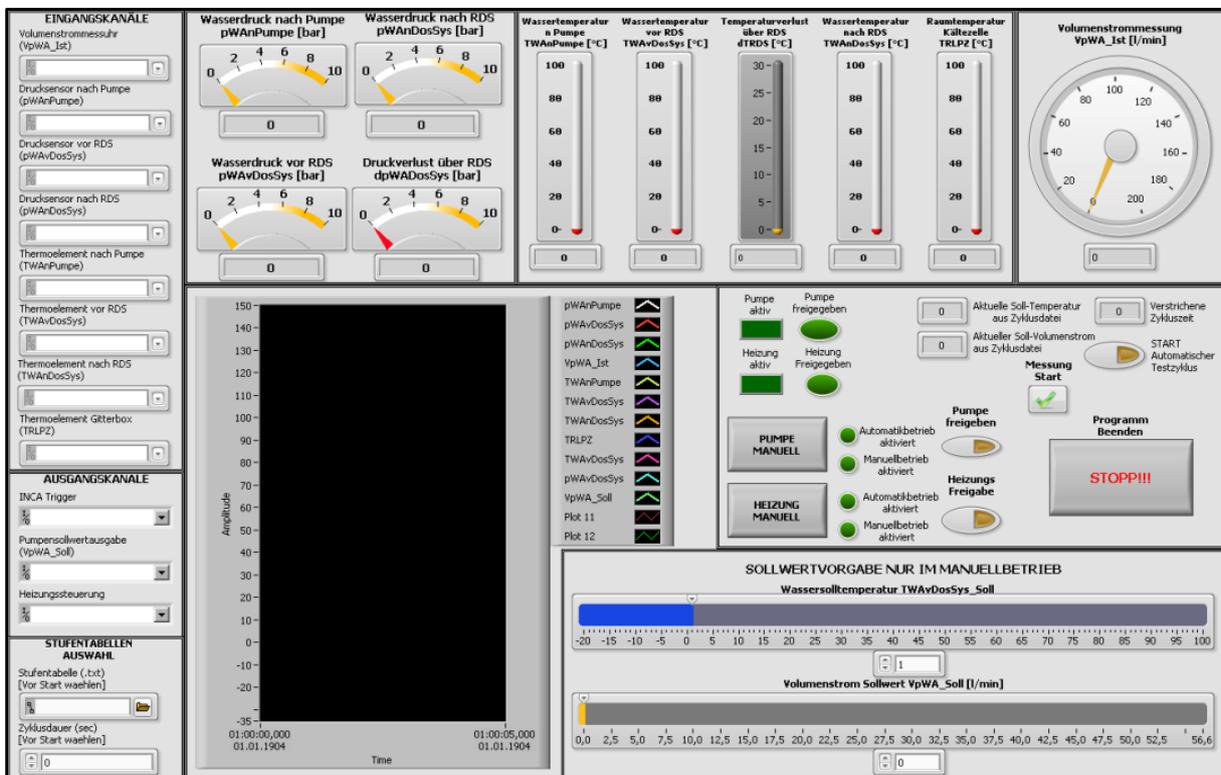


Abbildung 11-1: Bedienpanel Flo-Motion 2.0

Das sogenannte Frontpanel der Bedienapplikation besteht aus einem Signalverlaufsgraphen, verschiedenen Anzeigeelementen zur Darstellung der aktuellen Messgrößen, Schieberegler zur Sollwertvorgabe, Schaltern zur Funktions- und Moduswahl und Optionsfenstern zur Kanaluweisung.

Zur Ansteuerung des FUs und damit zur Einflussnahme auf den Elektromotor der Wasserpumpe dient der am unteren Rand platzierte Schieberegler „Wasservolumenstrom VpWA_Soll [l/min]“ über den Werte von 0 bis 56,6 l/min vorgegeben werden können. Um bei Programmstart nicht versehentlich einen hohen Pumpstrom anzufordern, muss die Pumpe über den Schalter „Pumpe freigeben“ aktiviert werden, erst dann ist die Sollwertvorgabe mittels Schieberegler möglich. Weiterhin ist die manuelle Sollwertvorgabe nur aktiv, wenn über den Auswahlswitcher „Pumpe manuell/Pumpe automatisch“ der manuelle Pumpenbetrieb gewählt ist.

Bei automatischem Betrieb unter Verwendung einer vorgegebenen Stufentabelle liest die Bediensoftware die enthaltenen Sollwerte sekundlich aus der vorher definierten Prüflaufdatei.

Die Sollwertvorgabe über den Schieberegler für die Wassertemperatur „Wassertemperatur TWA_VosSys_Soll [l/min]“ ist analog zur Sollwertvorgabe für den Volumenstrom aufgebaut, ebenfalls identisch ist die Umschaltfunktion in den automatischen Betrieb gestaltet.

Um dem Benutzer jederzeit eine Rückmeldung über den aktuellen Betriebsmodus des Prüfstands zur Verfügung zu stellen, visualisieren Kontrollleuchten die aktuell gewählte Konfiguration für Pumpe und Heizung.

Alle Temperaturen sowie der direkt in der Software berechnete Wärmeverlust über das zu vermessende RDS werden auf den als Thermometer gestalteten Anzeigen aufbereitet. Eine Generierung der Differenzwerte in der Bedienapplikation bietet den Vorteil einer direkten Zurverfügungstellung weiterer Informationen während des Prüfstandbetriebs und der Ergebnisbereitstellung im abgespeicherten Testresultat. Im Nachgang der Messung ist so kein weiterer Arbeitsschritt zur Erlangung wichtiger Aussagen notwendig.

Dieses Prinzip der Kanalaufbereitung findet erneut für die Druckmessung Verwendung, es wird wie bereits beschrieben softwareseitig der Druckverlust über das RDS aus Vorlauf- und Rücklaufdruck berechnet und durch ein Anzeigeelement dargestellt. Dieses unterscheidet sich von den Anzeigeelementen der Druckmessung durch den rot eingefärbten Zeiger.

Die Visualisierung des gemessenen Volumenstroms „VpWA_Ist [l/min]“ findet unter Verwendung einer verhältnismäßig großen Anzeigeeinheit statt, da es sich bei dieser Größe um den zentralen Prüfstandsparameter handelt.

Durch Betätigung des Schalters für die Messerfassung oder durch Start eines automatischen Prüflaufes, beginnt die Messerfassung. Dabei werden die Werte aller Eingangs- und Ausgangsgrößen mit einer Abtastfrequenz von 1 Hz geschrieben und zusammen mit einem

Zeitstempel in einer Excel-Datei abgespeichert. Mit dem Start einer Messung wird zudem eine Trigger-Spannung auf einen vorher zu wählenden Ausgang gegeben. Das zeitsynchrone Verwenden weiterer, externer Messtechnik wird auf diese Weise ermöglicht.

Der mittig platzierte Signalverlaufsgraph dient der Übersicht über den Verlauf aller Größen, aufgetragen über der Zeit seit dem Start des Prüfstands.

vgl. [3], [16]

11.2 Programmstruktur

Die Programmierumgebung LabView erlaubt das Erstellen von Applikationen durch das Einsetzen und „Verdrahten“ von Funktionsblöcken während im Hintergrund automatisiert der Quellcode für die Software erzeugt wird. In diesem Kapitel wird die Funktionsweise der Software grundlegend erläutert, neben den gezeigten Ausschnitten steht zur Verbesserung der Übersicht das Blockschaltbild in allen Stati der Software im Anhang D-1 und D-2 ab Seite VIII zur Verfügung.

Die Abbildung 11-2 zeigt die Programmstruktur der Bedienoberfläche „Flo-Motion“ in der Version 2.0, mit der aus einer While-Schleife bestehenden Zentralfunktion sowie den außerhalb dieser angeordneten Initialisierungsabläufen.

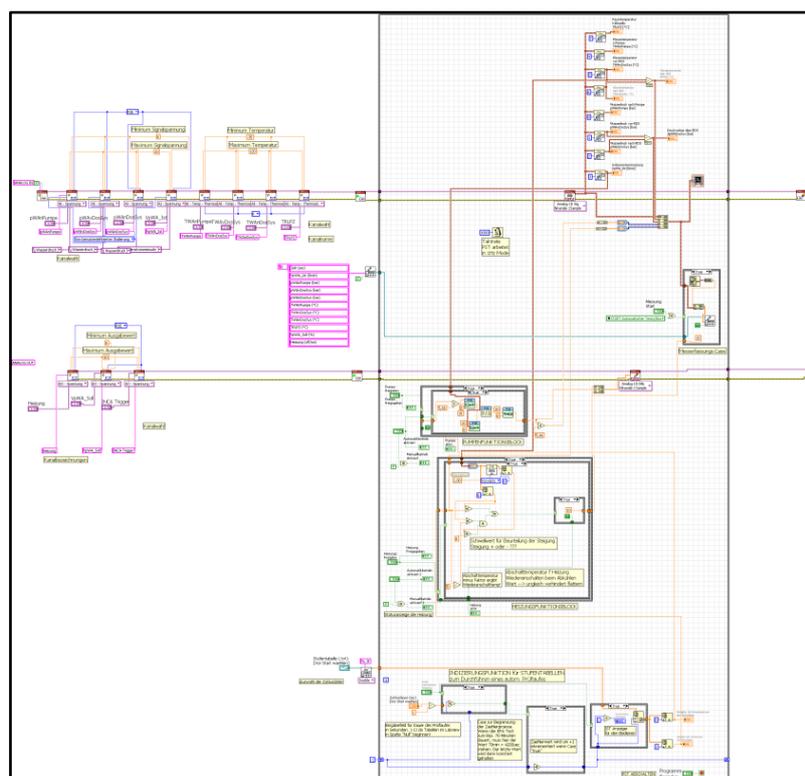


Abbildung 11-2: Blockdiagrammüberblick Flo-Motion 2.0

Vor Eintritt in die Endlosfunktion werden die außerhalb der While-Schleife angeordneten Funktionsblöcke einmalig abgearbeitet. Neben der Initialisierung der Ein- und Ausgangskanäle werden direkt nach dem Programmstart die Messergebnisdatei erzeugt und die Kanalnamen in diese geschrieben sowie die gewählte Stufentabelle für den automatischen Prüflauf ausgelesen. Alle Konfigurationen verbleiben bis zum Abbruch der sich anschließenden While-Schleife im Speicher.

In den Abbildungen 11-3 bis 11-6 sind die vorbereitenden Setup- und Initialisierungsfunktionen zu erkennen.

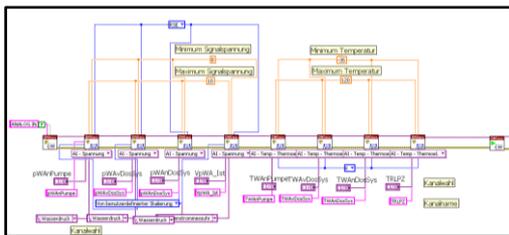


Abbildung 11-3: Eingangskanalsetup

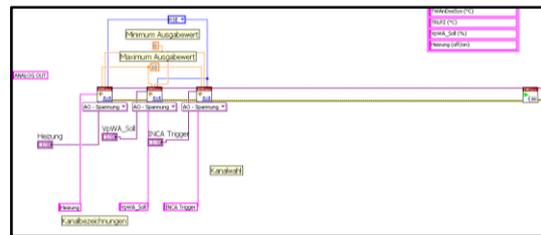


Abbildung 11-4: Ausgabekanalsetup

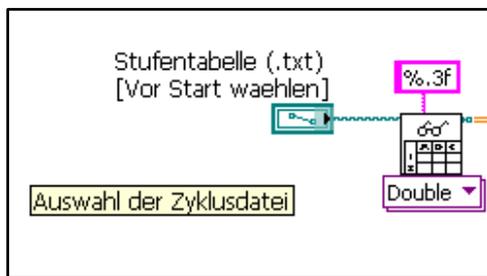


Abbildung 11-5: Zyklusdatei auswählen

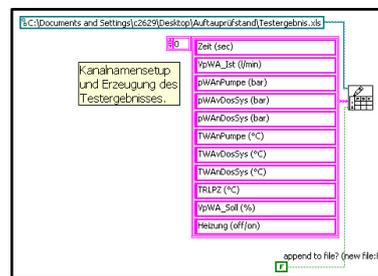


Abbildung 11-6: Testergebnisdatei erzeugen

Während des Ablaufes der aus einer While-Schleife bestehende Zentralstruktur werden die darin befindlichen Funktionsblöcke mit der vorgegebenen Taktrate kontinuierlich wiederholt, was durch den „Programm beenden“-Schalter gestoppt werden kann. Dieser schleifenbasierte Aufbau der Bediensoftware erlaubt einen dauerhaften PST-Betrieb und eine zeitlich unbegrenzte Messwerterfassung.

Der in Abbildung 11-7 zu sehende, in einer Case-Struktur applizierte Funktionsblock „Datei wird gespeichert“ erfasst die gebündelten Eingangs- und Ausgangsgrößen und speichert diese in die bereits erzeugte Testergebnis-Datei. Die Case-Schleife wird dabei entweder durch den Schalter „Messfassung“ oder die Referenzvariable des Schalters für die Prüflaufautomatik geschaltet und bleibt im Modus „false“ ohne Funktion. Die Bilder 11-7 und 11-8 stellen beide Zustände der Schleife dar.

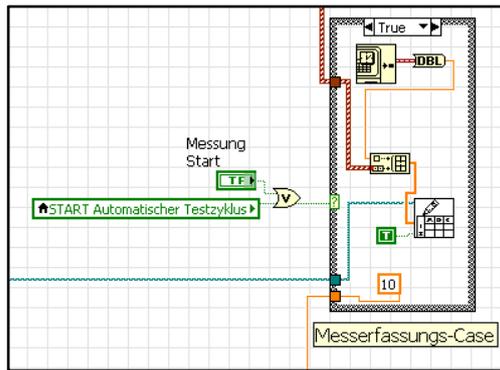


Abbildung 11-7: Messerfassung aktiviert

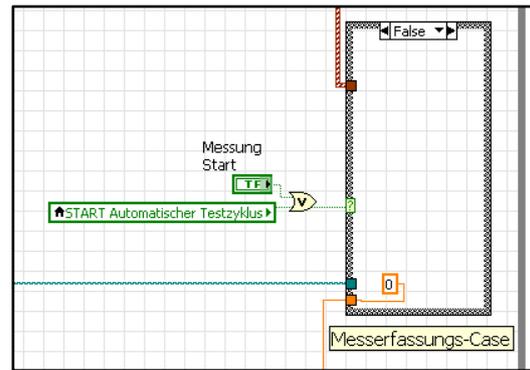


Abbildung 11-8: Messerfassung deaktiviert

Weiterhin sind die Ausgabewerte für die Triggerfunktion zu erkennen. Ist die Messerfassung inaktiv, liegen permanent 0 V am zugewiesenen Ausgang an, bei einer Aktivierung werden 10 V ausgegeben. Dadurch besteht die Möglichkeit externe Messtechnik wie zum Beispiel INCA oder Vector Canalyzer zu aktivieren, was die Verwendung zusätzlicher Temperaturmessstellen oder das Aufnehmen von RDS-Steuerungsparametern über den CAN-Bus erlaubt.

Auf diese Weise lässt sich der Prüfstand betreiben ohne die Signale permanent zu speichern, erst wenn der Schalter betätigt wird, erfolgt die Freigabe des Funktionsblockes und damit der Beginn der Aufzeichnung.

Ähnlich strukturiert sind die Freigaben für die Wasserpumpe sowie die Aktivierung der Heizungseinheit. Der erneute Einsatz von Case-Strukturen erlaubt das schaltergesteuerte Umschalten zwischen den Sperrwerten „0“ und der manuellen oder automatischen Sollwertvorgabe. Für beide äußeren Case-Strukturen sind die Zustände „true“ und „false“ in den Abbildungen 11-9 bis 11-12 dargestellt.

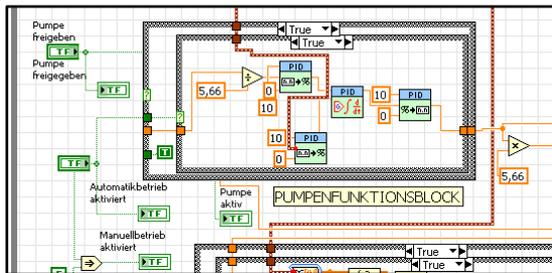


Abbildung 11-9: Pumpe aktiviert

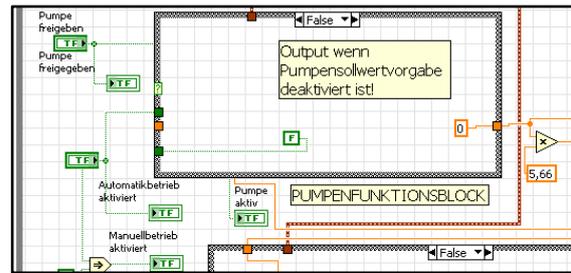


Abbildung 11-10: Pumpe deaktiviert

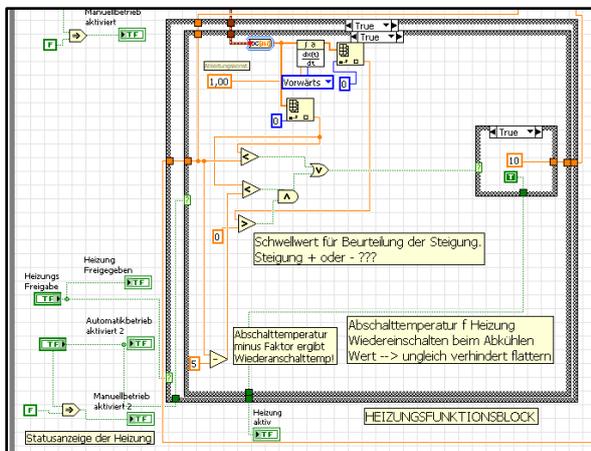


Abbildung 11-11: Heizung aktiviert

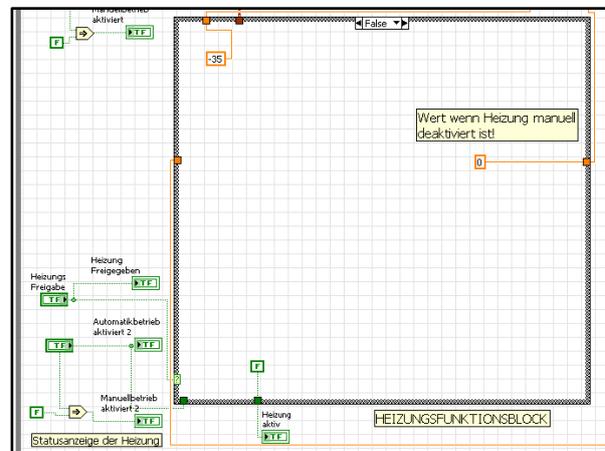


Abbildung 11-12: Heizung deaktiviert

Beide Schaltungsfunktionen weisen innerhalb der äußeren Case-Struktur zudem eine zweite, gleichartige Struktur auf. Diese, aufgrund ihres identischen Aufbaus nicht explizit abgebildeten Zustände, unterscheiden sich lediglich durch die Art der Sollwertvorgabe. In den Abbildungen 11-9 und 11-11 ist jeweils der Strukturzustand bei aktiviertem Automatikbetrieb zu erkennen, am linken Rand wird der aus der Tabelle gelesene Sollwert in die Funktion hineingeführt. Im manuellen Betrieb erfolgt die Sollwertvorgabe über die in diesem Fall in der entsprechenden Struktur befindlichen Schieberegler.

Die von der Software selbstständig durchgeführte Anpassung des gemessenen Ist-Volumenstroms an den Sollwert erfolgt auf Basis einer PID-Regelstrecke, die in LabView bereits funktionsbereit vorhanden ist. Dabei werden Soll- und Istwert durch entsprechende Umrechnungsblöcke in Prozent und der ebenfalls prozentual vorliegende Ausgabewert wieder in l/min umgewandelt. Die Reglerparameter für die einzelnen Anteilverstärkungen sind während der Inbetriebnahme des PST noch genau zu ermitteln.

In den Funktionsblock der Heizungsschaltung ist eine logikbasierte Zweipunktregelung integriert, welche durch einen Soll-/Istwert-Vergleich über das Einschalten der Heizung entscheidet. Dabei ist die Wassersolltemperatur als Abschaltsschwelle definiert, die Wiedereinschaltsschwelle ist um einen während der Inbetriebnahme zu bestimmenden Faktor geringer gewählt. Dieses Schaltverhalten schützt die in der Leistungselektrik verbauten

Relais vor Verschleiß durch permanente Schaltvorgänge bei geringen Temperaturschwankungen um die Abschaltsschwelle.

Gelöst wird diese Regelung durch die kontinuierliche Bildung der Ableitung des Verlaufes der Ist-Temperatur. In einer Logikschaltung wird das Vorzeichen dieser Ableitung ermittelt. Bei einer Steigung im negativen Wertebereich kann davon ausgegangen werden, dass die Ist-Temperatur fällt. Das Einschalten der Heizung im Bereich zwischen Ausschaltsschwelle und Wiedereinschaltsschwelle wird in diesem Fall unterbunden. Liegt die Steigung im Bereich positiver Werte, liegt eine steigende Ist-Temperatur vor, es darf bis zum Erreichen der Abschaltsschwelle geheizt werden.

Aufgrund des Heizverhaltens der in Abschnitt 8.2 gewählten Heizelemente wird zudem ein, im Zuge der Inbetriebnahme anzupassender, physikalischer Faktor benötigt, um die Abschaltung der Heizelemente vor Erreichen der Sollwerttemperatur zu realisieren. Bedingt durch das Nachheizen der Heizelemente wird der Sollwert dann trotz deaktivierter Heizung erreicht. Eine Schaltung ohne eine solche Logik würde den gewünschten Sollwert irreversibel überschreiten, der Prüfvorgang müsste abgebrochen und nach Abkühlen des Wassers erneut begonnen werden.

Abbildung 11-13 und 11-14 zeigen die Zustände der Automatikfunktion. Diese liest unter Verwendung eines Zählers die in der eingelesenen Tabelle enthaltenen Sollwerte für Volumenstrom und Wassertemperatur und verteilt sie auf die bereits beschriebenen Eingänge der zugehörigen Schaltungsfunktionen. Bei aktivierter Automatik wird der Zähler durch eine Inkrementierungsfunktion sekundlich erhöht und dadurch der jeweils nächste Wert aus der Tabelle gelesen. Ist der letzte Tabellenwert erreicht, wird dieser konstant gehalten, der Benutzer kann den Prüfstand wieder in den manuellen Betrieb umschalten.

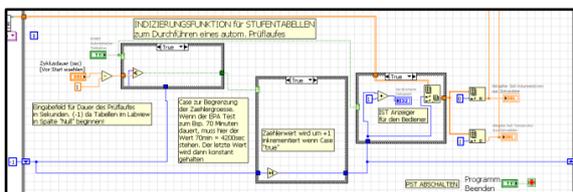


Abbildung 11-13: Automatikmodus aktiviert

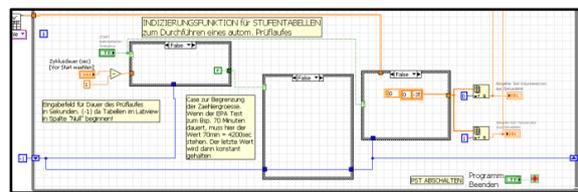


Abbildung 11-14: Automatikmodus deaktiviert

Die Darstellung der aktuellen Werte auf den Anzeigeelementen des Frontpanels erfolgt durch die in Abbildung 11-15 dargestellte Funktionsstruktur. Dabei werden zudem in der Bündelfunktion am unteren rechten Rand alle Kanäle für die Messerfassung zusammengeführt und zum Signalverlaufdiagramm geleitet.

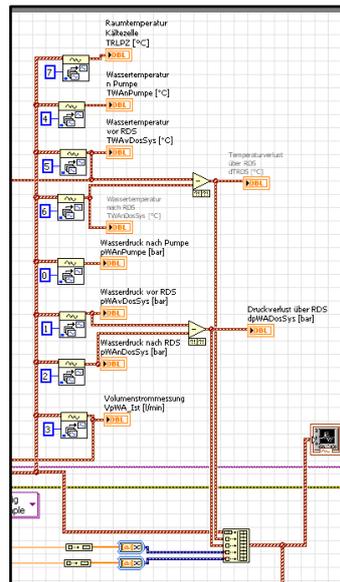


Abbildung 11-15: Signalverteilung Anzeigeelemente

vgl. [3], [16]

12 Konstruktion und Fertigung

12.1 CAD-Konstruktion

Das Auslegungskriterium der Lagerbarkeit des zu entwickelnden Prüfstands macht die Verwendung einer sogenannten, genormten Euro-Gitterbox notwendig, da alle vorhandenen Lagerplätze in Gitterboxeinheiten aufgeteilt sind. Um den Prüfstand planen und intern herstellbare Komponenten bereits vor der Lieferung der Wasserpumpe anfertigen zu können, ist eine Analyse des Raumangebotes einer Gitterbox notwendig. Die in der MAN verwendete Euro-Gitterbox ist als Grundlage für die Konstruktion des Auftauprüfstands im CAD-Tool Catia V5 R19 erstellt und in Abbildung 12-1 mit den auslegungsrelevanten Hauptmaßen sichtbar:

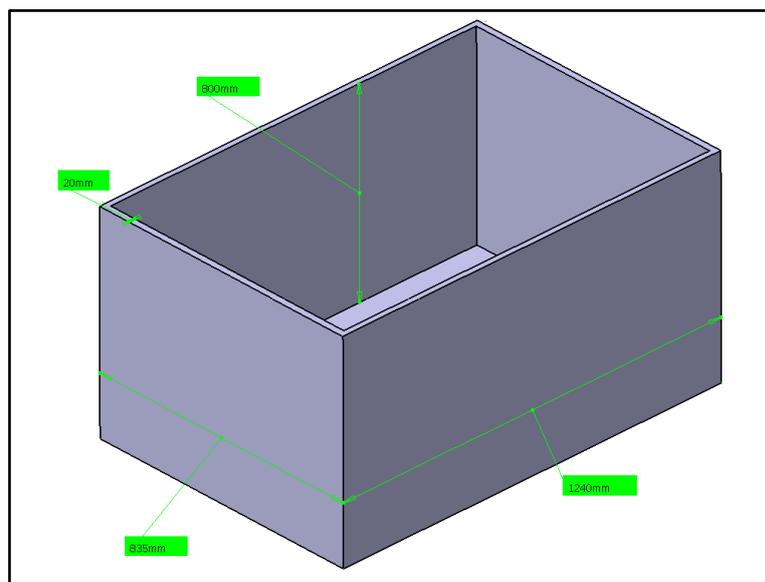


Abbildung 12-1: Gitterboxmodell mit Hauptmaßen

Zur Verfügung steht eine Maßstabszeichnung (siehe Anhang E-1, Seite X) der bestellten Pumpe auf der Grundplatte mit angeflanschem Motor, auf deren Grundlage ein Ersatzkörper mit den äußeren Abmaßen erstellt wird. Dieser Ersatzkörper enthält die Maße der Grundplatte und des Motors sowie die genaue Lage des Druck- und Sauganschlusses der Pumpe. Somit sind eine genaue Positionierung der Pumpe in der Gitterbox und eine Konstruktion der benötigten Saug- und Druckleitung möglich. Die Bereitstellung eines verwendbaren CAD-Modells durch den Lieferanten der Pumpe, Firma LEWA GmbH, ist nicht zu realisieren. Abbildung 12-2 zeigt den Pumpenersatzkörper als Platzhalter auf der Grundplatte:

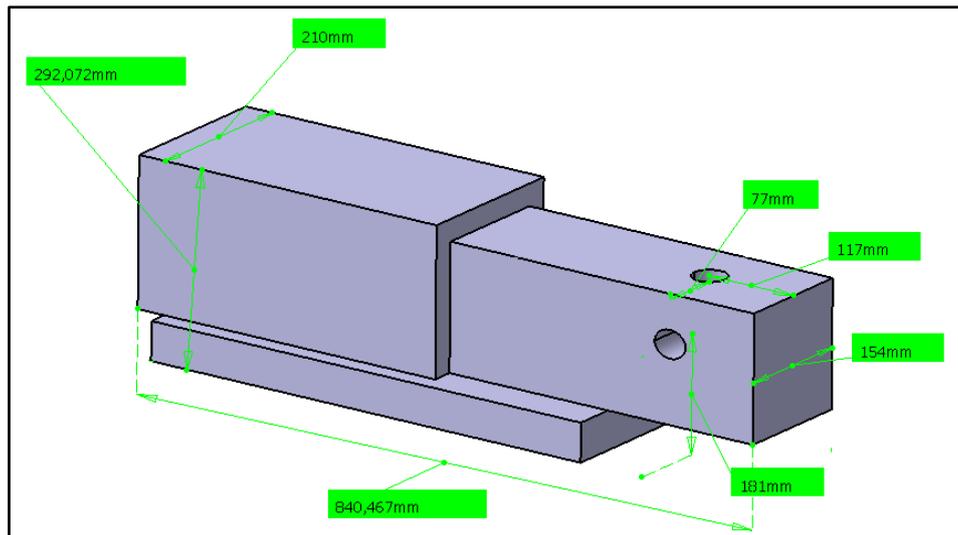


Abbildung 12-2: Pumpenersatzkörper mit Hauptmaßen

Um das Wasservolumen des Prüfstandes gering zu halten, was der einzubringenden Heizleistung entgegenkommt, wird eine möglichst kurze Leitungsführung als Auslegungskriterium definiert. Saug- und Druckleitung werden zum Rand der Gitterbox geführt und dort mit einer Verschraubung versehen, mittels derer die Montage des zu prüfenden RDS erfolgt.

Für die Druckleitung werden entsprechende Einschweißstücke konstruiert, die das Einschrauben der ausgewählten Heizelemente ermöglichen, ohne, dass Kontakt zum verwendeten Rohr entsteht. Abbildung 12-3 zeigt die Druckleitung mit Bohrungen für die Heizelemente, Abbildung 12-4 die Druckleitung mit aufgesetzten Schweißstutzen und Abbildung 12-5 die Druckleitung mit Schweißstutzen und dem vorhandenen CAD-Modell des Heizelementes.

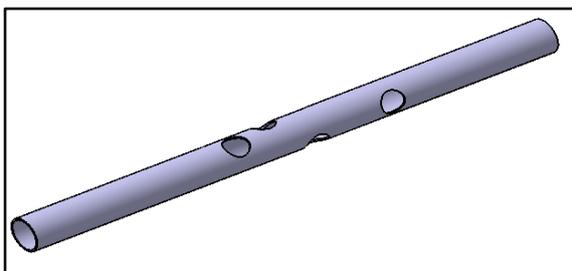


Abbildung 12-3: Druckleitung mit Bohrungen

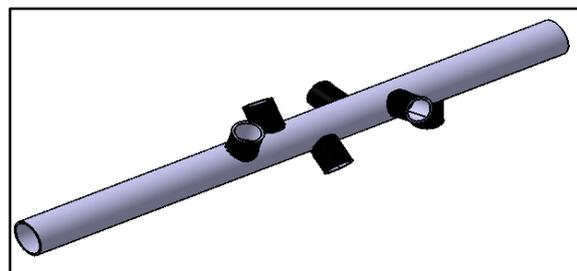


Abbildung 12-4: Stutzen auf Druckleitung

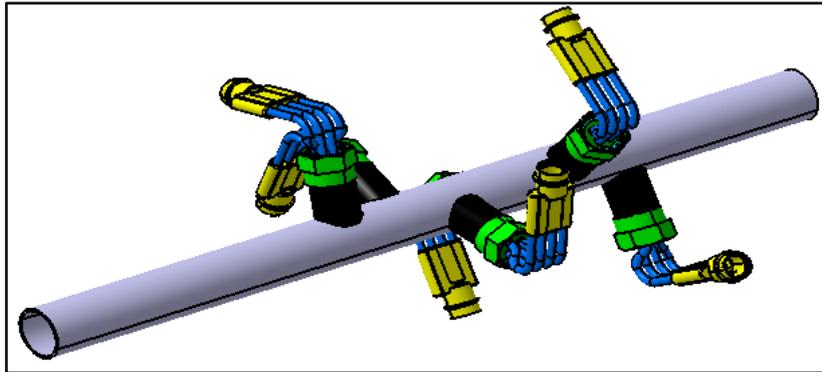


Abbildung 12-5: Vollständige Druckleitung mit Heizelementen

Absichtlich werden die Schweißstutzen nicht fluchtend positioniert und ebenfalls nicht symmetrisch versetzt, da die oben gezeigte Positionsauswahl den durch die Heizelemente entstehenden Staudruck im Druckrohr möglichst gering hält. Die über 270° Rohrumfang verteilten Schweißstutzen ermöglichen zudem eine gute Benetzung der Heizstaboberfläche mit dem strömenden Wasser, die Heizelemente decken sich nicht gegenseitig ab. Im unteren Bereich der Leitung wird ein 90° Winkel ausgespart um so Platz für den Einbau der Saugleitung zu schaffen.

Die Wasseruhr zur Volumenstrommessung wird aus Platzgründen in der Saugleitung eingebaut und ist in der Konstruktion nicht dargestellt, sie wird erst später durch Edelstahlrohr, das mittels Verschraubungen montiert wird auf die benötigte Länge ergänzt werden. Mangels gekrümmter Rohrelemente und Schweißstellen kann auf eine detaillierte Analyse verzichtet werden. Zur hinreichend genauen Abschätzung des sich ergebenden Gesamtvolumens ist die dargestellte durchgehende Leitung ausreichend.

Beide Leitungen werden zusammen mit dem Ersatzkörper der Pumpe in die Gitterbox eingesetzt und lassen somit eine erste Überprüfung der Realisierbarkeit zu. Die Abbildungen 12-6, 12-9 und 12-10 zeigen, dass nach Einbau der bisher konstruierten Komponenten noch ausreichend Platz in der Gitterbox vorhanden ist. Die gewählte Leitungsführung stellt dabei einen guten Kompromiss zwischen geringem Wasservolumen und prozesstechnischer Funktionalität dar.

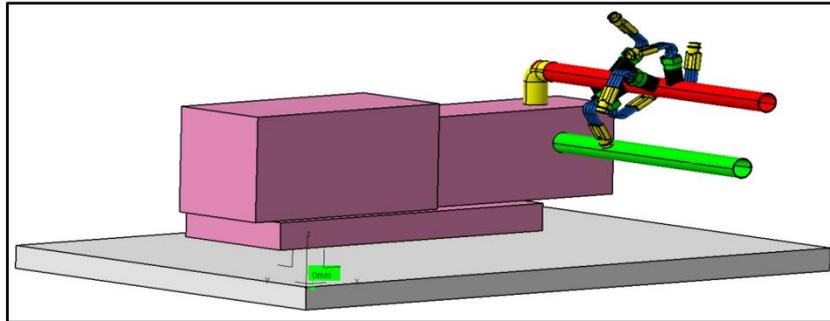


Abbildung 12-6: Pumpe mit Rohrleitungen auf Grundplatte

In der Seitenansicht wird ersichtlich, dass auch mit eingesetzten Heizelementen kein Positionskonflikt zwischen der unten liegenden Saugleitung sowie der oben an der Pumpe montierten Druckleitung mit Heizeinrichtung entsteht. Die Lage der Anschlussenden der Heizelemente ist zudem drehbar, da diese mit einem O-Ring in die Verschraubung eingesetzt sind. Bei der Montage des Prüfstands kann die Ausrichtung so gewählt werden, dass sie einer kurzen Kabelführung entgegen kommt.

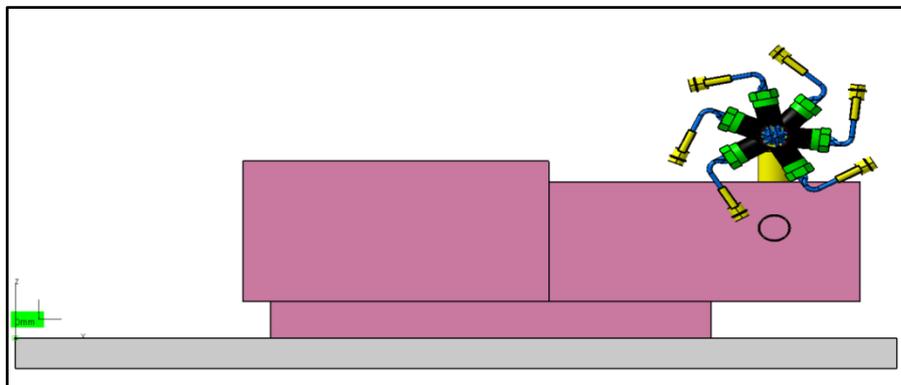


Abbildung 12-7: Frontansicht der Leitungen mit Heizelementen

Die Entlüftung des Prüfstands erfolgt mittels eines ausgemusterten LKW-Kühlwasserausgleichsbehälters mit Sachnummer 81.06102-0006, für den kein CAD-Modell mehr vorliegt. Da der Behälter nur als Platzhalter zur Festlegung der Einbauposition in der Gitterbox benötigt wird, kommt auch in diesem Fall ein Ersatzmodell zum Einsatz, das die Hauptmaße hinreichend genau widerspiegelt. Die dem Archiv der MAN entnommene Zeichnung des Ausgleichsbehälters ist im Anhang E-2 auf Seite XI einzusehen.

Auf Basis von Vierkantrohr mit 25x25 mm Außenmaßen wird ein einfacher Halter erstellt, der den Ausgleichsbehälter fixiert und als höchstes Element des Aufbaus festlegt. Mit einer in Abbildung 12-8 dargestellten maximalen Höhe von 680 mm über dem Boden der Gitterbox ist so eine gute Entlüftung der Rohrleitungen sowie ein leichter Überdruck vor dem Sauganschluss der Pumpe gewährleistet.

Der am Halter montierte Ausgleichsbehälter wird so in der Gitterbox positioniert, dass die Anschlüsse des Behälters nächstmöglich zu den Rohrleitungen liegen.

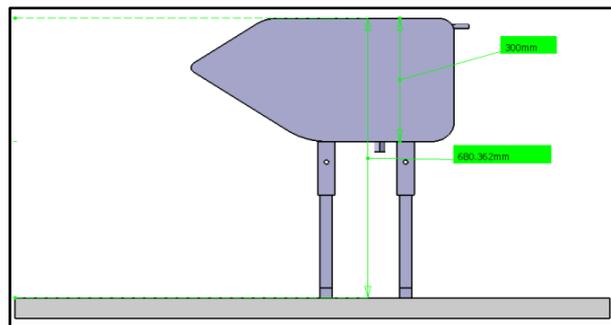


Abbildung 12-8: Ausgleichsbehälter auf Standfüßen

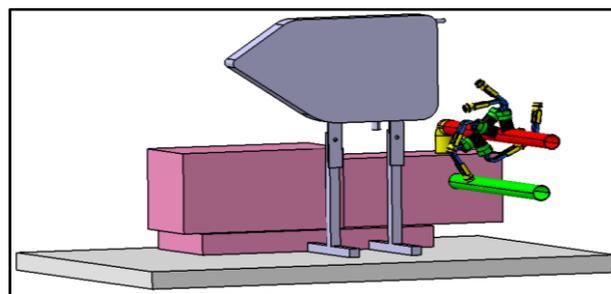


Abbildung 12-9: Übersicht der Komponenten auf Grundplatte

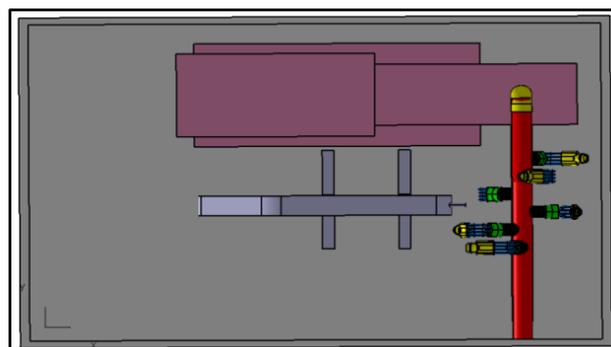


Abbildung 12-10: Gesamttraumbedarf aller Komponenten in der Gitterbox

In der Draufsicht ist zu erkennen, dass eine kompakte Anordnung der notwendigen Komponenten möglich und so ausreichend Grundfläche in der Gitterbox zum Einbau einer Mehrfachsteckdose für 12 und 24 V Steckplätze vorhanden ist, über die Druckaufnehmer und die elektrischen Komponenten des Reagensdosiersystems gespeist werden können. Eine saubere Kabelführung in die Gitterbox kann realisiert werden, so dass die verwendeten Mess-, Steuer- und Stromversorgungsleitungen nicht mit heißen Prüfstandskomponenten in Kontakt kommen.

Das Einsetzen der angedachten Druck- und Temperaturmessstellen, deren Anschlussverschraubungen ebenfalls als Schweißaufsatz in die Rohrleitung eingebracht

werden müssen, ist ein standardisierter MAN Arbeitsvorgang. Daher werden die Messstellen im 3D-Modell nicht gezeigt. Ihre exakte Lage wird zu einem späteren Zeitpunkt festgelegt und im Kapitel 13 dargestellt.

12.2 Fertigung der Druckleitung

Zur Herstellung der Druckleitung wird eine technische Bauteilzeichnung aus den erzeugten CAD-Daten abgeleitet. Diese Zeichnung im DIN-A0-Format wird als „2014_03_04_Zeichnung_Druckleitung“ gespeichert und dieser Arbeit im Anhang E-3 auf Seite XII angefügt. Der Abdruck erfolgt dabei nicht maßstabsgetreu, es wird das Papierformat DIN-A4 gewählt. Das Rohr trägt die MAN-interne Teilenummer XX.FLI00-0001.

Zusammen mit der Zeichnung wird ein Edelstahlrohr aus Werkstoff 1.4400 an den Werkzeugbau der MAN gesendet. Nach der erstellten Zeichnung werden die Bohrlöcher mit 28 mm Durchmesser gefertigt.

Die Schweißstutzen werden in der Zeichnung „2014_03_04_Zeichnung_Schweissstutzen“ gezeichnet, diese ist ebenfalls in Anhang E-4 auf Seite XIII im Papierformat DIN-A4 einzusehen, als Teilenummer wird XX.FLI00-0000 vergeben. Bei den Schweißstutzen handelt es sich um Drehteile, welche mit einem M28 x 1,5 Innengewinde versehen werden. Zur Gewährleistung eines optimalen Sitzes auf der Rohrleitung und zur Erleichterung der Schweißbarkeit, erhalten die Stutzen nach der Bearbeitung auf der Drehbank und dem Einbringen des Gewindeschnittes eine Ausfräsung mit 21 mm Radius. Dieser ermöglicht später passgenaues Aufsetzen und druckdichtes Schweißen. Üblicherweise finden als Einschraubstellen Edelstahlmutter Verwendung, da aber die Heizelemente ein Feingewinde aufweisen, wird diese Sonderanfertigung nötig. In Absprache mit dem Werkzeugbau wird als Material der vorrätig lagernde Edelstahl „X6CrNiTi18-10“ festgelegt, der eine gute Schweißbarkeit aufweist und sich daher einfach auf das vorgebohrte Edelstahlrohr aufsetzen lässt.

Die Abbildungen 12-11 und 12-12 zeigen die für das Fügen vorbereiteten Schweißstutzen, im anschließenden Bild 12-13 ist das gefügte Bauteil zu erkennen. Zur Vermeidung eines erhöhten Wärmeverlusts über die Rohrleitungen werden diese abschließend mit Dämmwolle sowie Isolierfolie umhüllt. Die fertige Leitung mit eingesetzten Heizelementen ist in Abbildung 12-14 zu erkennen.



Abbildung 12-11: Schweißstutzen stehend

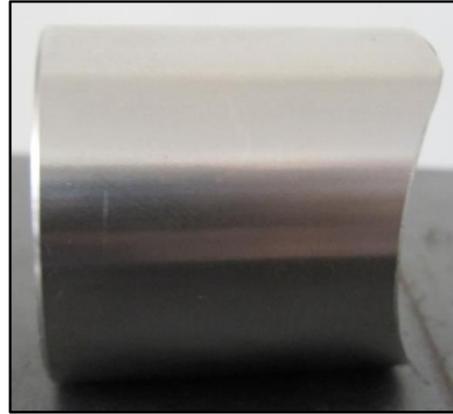


Abbildung 12-12: Schweißstutzen liegend



Abbildung 12-13: Druckleitung mit Messstellen und Einschraubstutzen



Abbildung 12-14: Wärmegeädämmte Druckleitung

12.3 Fertigung der Saugleitung

Im Falle der Saugleitung bedarf es keinem aufwändigen Fertigungsverfahren, da hier keine Heizung oder andere Komponenten vorgesehen werden müssen. Zur Montage an den Prüfstand wird ein zur Druckleitung identisches Rohrstück auf die Länge 30 mm geschnitten, am einen Ende wird per Pressverbinder eine 1,5"-Verschraubung aufgebracht, die direkt in das pumpenseitig vorhandene Innengewinde eingeschraubt werden kann, am anderen Ende wird eine M40-Innengewinde-Verschraubung aufgespresst, mit der die Wasseruhr eingeschraubt werden kann. Um den Ausgleichsbehälter an die Saugleitung anschließen zu können, wird eine Verschraubung aufgeschweißt, auf welche später die vom Behälter kommende Schlauchleitung montiert wird. Dieses, in Abbildung 12-15 zu sehende Rohrelement wird im weiteren Verlauf als Saugleitung Teil 1 bezeichnet.



Abbildung 12-15: Saugleitung Teil 1 mit Ausgleichstankanschluss

Daran schließt sich die Volumenstrommessuhr, sichtbar in Abbildung 12-16 an, die an beiden Seiten ein M40-Außengewinde aufweist und durch einen integrierten Fangkorb die Wasserpumpe vor Verunreinigungen schützt.



Abbildung 12-16: Volumenstrommessuhr

Der zweite Teil der Saugleitung besteht aus einem ähnlich aufgebauten Rohrelement, welches erneut eine M40-Innengewinde-Verschraubung zur Montage am Eintritt der Volumenstrommessuhr besitzt und eine 1 1/4"-Verschraubung am anderen Ende. Diese stellt das Übergabeterminal dar, an dem das Wasser aus dem zu prüfenden RDS wieder in die prüfstandsfest verbaute Leitung eintritt. Dieses Terminal kann mittels Reduzierverschraubungen auf den zum Anschluss des RDS benötigten Durchmesser reduziert oder erweitert werden. Zur Applikation der gewünschten Messstellen werden passende Verschraubungen zur Einbringung eines Thermoelementes sowie eines Drucksensors vorgesehen. Das Bauteil ist in Abbildung 12-17 dargestellt.

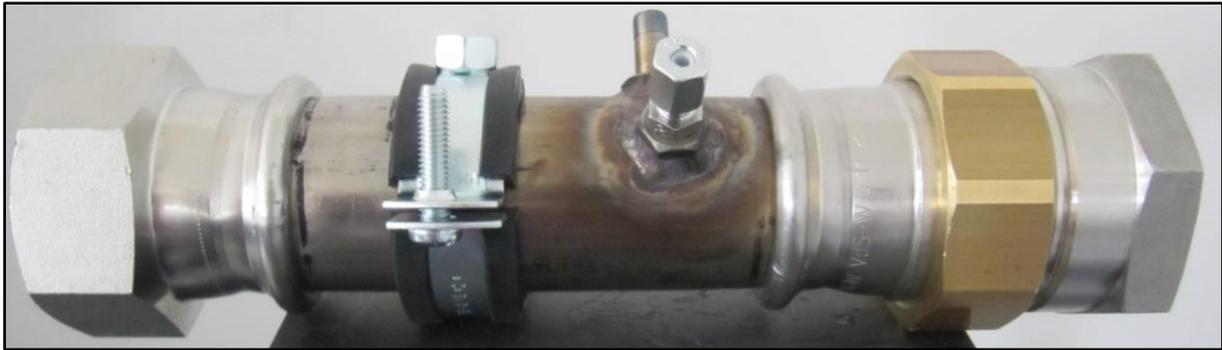


Abbildung 12-17: Saugleitung Teil 2 mit Messstellen

Die beschriebenen Komponenten werden unter Verwendung eines Dichtbandes miteinander verschraubt und ergeben die vollständige Druckleitung wie in Abbildung 12-18 zu sehen, wie bereits im Abschnitt Druckleitung beschrieben wird auch hier eine Wärmedämmung eingesetzt, das montagebereite Bauteil zeigt die Abbildung 12-19.



Abbildung 12-18: Montierte Saugleitung



Abbildung 12-19: Wärmegegedämmte Saugleitung

12.4 Weitere Komponenten

Zur gleichzeitigen Abstützung der Saug- und Druckleitung am Übergabeterminal zum Testsystem wird ein mit der Gitterboxgrundplatte zu verschraubender Ständer gefertigt. An diesen können die Leitungsrohre dann mittels Schraubschellen und Gewindestangen angebunden werden, um eine unzulässige Beanspruchung der Pumpenanschlüsse zu vermeiden. Der bereits im Kapitel 12.1 als CAD-Modell dargestellte Ausgleichsbehälter mit Standfüßen ist ebenfalls für eine Verschraubung auf dem Gitterboxboden vorgesehen. In den Abbildungen 12-20 bis 12-22 sind die Komponenten einzeln zu sehen, der exakte Aufbau folgt im Kapitel 13.



Abbildung 12-20: Leitungsständer



Abbildung 12-21: Schraubschelle

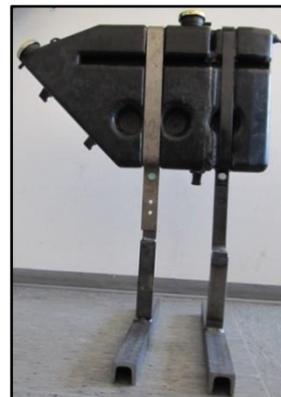


Abbildung 12-22: Ausgleichsbehälter auf Ständer

13 Montage des Prüfstands

Nach der abgeschlossenen Fertigung der einzelnen Komponenten und Sonderbauteile sowie der Anlieferung der bestellten Wasserpumpe wird der PST montiert.

Wie in den Kapiteln 4 und 12 beschrieben erfolgt der Aufbau in einer Gitterbox. Zum einfacheren Anschluss der zu prüfenden Dosiersysteme wird ein Modell mit klappbarer Frontseite gewählt, wodurch die Anschlussterminals problemlos zu bedienen sind.

Die gefertigten und vormontierten Druck- (⑩) und Saugleitungen (①) werden unter Verwendung eines Dichtbandes auf Hanf-Basis in die Anschlussverschraubungen (②) der Pumpe (③) eingesetzt und ausreichend angezogen. Um im Bereich der Heizelemente (④) eine genügende Abdichtung zu erreichen werden Kupferringe verwendet, die zwischen Heizelement und rohrfester Verschraubung aufliegen. Durch Swagelok-Rohrverschraubungen und den Einsatz von Teflonschneidringen werden die Thermoelemente (⑤) in die vorbereiteten Messstellen eingebracht. An den angedachten Druckmessstellen (⑥) wird ebenfalls mittels Swagelok-Verschraubung Teflonleitung mit 6 mm Durchmesser montiert, welche auf die Drucksensoren geführt wird.

Der Ausgleichsbehälter (⑦) wird, wie auch die Wasserpumpe, auf dem Boden der Gitterbox verschraubt. Am Zulaufanschluss wird eine Wasserleitung (⑧) mit Durchmesser 10 mm durch Schlauchschellen befestigt, die auf die vorbereitete Verschraubung an der Saugleitung geführt wird. Die eigentlich als Anschluss für die Druckmessstelle pWAnPumpe vorgesehene, in der Druckleitung befindliche Verschraubung wird vorerst als Entlüftungsbohrung verwendet, eine Wasserleitung (⑨) mit Durchmesser 10 mm wird montiert. Bei Bedarf kann später eine weitere Einschraubstelle zur Applikation der Druckmessstelle nachgerüstet werden.

Als Vorbereitung auf die folgende Inbetriebnahme werden als Anschlussterminals Reduzierschraubungen (⑩) auf 18 mm eingesetzt, die erneut mittels Hanf-Dichtband abgedichtet werden. Um den Wasserkreislauf ohne Einsatz eines RDS-Systems zu schließen, werden Saug- und Druckleitung durch Wasserleitung des oben genannten Durchmessers verbunden.

Nach Abschluss der Montagearbeiten erfolgt die vollständige Verkabelung des Prüfstands. Dabei werden die Anschlussleitungen der Heizelemente in diese eingesteckt und auf jeweils einen Steckplatz der Schalteinheit geführt. Anschließend wird der Harting-Stecker des Pumpenmotors in den FU-Schaltschrank eingesteckt und gesichert. Ein Labornetzteil

versorgt die Messtechnik mit 24 V, die Signalleitungen werden mit den entsprechenden Eingängen der I/O-Hardware verbunden.

Die folgenden Bilder 13-1 bis 13-3 zeigen den vollständigen PST-Aufbau im Überblick, sowie Detailansichten der Pumpe und des Kurzschlusses von Saug- und Druckleitung.

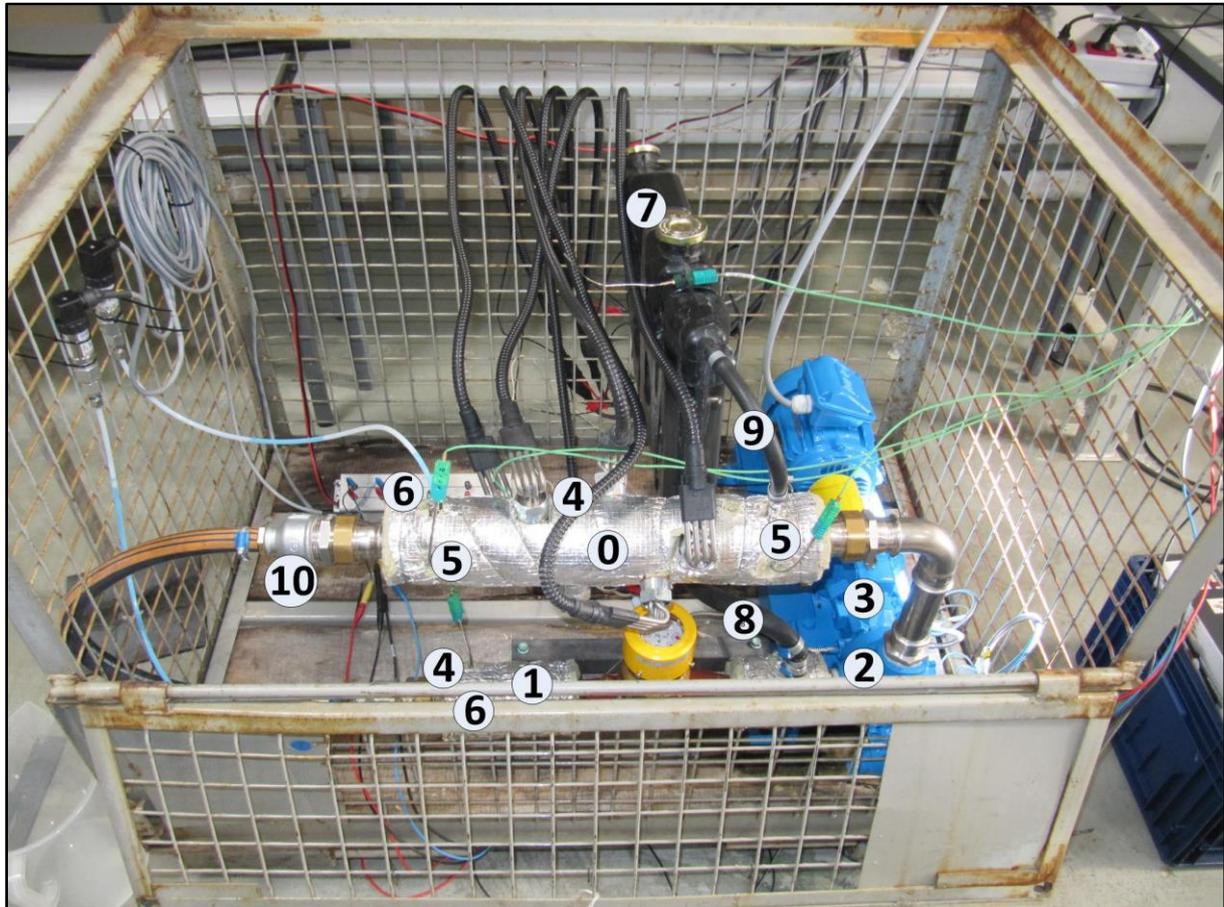


Abbildung 13-1: RDS-Prüfstand



Abbildung 13-2: RDS-Prüfstand Pumpe



Abbildung 13-3: Kurzschlussleitung

In Abbildung 13-4 ist der für die Inbetriebnahme aufgebaute Bedienplatz des RDS-Prüfstands zu erkennen. Beim Einsatz des Prüfstands in der Kältezelle, befindet sich das

abgebildete Equipment im Bedienungsgang. Es muss nur noch der Prüfstands-PC für den Bediener direkt zugänglich sein, die Schaltschränke können platzsparend angeordnet werden.

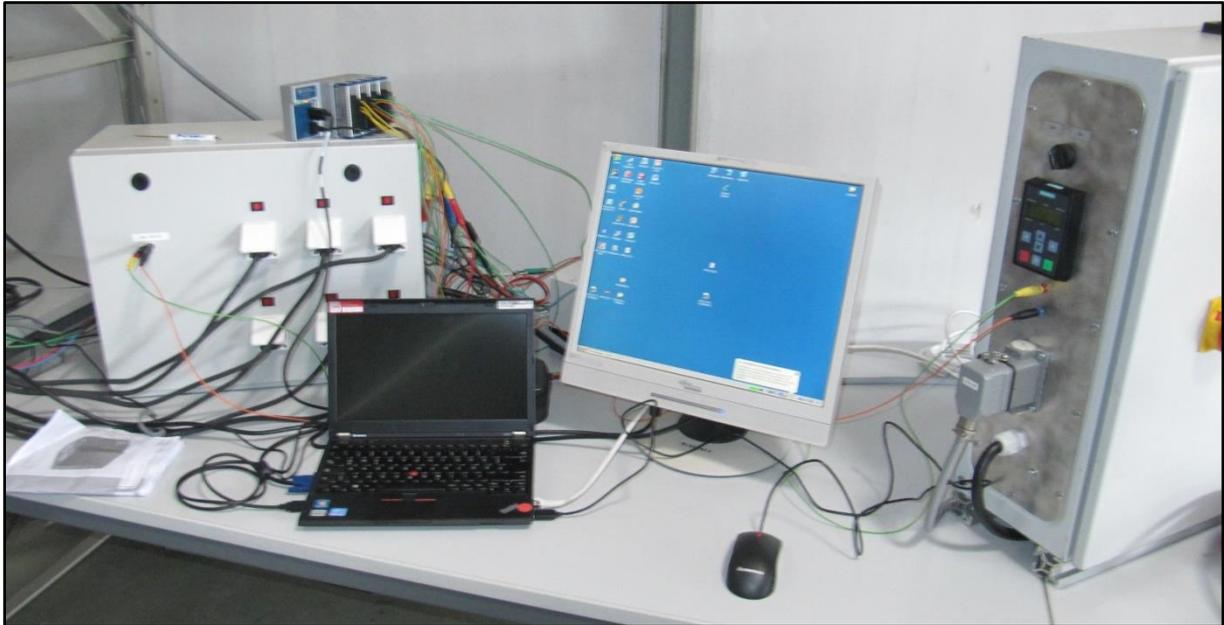


Abbildung 13-4: Bedienplatz RDS-PST

Der vorbereitete Halter zur Unterstützung der Saug- und Druckleitung wird vorerst nicht verwendet, da die Rohre ausreichen stabil sind. Für zukünftige Versuchsaufbauten verbleibt der Halter jedoch am RDS-PST und kann weiterhin genutzt werden.

14 Inbetriebnahme

14.1 Vorbereitung

Nach Abschluss der Montagearbeiten wird eine erste Inbetriebnahme des fertigen Reagensdosiersystemprüfstands durchgeführt. Schema 14-1 veranschaulicht den finalen Aufbau des Prüfstands inklusive aller prozessbeteiligten Komponenten und der verwendeten Mess- und Steuerleitungen.

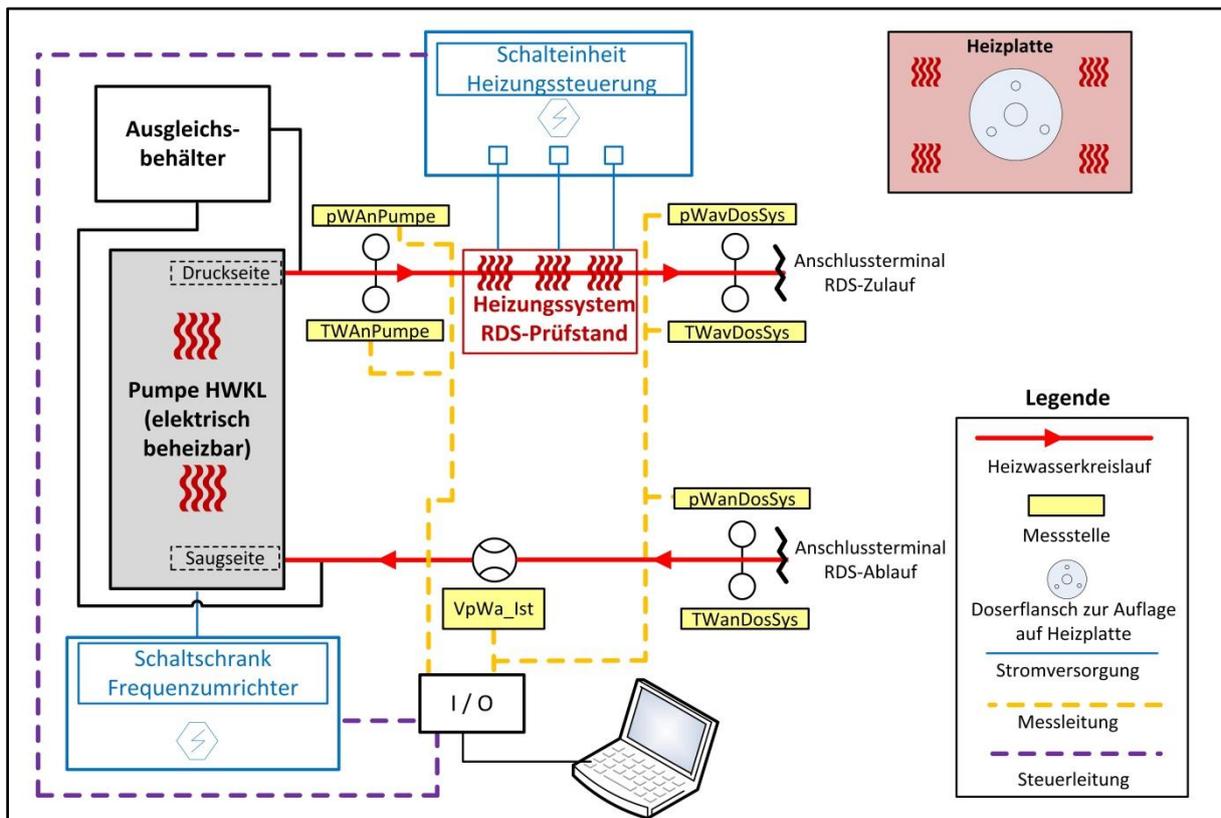


Abbildung 14-1: Funktionsschema des RDS-Prüfstands

Um während der Inbetriebnahme die gewünschte Funktionsweise überprüfen zu können, ist ein Aufbau in der Kältezelle nicht notwendig, dieser Vorgang findet daher am Montageplatz und ohne Verwendung eines RDS statt. Im Schema 14-2 ist zur Vollständigkeit der theoretische Aufbau eines RDS mit elektrisch beheizten Leitungen für den PST zu sehen, dieser erfolgt für ein RDS mit wassergeheizten Leitungen in identischer Form.

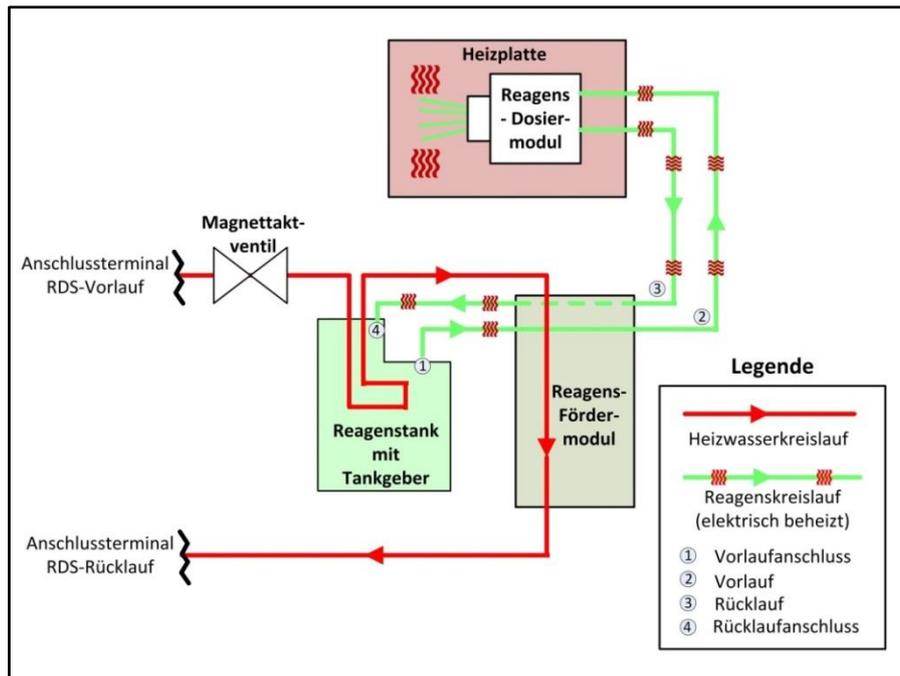


Abbildung 14-2: RDS mit elektr. beheizten Leitungen im Prüfstands Aufbau

Der Prüfstand wird mit neun Litern Wasser-Glykol-Gemisch befüllt und sorgfältig entlüftet. Zur Gewährleistung eines permanenten Überdrucks am Pumpeneintritt wird der Füllstand des Ausgleichsbehälters ausreichend hoch gewählt.

14.2 Inbetriebnahme Manueller Modus

Die elektrischen Komponenten werden mit dem Netz verbunden und eingeschaltet, der Motor der Pumpe wird über den Freigabeschalter aktiviert und es werden verschiedene Sollwerte manuell vorgegeben. Die Pumpe läuft problemlos an, die Regelabweichung des Volumenstroms, sichtbar in Abbildung 14-3, liegt jedoch permanent im Bereich von ca. 40%. Dieses Verhalten muss als unzureichend bewertet werden.

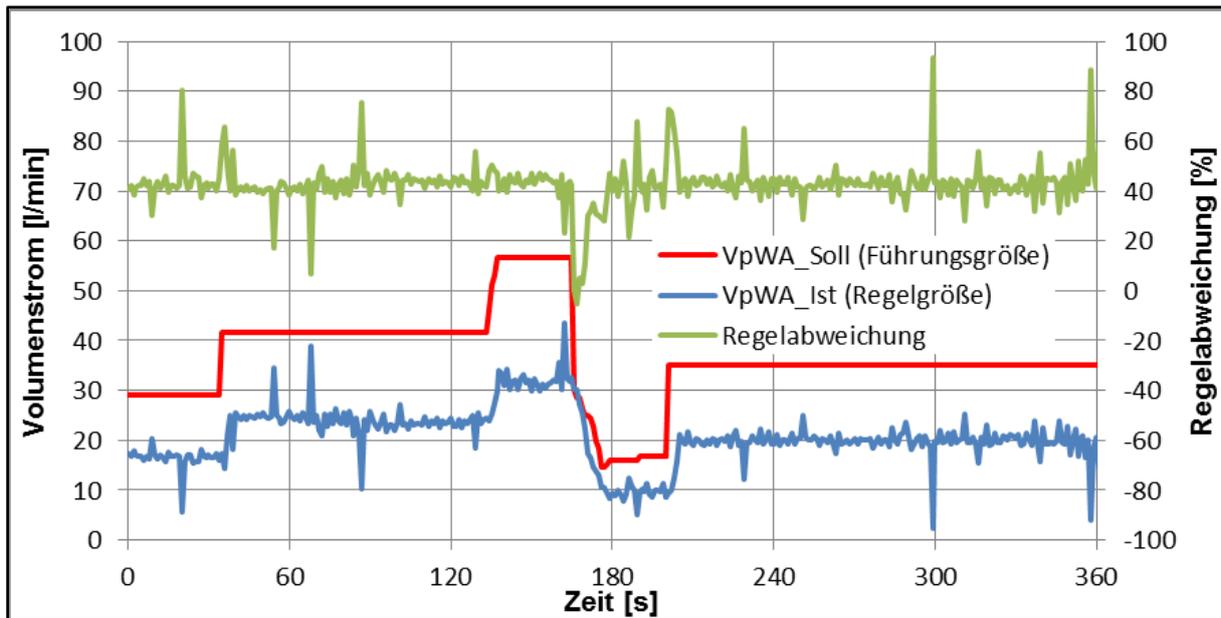


Abbildung 14-3: Volumenstrommessung Manuelbetrieb

Im folgenden Schritt wird über das Bedienpanel die Heizung aktiviert und ein Temperatursprung als Sollwert vorgegeben. Es erfolgt eine Temperaturverlaufsmessung des umlaufenden Wassers bei einem konstanten Volumenstrom von 20 l/min. Nach Überschreiten der stoffabhängigen Totzeit steigt die Wassertemperatur wie gewünscht an. Das Bild 14-4 zeigt neben den Temperaturverläufen aller Messstellen im Wasserkreislauf, und der Solltemperatur auch den Mittelwert der Regelgröße und das Schaltverhalten der Heizung. Sichtbar wird, dass die Temperaturen TWAnDosSys und TWAnPumpe deutlich über Regel- und Führungsgröße liegen. Die Schaltungslogik der Heizung funktioniert ab dem Erreichen des stationären Sollwertes zuverlässig, was sich in einer Abnahme der Regelabweichung mit zunehmender Zeitdauer auswirkt.

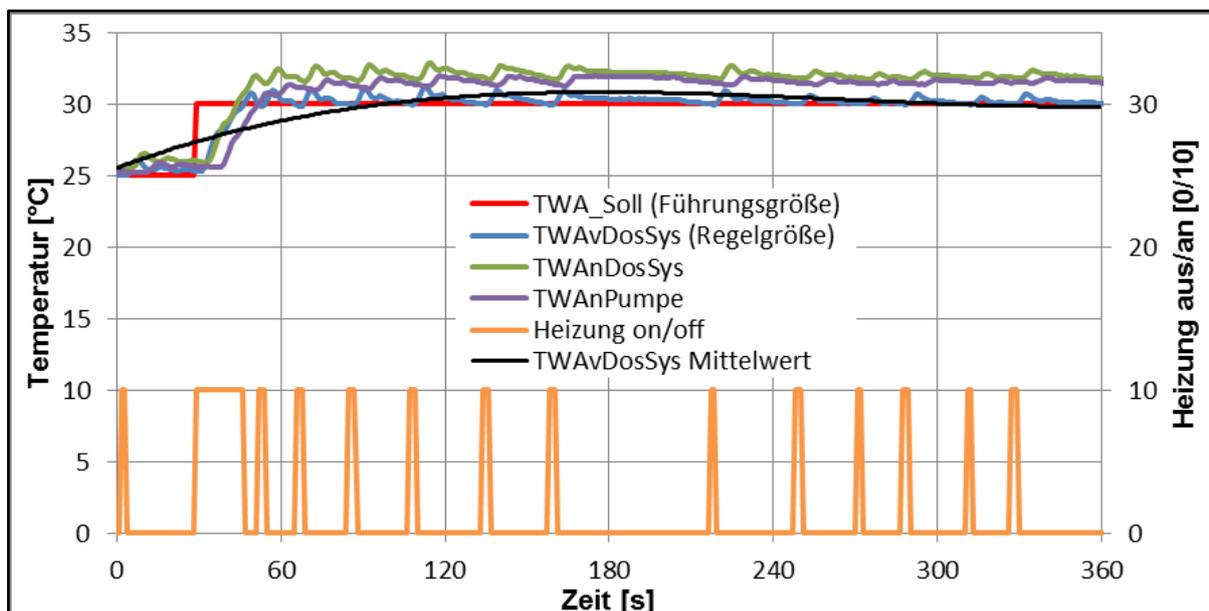


Abbildung 14-4: Wassertemperaturverlauf bei Sollwertsprung

14.3 Inbetriebnahme Automatischer Modus

Im Anschluss wird der automatische Prüflaufmodus in Betrieb genommen. Hierzu werden ein Ausschnitt aus dem in Kapitel 6.1 beschriebenen Temperaturverlauf sowie ein Volumenstrom von 7,7 l/min, was dem am D2676LE131 gemessenen Volumenstrom bei Nenndrehzahl entspricht, in einer Sollwerttabelle aufbereitet.

Ausgehend von der Umgebungstemperatur von 23°C wird das umlaufende Wasser entsprechend der in Abbildung 14-5 gezeigten Sollwertvorgabe beheizt. Der Mittelwert der Regelgröße orientiert sich dabei nah am Verlauf der Führungsgröße, das tatsächlich auftretende Schwingen der Regelgröße TWAvDosSys lässt aber noch eine deutlich zu hohe Regelabweichung erkennen. Die nicht in die Regelung einbezogenen Temperaturwerte liegen erneut über Soll- und Istwertverlauf und sind damit wiederholt nicht in Ordnung.

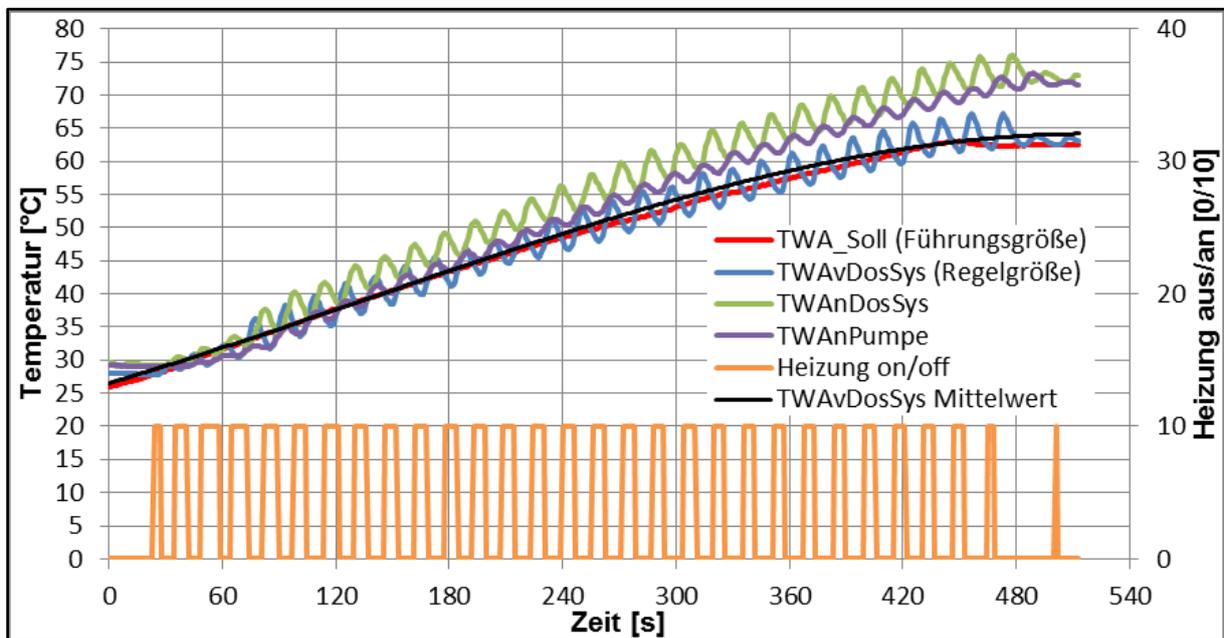


Abbildung 14-5: Wassertemperaturverlauf 1 Automatikmodus

Obwohl die Volumenstromregelung mit angepasstem Parameter für P- und I-Glied sowie deaktiviertem D-Anteil nun präziser arbeitet, wird der Sollwert jedoch nicht erreicht. Der Trend liegt durchschnittlich im Bereich zwischen 8 und 9 l/min. Problematisch ist hier die eingesetzte Messuhr mit einem Messbereich von bis zu 200 l/min. Gerade bei kleinen Volumenströmen treten Schwankungen auf, die eine akzeptable Reglerkalibrierung unmöglich machen. Diese Messfehler sind in Abbildung 14-6 deutlich sichtbar.

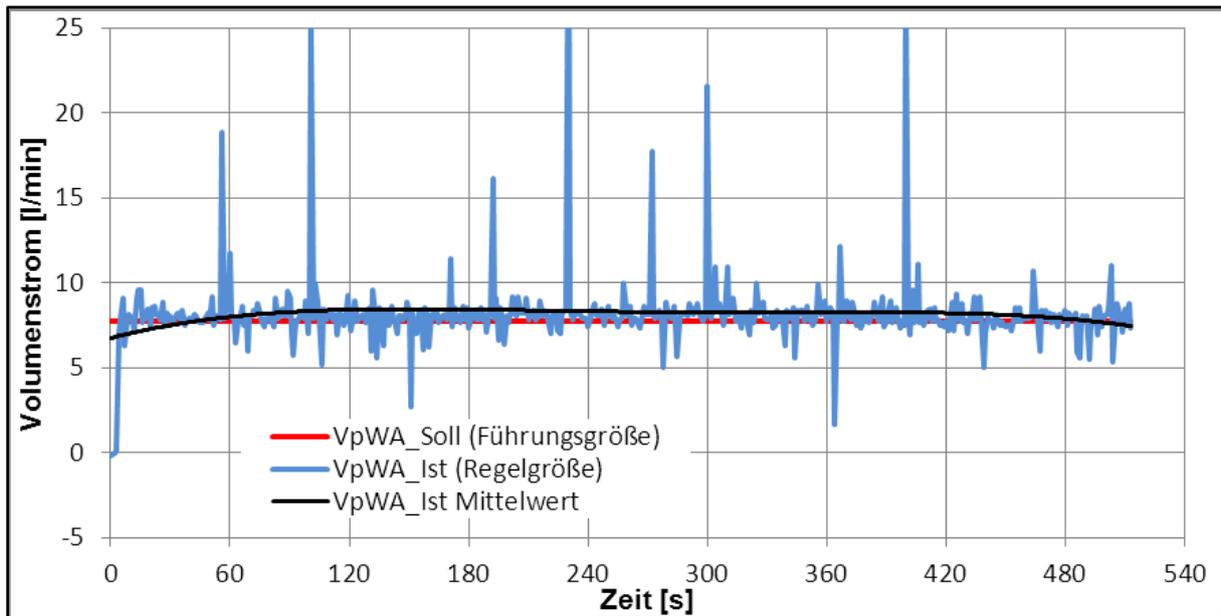


Abbildung 14-6: Volumenstrommessung Automatikbetrieb

Zur Verminderung der Temperaturregelabweichung werden geringfügige Anpassungen in der Software vorgenommen und die physikalischen Faktoren für die Berechnung der Aus- und Wiedereinschaltswelle aus der Solltemperatur neu bedatet. Anschließend wird der automatische Prüflaufmodus mit identischen Sollwertvorgaben erneut gestartet. Im Verlauf der Messung werden drei Heizelemente deaktiviert, um auf diese Weise das Verhalten der Regelung bei geringerer zur Verfügung stehender Heizleistung zu überprüfen. Wie in Abbildung 14-7 zu erkennen, sinkt die Regelabweichung unter Verwendung von nur drei Heizelementen deutlich, der Trendverlauf der Regelgröße unterschreitet den Sollwert aber teilweise. Vor allem im Bereich des nahezu stationären Endwertes des Sollwertverlaufs steigt die Abweichung zwischen TWA_vDosSys und den nicht geregelten Temperaturmessstellen wiederholt in den nicht akzeptablen Bereich.

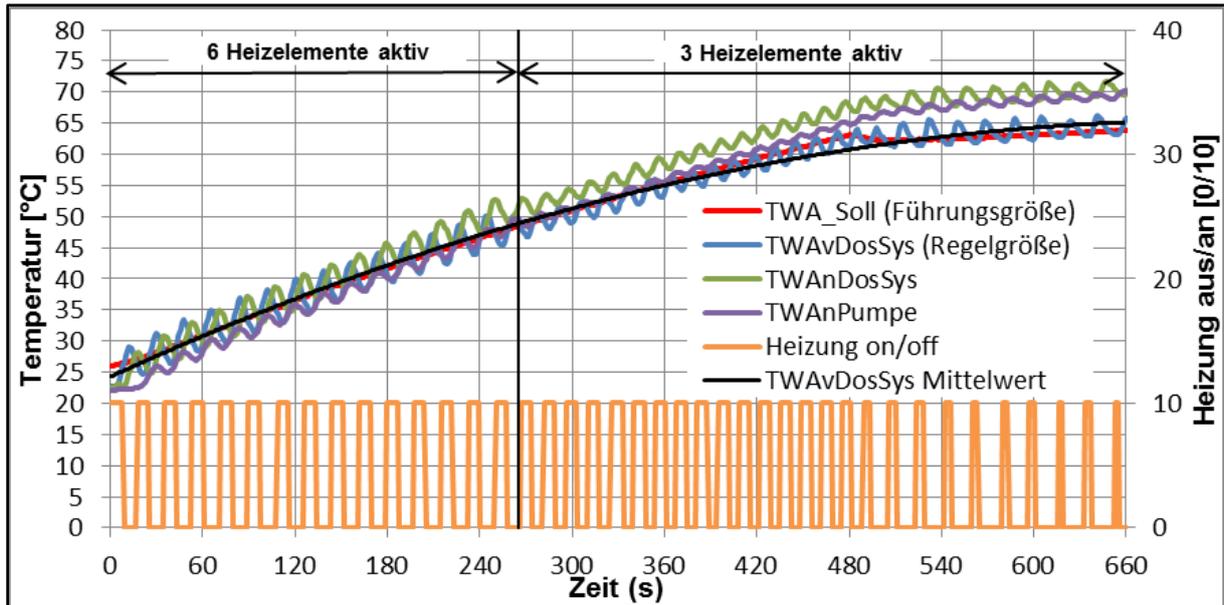


Abbildung 14-7: Wassertemperaturverlauf 2 Automatikmodus

Nach einer Abkühlzeit und einer weiteren Parameteranpassung in der Bediensoftware wird die Messung mit lediglich zwei aktivierten Heizelementen wiederholt. Dabei stellt sich das bisher optimalste Verhalten von Ist- zu Sollwert ein, die Istwertschwingungen sind klein. Dieses Verhalten zeigt Abbildung 14-8, ebenso ist die durch die verminderte Heizleistung hervorgerufene, lange Ansteuerdauer der Heizelemente zu erkennen.

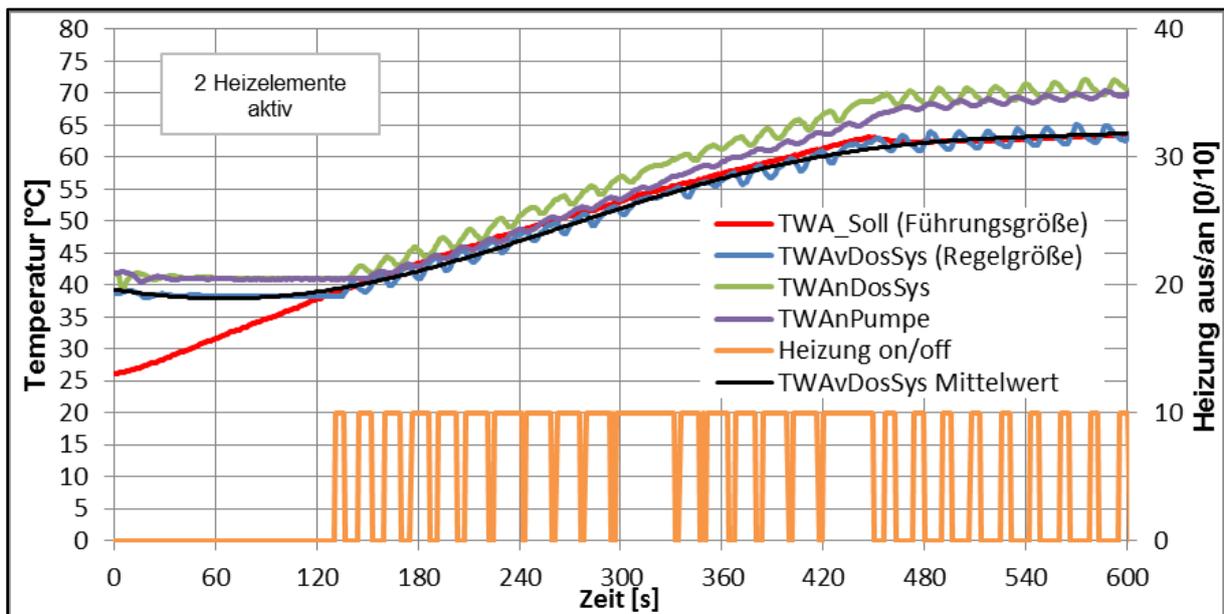


Abbildung 14-8: Wassertemperaturverlauf 3 Automatikmodus

Aus den durchgeführten Inbetriebnahmeversuchen lässt sich ableiten, dass durch ein Überangebot von Heizleistung bei gering steigenden Sollwertverläufen die Präzision der Regelung leidet. Dies ist in der Tatsache begründet, dass die Schalteinheit der Heizung die

freigegebenen Heizelemente nur gemeinsam ein- oder ausschalten kann. Eine Deaktivierung einzelner Elemente ist derzeit nur manuell durchführbar. Das vorhandene Überangebot an Heizleistung wirkt sich in einer maximal möglichen Temperaturerhöhung von ca. 85°C in 5 min aus, was deutlich über den angestrebten Verhältnissen liegt.

Zur Optimierung des Heizverhaltens empfiehlt sich eine Erweiterung der Schalteinheit, sodass direkt aus der Software nur die gerade benötigte Anzahl an Heizelementen aktiviert werden kann. Auf diese Weise wäre eine Schaltungslogik realisierbar, die in Abhängigkeit von Sollwertsteigung und Regeldifferenz die punktuell benötigte Heizleistung automatisch bestimmt. Ebenfalls steht ein Wechsel der Regelgröße zur Disposition, da an der aktuell verwendeten Messstelle TWAvDosSys keine ausreichende Durchmischung des Wassers vorliegt und so die beschriebenen Differenzen entstehen. Eine weitere, zu erprobende Möglichkeit ist auch die Regelgröße als Mittelwert aller drei Temperaturmessgrößen zu generieren.

Zur Verbesserung der Volumenstromregelung wird zudem der Einsatz eines anderen Messinstrumentes untersucht. Erst durch einen präzise gemessenen Istwert kann der PI-Regler endgültig in Betrieb genommen werden.

15 Projektabschluss / Ausblick

Mit der Inbetriebnahme kann der Aufbau des Reagensdosiersystemprüfstands als erfolgreich abgeschlossen eingestuft werden. Es war möglich mit dem freigegebenen Projektbudget einen auf Komponentenbasis arbeitenden Prüfstand zu entwickeln, der den Ansprüchen einer modernen Motorenentwicklung durch schnelle Einsetzbarkeit und einen unkomplizierten Aufbau entgegenkommt. Mit der Möglichkeit der systematisierten Lagerhaltung auf Basis einer Euro-Gitterbox bindet der Prüfstand keine Platzkapazitäten im Motorenentwicklungszentrum. Die erarbeitete Bediensoftware ermöglicht bereits den Einsatz von Stufentabellen und damit eine Durchführung der Auftauvalidierung nach EPA bzw. EU Vorgabe unter Verwendung genauer Sollwertvorgaben.

Das Projekt war im Zeitfenster von zwölf Wochen zu realisieren, allerdings war die vorhandene Vorlaufzeit zur Konzeptentwicklung und Recherche durchaus nötig, da gerade Wasserpumpen für den benötigten Temperaturbereich eher selten freigegeben werden und hier eine umfangreiche Recherche notwendig war.

Im weiteren Verlauf der D2676LE131-Entwicklung wird der Prüfstand nun erstmalig in der Kältezelle eingesetzt, um ein Dosiersystem für einen Prototypmotor zu qualifizieren, wobei die bereits vorgestellte Stufentabelle verwendet wird. Durch die Auswertung der ersten Versuchsergebnisse kann zudem weiteres Verbesserungspotential erkannt werden.

Optimierungsbedarf besteht noch im Bereich der Reglerkalibrierung der Volumenstromregelung, um in Zukunft den Istwert präziser einregeln zu können. Auch der Aufbau der Heizungsschaltlogik bedarf der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Anpassung.

Die beschriebenen Probleme werden durch die bereits begonnene Entwicklung der Softwarestufe 3.0 und die fortzuführende empirische Kalibrierung sowie den angedachten Umbau der Heizungsschalteinheit behoben.

16 Literaturverzeichnis

Nr.:	Autor, Titel / Bezeichnung	Copyright
		Auflage / Datum
[1]	Technisches Merkblatt M 6221 d AdBlue	BASF November 2006
[2]	Reif, K. Automobilelektronik	Vieweg 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2007
[3]	Georgi, W.; Metin, E. Einführung in LabVIEW	Fachbuchverlag Leipzig 5., überarbeitete und erweiterte Auflage 2012
[4]	Zacher, S.; Reuter, M. Regelungstechnik für Ingenieure	Springer Vieweg 14., korrigierte Auflage 2014
[5]	Stein, U. Einstieg in das Programmieren mit MATLAB	Fachbuchverlag Leipzig 2., aktualisierte Auflage 2009
[6]	Reif, K. (Hrsg.) Dieselmotor-Management	Springer Vieweg 5., überarbeitete und erweiterte Auflage 2012

-
- | | | |
|-------------|--|--|
| [7] | MAN EDC17 CV42 6.3.0

Software documentation | Robert Bosch GmbH

23.07.2013 |
| [8] | Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates konsolidiert mit Richtlinie 2012/46/EU vom 06.12.12 | Amtsblatt L 353

21.12.2012 |
| [9] | http://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php | DieselNet, Ecopoint Inc., Canada

abgerufen 21.04.2014 |
| [10] | Code of Federal Regulations Titel 40 – Protection of Environment
Chapter I – Environmental Protection Agency (Continued)
Subchapter U – Air Pollution Controls
Parts 1039, 1065, 1068 | U.S. Government Printing Office

Juni 2013 |
| [11] | http://dieselnet.com/standards/us/nonroad.php | Dieselnet, Ecopoint Inc., Canada

abgerufen 21.04.2014 |
| [12] | Nonroad SCR Certification - Webinar Presentation | U.S. Environmental Protection Agency

26.07.2011 |
| [13] | Stan, C.

Thermodynamik des Kraftfahrzeugs | Springer Vieweg

2. Auflage 2012 |
| [14] | Weigand, B.; Köhler, J.;
von Wolfersdorf, J.

Thermodynamik kompakt | Springer Vieweg

3., aktualisierte Auflage 2013 |
-

-
- | | | |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|
| [15] | Pläßmann, W.; Schulz, D. (Hrsg.) | Springer Vieweg |
| | Handbuch Elektrotechnik | 6., neu bearbeitete Auflage 2013 |
| [16] | Plötzeneder, F.; Plötzeneder, B. | Franzis Verlag GmbH |
| | Praxiseinstieg LabVIEW | Auflage 2010 |
-

17 Anhang

Anhang A

Projektvorbereitende Präsentation



Zweck:

- Validierung von AdBlue-Dosiersystemkomponenten (u. a. Kundenbauteile) im Auftauversuch
- Vorgaben zur Dosierbereitschaft der Systemteile (AdBlue-Tank, -Doser, -Leitung) können so direkt geprüft werden

Zielsetzung:

- Konzeptentwicklung für einen komponentenbasierten AdBlue-Dosiersystem-Prüfstand
- Identifikation der zum Betrieb benötigten Parameter (z.B. Pumpenkurve verschiedener MAN Motoren am Kühlmittelabgriff für die AGN herausfahren)
- Konstruktion des Prüfstands (z.B. Catia V5) auf Basis einer Gitterbox (optimal einzulagern)
- Auswahl und Beschaffung der benötigten Pumpe von Zulieferern
- Abschließender Aufbau und Inbetriebnahme des Prüfstandes
- Ausblick und Automatisierungsmöglichkeiten

Projektentwurf für Bachelorthesis

Aufbau eines AdBlue-Dosiersystem-Komponenten-Prüfstands



Projektbeteiligte:

- Durchführung im Rahmen einer Bachelorarbeit
- Bachelorand: Florian List (aktuell Praktikant EPXC bis 31.01.14)
- Betreuender Ingenieur: Marc Winterhoff, EPXCE

Projektrahmen:

- Projektstart: Ausschreibung der Bachelorthesis zum 03.02.2014
- Bearbeitungszeit: 20 Wochen
- Thesisdauer: ca. 12 Wochen
- Abschließende Dienstreise des Betreuers zur Verteidigung der Arbeit in Hamburg
- Unternehmensbesuch durch den betreuenden Professor (1 Termin)

MAN Truck & Bus

Internal Engines, EPXC

Florian List

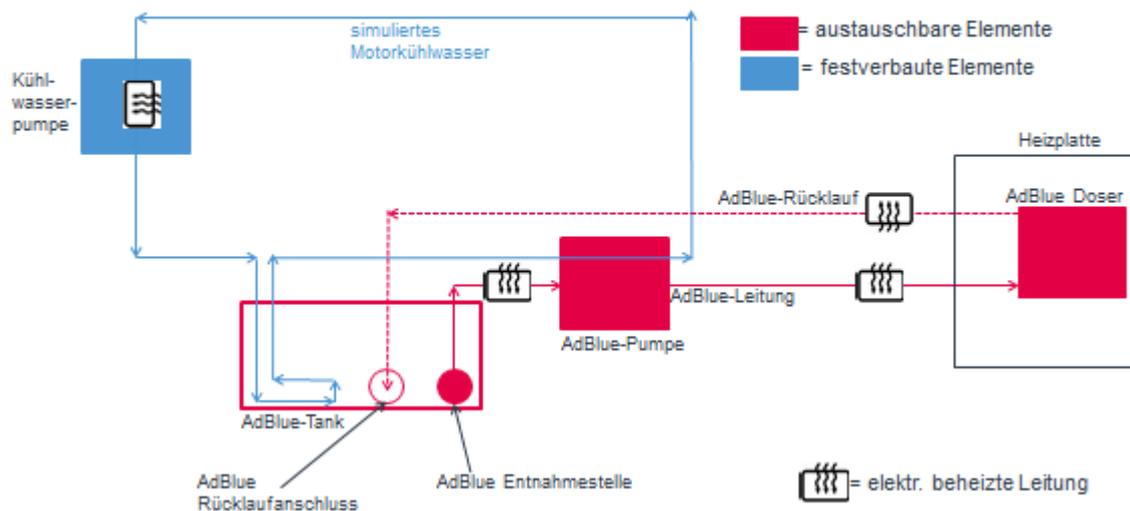
Projektentwurf für Bachelorthesis

02.10.2013

4

Projektentwurf für Bachelorthesis

Aufbau eines AdBlue-Dosiersystem-Komponenten-Prüfstands



MAN Truck & Bus

Internal Engines, EPXC

Florian List

Projektentwurf für Bachelorthesis

02.10.2013

4

Projektentwurf für Bachelorthesis

Aufbau eines AdBlue-Dosiersystem-Komponenten-Prüfstands



Kostenabschätzung

Kostenstelle	Betrag (ca.)	Details
Kühlwasserpumpe	10000€	VOK; Beschaffung von einem noch auszuwählenden Zulieferer, erste Anfrage gestartet
Gitterbox	300€	kann aus MAN Bestand entnommen werden
Materialien	500€	Rohre, Flansche, Halter, Schrauben, etc.
Schlosserstunden	300€	Schweißarbeiten, Drehen von Flanschen, Anfertigen von Haltern
Kraftstoff	0€	Messungen für Pumpenkurven sind kombinierbar mit stattfindenden Prüfläufen, keine Extrakosten
Prüfstandskosten	0€	Zur Inbetriebnahme wird die Kältezelle zwar benötigt, es besteht aber kein Bedarf nach einem eigenen Motorstellplatz (Aufbau zwischen zwei Motoren mögl.)
Serientelle		Zur Inbetriebnahme wird ein AdBlue-System nach Wahl benötigt um den Prüfstand komplett aufbauen zu können
Sachbearbeiter	0€	Bachelorrand wird von PMHT bezahlt, somit keine Kosten für EPXC
Gesamtsumme	11000€	

MAN Truck & Bus

External Engines, EPXC

Florian List

Projektentwurf für Bachelorthesis

© 2012

02.10.2012



Haben Sie noch Fragen?



Florian List

MAN Truck & Bus AG

External Engines

Performance & Emissions

Land Based Engines (EPXC)

Vogelweiherstraße 33

90441 Nürnberg

Tel.: +49 911 420-6706

mailto:praktikant.emec@man.eu

http://www.man-engines.com

http://www.mantruckandbus.com

Anhang B

Übersicht Messergebnisse Dimensionierungsversuch

Messung "Heizung vollst"							
nMOT	MMOT	pVAR6	pVAR7	VpWAVAR1	dpHWKL	VpWAMOT	TWAwMOT
1/min	Nm	mbar	mbar	l/min	mbar	l/min	°C
600	0	782,35	643,88	2,09	138,46	158,7	89,9
700	1000	865,89	677,60	2,53	188,29	186,3	90,4
800	1000	984,44	740,58	2,93	243,86	213,4	94,5
900	1000	1156,05	850,43	3,33	305,62	240,1	100,1
1000	1000	1309,01	932,58	3,72	376,43	267,7	96,1
1100	1000	1465,12	1010,86	4,10	454,25	294,7	97,4
1200	1000	1618,31	1078,07	4,51	540,24	321,9	96,8
1300	1000	1770,29	1133,85	4,93	636,43	349,2	96,7
1400	1000	1930,29	1188,10	5,37	742,19	377,8	96,9
1500	1000	2093,72	1236,98	5,81	856,74	406,0	96,8
1600	1000	2262,03	1287,39	6,22	974,64	434,1	96,7
1700	1000	2443,38	1344,36	6,64	1099,02	462,1	97,2
1800	1000	2625,70	1395,36	7,06	1230,35	488,8	96,7
1900	1000	2819,83	1452,79	7,47	1367,05	515,4	96,4
1950	1000	2921,05	1483,09	7,68	1437,96	530,0	96,7
2000	1000	3025,00	1510,62	7,90	1514,38	542,6	96,3
2100	-154	3219,87	1553,98	8,30	1665,89	568,2	96,6
2120	-354	3276,56	1581,03	8,40	1695,53	572,6	98,5

Datum: 10.12.2013

Messung "Heizung_o_Tankgeber"							
nMOT	MMOT	pVAR6	pVAR7	VpWAVAR1	dpHWKL	VpWAMOT	TWAwMOT
1/min	Nm	mbar	mbar	l/min	mbar	l/min	°C
600	1	733,38	613,32	2,58	120,06	160,0	98,0
700	1000	993,06	822,18	3,02	170,88	186,3	98,8
800	1000	1096,63	873,07	3,48	223,55	213,8	95,0
900	1000	1262,58	979,60	3,93	282,98	240,6	96,4
1000	1000	1367,13	1019,95	4,41	347,18	267,1	96,8
1100	1000	1477,86	1058,15	4,86	419,71	294,3	96,5
1200	1000	1598,96	1099,10	5,34	499,86	321,9	96,4
1300	1000	1739,13	1150,86	5,80	588,28	349,9	96,9
1400	1000	1887,35	1199,00	6,32	688,35	377,7	96,6
1500	1000	2045,62	1248,63	6,82	796,99	406,4	96,4
1600	1000	2210,31	1303,86	7,31	906,45	434,0	96,8
1700	1000	2385,23	1362,74	7,80	1022,49	461,3	97,1
1800	1000	2568,73	1421,52	8,29	1147,20	489,0	96,8
1900	1000	2759,64	1481,64	8,76	1278,00	516,2	96,4
1950	1000	2856,27	1510,81	8,99	1345,46	529,4	96,3
2000	1000	2956,88	1544,26	9,24	1412,63	543,1	96,3
2100	-155	3134,50	1579,35	9,69	1555,15	568,6	95,9
2120	-365	3207,01	1628,67	9,80	1578,34	573,7	99,0

Datum: 11.12.2013

Messung "Heizung_o_FMod"							
nMOT	MMOT	pVAR6	pVAR7	VpWAVAR1	dpHWKL	VpWAMOT	TWAwMOT
1/min	Nm	mbar	mbar	l/min	mbar	l/min	°C
600	0	475,30	348,52	2,10	126,78	162,7	76,3
700	1000	571,78	387,80	2,49	183,99	190,6	76,6
800	1000	684,75	441,52	2,90	243,22	217,5	79,0
900	1000	827,06	525,09	3,34	301,96	244,0	83,7
1000	1000	990,38	619,76	3,72	370,63	270,8	88,3
1100	1000	1347,27	901,01	4,19	446,26	296,9	99,8
1200	1000	1562,12	1028,79	4,59	533,33	323,5	96,6
1300	1000	1761,16	1134,76	5,01	626,40	351,0	95,7
1400	1000	1964,03	1231,52	5,45	732,51	379,6	96,0
1500	1000	2172,99	1325,94	5,89	847,05	407,0	98,3
1600	1000	2356,24	1392,70	6,33	963,54	434,8	97,3
1700	1000	2531,11	1441,15	6,74	1089,95	462,4	97,0
1800	1000	2713,40	1494,56	7,16	1218,84	489,9	96,8
1900	1000	2912,12	1557,16	7,58	1354,96	517,7	96,8
1950	1000	3016,53	1584,93	7,81	1431,61	530,3	96,5
2000	1000	3115,79	1610,78	8,02	1505,02	544,5	96,8
2100	-150	3291,86	1635,96	8,42	1655,90	570,0	96,2
2120	-350	3352,69	1666,35	8,52	1686,34	574,0	98,3

Datum: 12.12.2013

Messung "Heizung_o_Ventil"							
nMOT	MMOT	pVAR6	pVAR7	VpWAVAR1	dpHWKL	VpWAMOT	TWAwMOT
1/min	Nm	mbar	mbar	l/min	mbar	l/min	°C
600	9	1149,26	1021,98	2,34	127,29	158,7	99,7
700	1000	1211,36	1035,03	2,79	176,32	186,3	99,1
800	1000	1286,94	1054,18	3,22	232,75	213,7	97,0
900	1000	1386,42	1092,16	3,62	294,26	240,5	98,4
1000	1000	1479,20	1116,05	4,07	363,15	267,4	95,9
1100	1000	1593,70	1158,85	4,51	434,85	294,8	97,3
1200	1000	1710,47	1192,13	4,96	518,34	321,6	96,6
1300	1000	1838,85	1229,87	5,42	608,98	349,6	96,9
1400	1000	1976,85	1267,95	5,88	708,89	376,9	96,9
1500	1000	2123,27	1302,93	6,36	820,34	406,2	96,6
1600	1000	2281,52	1347,80	6,85	933,72	433,9	96,8
1700	1000	2453,68	1401,25	7,32	1052,43	460,8	97,2
1800	1000	2630,09	1449,95	7,78	1180,14	487,8	97,0
1900	1000	2808,79	1495,61	8,25	1313,18	516,6	96,4
1950	1000	2907,66	1526,82	8,49	1380,84	529,3	96,6
2000	1000	3007,31	1555,73	8,70	1451,58	543,3	96,4
2100	-152	3192,61	1598,13	9,16	1594,48	568,2	96,7
2120	-364	3248,69	1626,51	9,26	1622,17	573,8	98,6

Datum: 17.12.2013

Messung "Heizung_o_alle_kurze_Ltg"							
nMOT	MMOT	pVAR6	pVAR7	VpWAVAR1	dpHWKL	VpWAMOT	TWAwMOT
1/min	Nm	mbar	mbar	l/min	mbar	l/min	°C
600	0	1198,71	1089,98	4,07	108,72	159,9	95,6
700	1000	1255,45	1117,65	4,84	137,79	187,5	96,6
800	1000	1330,37	1159,76	5,56	170,61	213,7	99,2
900	1000	1400,73	1194,65	6,25	206,07	241,1	93,6
1000	1000	1481,36	1239,14	6,97	242,23	266,3	99,2
1100	1000	1565,30	1279,80	7,67	285,50	293,3	95,1
1200	1000	1657,95	1323,14	8,44	334,81	320,8	97,8
1300	1000	1787,17	1391,16	9,20	396,01	349,7	97,4
1400	1000	1883,84	1420,54	9,99	463,30	378,3	96,3
1500	1000	2018,14	1483,31	10,77	534,83	405,5	96,5
1600	1000	2159,59	1549,40	11,57	610,19	435,4	96,6
1700	1000	2313,39	1625,11	12,37	688,28	462,2	97,2
1800	1000	2474,45	1703,74	13,12	770,72	488,4	96,7
1900	1000	2634,41	1779,02	13,87	855,39	516,4	96,3
1950	1000	2715,77	1812,31	14,28	903,45	530,1	96,2
2000	1000	2811,07	1864,50	14,66	946,57	542,2	96,2
2100	-146	2973,47	1933,82	15,37	1039,64	568,0	96,0
2120	-354	3029,19	1970,95	15,58	1058,24	573,9	98,6

Datum 18.12.2013

Anhang C

Frontpanel Flo-Motion 2.0

Siehe eingeklebtes Beiblatt A3

Anhang D-1

Blockschalttdiagramm im Modus „true“

Siehe eingeklebtes Beiblatt A3

Anhang D-2

Blockschalttdiagramm im Modus „false“

Siehe eingeklebtes Beiblatt A3

Anhang E-1

Zeichnung Wasserpumpe

