

Masterthesis

Nr. AE/05/2017

Entwicklung und Untersuchung eines alternativen Gemischbildungssystems für Verbrennungsmotoren

eingereicht an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der Westsächsischen Hochschule Zwickau
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science (M.Sc.)

vorgelegt von: cand. Master of Science Florian Thomas Schmiernow
geboren am: 07.01.1991

Studiengang Automotive Engineering

Autorenreferat

B.Eng. Schmiernow, Florian Thomas

Entwicklung und Untersuchung eines alternativen Gemischbildungssystems für
Verbrennungsmotoren

- 2017 - 97 Seiten - 1 DVD-Anlage

Masterthesis

Westsächsische Hochschule Zwickau

Fakultät Kraftfahrzeugtechnik

Diese Arbeit beschäftigte sich mit der Entwicklung und Untersuchung von alternativen Gemischaufbereitungssystemen. Es wurden dafür verschiedene Systeme theoretisch näher betrachtet und relevante Informationen extrahiert. Basierend auf diesen wurden im Anschluss verschiedene Systeme entwickelt, konstruiert, gebaut und letztendlich mit geeigneter Messtechnik getestet und untersucht. Die ermittelten Ergebnisse wurden zuletzt ausgewertet, verglichen und beurteilt. Die so gewonnen Erkenntnisse wurden in einem Fazit und einem Ausblick zusammengefasst.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen Quellen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Texte, Bilder, Tabellen und ähnliches sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit oder eine ähnliche Arbeit mit Teilen wesentlicher Inhaltsübereinstimmung noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Zwickau, am 25.01.2018

.....

Inhalt

1	Einleitung.....	- 1 -
1.1	Thema.....	- 1 -
1.2	Kommentar zu Hauptinformationsquellen	- 1 -
2	Stand der Technik.....	- 2 -
2.1	Verbrennungsmotoren.....	- 2 -
2.2	Grundlegende Energiegewinnung durch Verbrennung	- 2 -
2.2.1	Verbrennung von Ethanol	- 2 -
2.2.2	Schadstoffe.....	- 4 -
2.3	Gemischbildung und Verbrennung am Ottomotor	- 5 -
2.3.1	Stöchiometrie oder Verbrennungsluftverhältnis	- 5 -
2.3.2	Homogenes Gemisch.....	- 7 -
2.3.3	Aggregatzustände der Reaktionspartner	- 8 -
2.3.4	Verbrennung und Flammenfront	- 9 -
2.4	Gemischbildungssysteme.....	- 13 -
2.4.1	Vergaser.....	- 13 -
2.4.2	Saugrohreinspritzung	- 14 -
2.4.3	Direkteinspritzung	- 15 -
2.4.4	Alternative Systeme	- 16 -
2.5	Wirkungsgrad	- 18 -
2.6	Abgaswärmerückgewinnung an Verbrennungsmotoren	- 19 -
2.6.1	PKW- und Nutzfahrzeugmotoren	- 20 -
2.6.2	Schiffbau und Luftfahrt.....	- 20 -
2.6.3	Stationäre Motoren.....	- 21 -
3	Präzisierung der Aufgabenstellung.....	- 22 -
3.1	Entwicklung alternativer Gemischaufbereitungssysteme.....	- 22 -
3.2	Randbedingungen	- 22 -
3.3	Ziel	- 22 -
4	Der Paul Pantone Prozess.....	- 23 -
4.1	Hintergrund und Erfinder	- 23 -
4.2	Allgemeines Funktionsprinzip	- 24 -
4.3	Erklärungsansätze.....	- 25 -
4.4	„Free GEET Plans“	- 27 -

5	Der Tom Ogle Kraftstoffvergaser.....	- 28 -
5.1	Hintergrund und Erfinder	- 28 -
5.2	Allgemeines Funktionsprinzip	- 29 -
5.3	Anpassung und Anwendung am Pantone Reaktor.....	- 31 -
6	Entwicklung	- 32 -
6.1	Entwicklungsphasen	- 32 -
6.2	Pantone V1	- 33 -
6.3	Pantone V2	- 34 -
6.4	Kraftstoffvergaser tank.....	- 35 -
6.5	Pantone V3	- 36 -
6.6	Pantone V4	- 36 -
6.7	Universalsteuergerät	- 38 -
7	Konstruktion unterschiedlicher Gemischbildungssysteme	- 40 -
7.1	Kaufteil-Datenbank.....	- 40 -
7.2	Pantone V1	- 41 -
7.3	Kraftstoffvergaser.....	- 42 -
7.4	Anschlussflansche.....	- 43 -
7.5	Pantone V2	- 44 -
7.6	Pantone V3	- 50 -
7.7	Pantone V4	- 50 -
8	Bau und Montage	- 51 -
8.1	Anschlussflansche.....	- 51 -
8.2	Kraftstoffvergaser.....	- 52 -
8.3	Pantone V1	- 53 -
8.4	Pantone V2	- 54 -
8.5	Pantone V3	- 55 -
8.6	Pantone V4	- 55 -
8.7	Universalsteuergerät	- 56 -
9	Prüfstandsversuche	- 57 -
9.1	Prüfstand und Messtechnik.....	- 57 -
9.1.1	Motorenprüfstand.....	- 57 -
9.1.2	Verbrauchsabschätzung	- 58 -
9.1.3	Abgasmesssystem.....	- 58 -
9.1.4	Berührungsloses Temperaturmessgerät	- 59 -
9.1.5	Direkte Temperaturmessung.....	- 60 -

9.1.6	Druckmessung	- 61 -
9.1.7	Digitale Auswertung und Messwertspeicherung	- 61 -
9.2	Versuchsdurchführung	- 62 -
9.2.1	Originaler Vergaser.....	- 62 -
9.2.2	Pantone V1	- 63 -
9.2.3	Oglevergaser.....	- 64 -
9.2.4	Pantone V2	- 65 -
9.2.5	Pantone V3	- 66 -
9.2.6	Pantone V4	- 67 -
10	Messergebnisse	- 68 -
10.1	Temperaturen.....	- 68 -
10.2	Abgaskonzentrationen	- 71 -
10.3	Druckmessungen	- 76 -
10.4	Verbrauchsabschätzung	- 77 -
10.5	Allgemeines Betriebsverhalten	- 78 -
11	Kritische Betrachtung	- 81 -
12	Fazit	- 82 -
13	Ausblick.....	- 82 -
14	Literaturverzeichnis	XI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ethanolverbrennung	- 3 -
Abbildung 2: Definition Verbrennungsluftverhältnis	- 5 -
Abbildung 3: Stöchiometrisches Kraftstoffverhältnis.....	- 6 -
Abbildung 4: Abgaskurve Beispiel	- 6 -
Abbildung 5: Homogenität	- 7 -
Abbildung 6: PKW mit Holzvergaser.....	- 8 -
Abbildung 7: Verbrennung Gemisch 1 Ausgangszustand.....	- 9 -
Abbildung 8: Verbrennung Gemisch 2 Ausgangszustand.....	- 9 -
Abbildung 9: Verbrennung Gemisch 1 Zündenergie	- 10 -
Abbildung 10: Verbrennung Gemisch 2 Zündenergie	- 10 -
Abbildung 11: Verbrennung Gemisch 1 Flammenfront	- 10 -
Abbildung 12: Verbrennung Gemisch 2 Flammenfront	- 10 -
Abbildung 13: Verbrennung Gemisch 1 Tropfen I.....	- 11 -
Abbildung 14: Verbrennung Gemisch 1 Tropfen II.....	- 11 -
Abbildung 15: Verbrennung Gemisch 1 Geschwindigkeit.....	- 12 -
Abbildung 16: Verbrennung Gemisch 2 Geschwindigkeit.....	- 12 -
Abbildung 17: Verbrennung Gemisch 1 Ergebnis.....	- 12 -
Abbildung 18: Verbrennung Gemisch 2 Ergebnis.....	- 12 -
Abbildung 19: Funktionsprinzip Vergaser	- 13 -
Abbildung 20: Saugrohreinspritzung	- 14 -
Abbildung 21: Direkteinspritzung.....	- 15 -
Abbildung 22: Gasanlage.....	- 17 -
Abbildung 23: Wirkungsgrad Verbrennungsmotor	- 18 -
Abbildung 24: Wirkungsgrad PKW	- 19 -
Abbildung 25: Versuchsggregat.....	- 22 -
Abbildung 26: Paul Pantone (1950 - 2015).....	- 23 -
Abbildung 27: Fig. 1, internationales Patent WO 96/14501	- 24 -
Abbildung 28: Fig. 2, internationales Patent WO 96/14501	- 25 -
Abbildung 29: Vortex Heat Exchanger	- 26 -
Abbildung 30: Free GEET Plans.....	- 27 -
Abbildung 31: Tom Ogle	- 28 -
Abbildung 32: Fig. 1 US Patent Nr. 4,177,779	- 29 -
Abbildung 33: Fig. 3 US Patent Nr. 4,177,779	- 30 -
Abbildung 34: Fig. 2 US Patent Nr. 4,177,779	- 31 -
Abbildung 35: Pantone V1, systematisch.....	- 33 -
Abbildung 36: Pantone V2, Entwurfsphase.....	- 34 -
Abbildung 37: Pantone V2, schematisch.....	- 34 -
Abbildung 38: Vergasertank, gerendert	- 35 -
Abbildung 39: Vergasertank, schematisch.....	- 35 -
Abbildung 40: Pantone V3, schematisch.....	- 36 -
Abbildung 41: Pantone V4, Klemmringverschraubung	- 37 -
Abbildung 42: Pantone V4, schematisch.....	- 38 -

Abbildung 43: Universalsteuergerät, schematisch.....	- 39 -
Abbildung 44: Kaufteildatenbank (Auszug)	- 40 -
Abbildung 45: Konstruktion Pantone V1, Collage	- 41 -
Abbildung 46: Vergasertank, Collage	- 42 -
Abbildung 47: Konstruktion Anschlussflansche, Konstruktionszeichnung F00001-M00-300-002....	- 43 -
Abbildung 48: Entwicklung Simulationsgeometrien, Collage.....	- 45 -
Abbildung 49: Velocity Magnitude [m/s], Intake	- 46 -
Abbildung 50: Absolute Pressure [bar], Intake	- 46 -
Abbildung 51: Strömungslinien, Absolute Pressure [bar], Intake	- 46 -
Abbildung 52: Simulation Vorheizkammer, Collage.....	- 47 -
Abbildung 53: Velocity Magnitude Simulation.....	- 48 -
Abbildung 54: Temperature Cut Simulation.....	- 49 -
Abbildung 55: Turbulence Kinetic Energy Simulation	- 49 -
Abbildung 56: 3D-Modell Bosch Einspritzdüse	- 50 -
Abbildung 57: Konstruktion, Aufnahmen für Einspritzdüsen.....	- 50 -
Abbildung 58: Anschlussflansche, oben links: Auslass, oben rechts: Einlass, unten: Auslass ab Pantone V2.....	- 51 -
Abbildung 59: Kraftstoffvergaser Bau	- 52 -
Abbildung 60: Pantone Reaktor V1 Bau	- 53 -
Abbildung 61: Pantone V1 komplett montiert.....	- 53 -
Abbildung 62: Pantone V2 Bau, Collage	- 54 -
Abbildung 63: Stahl Endstück Pantone V4	- 55 -
Abbildung 64: Pantone V4, Bau.....	- 55 -
Abbildung 65: Universalsteuergerät, Bau, außen	- 56 -
Abbildung 66: Motorenprüfstand mit Versuchsaufbau	- 57 -
Abbildung 67: 200ml Kraftstoff	- 58 -
Abbildung 68: Horiba Abgasmesssystem	- 58 -
Abbildung 69: Messpunkte, Collage.....	- 59 -
Abbildung 70: Messstellen HH520	- 60 -
Abbildung 71: Drucksensoren	- 61 -
Abbildung 72: Versuchsdurchführung Originalvergaser	- 62 -
Abbildung 73: Versuchsdurchführung Pantone Variante 1.....	- 63 -
Abbildung 74: Versuchsdurchführung Oglevergaser	- 64 -
Abbildung 75: Versuchsdurchführung Pantone Variante 2.....	- 65 -
Abbildung 76: Versuchsdurchführung Pantone V3	- 66 -
Abbildung 77: Versuchsdurchführung Pantone V4.....	- 67 -
Abbildung 78: Temperatúrauswertung HH520	- 68 -
Abbildung 79: Pantone V3, schematisch.....	- 70 -
Abbildung 80: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Pantone V2 500W, I	- 72 -
Abbildung 81: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Vergaser 500W, I	- 72 -
Abbildung 82: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Pantone V2 500W, II	- 73 -
Abbildung 83: Abbildung 84: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Vergaser 500W, II	- 73 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Systemvergleich I	- 32 -
Tabelle 2: Systemvergleich II	- 33 -
Tabelle 3: Konstruktion Vergasertank	- 42 -
Tabelle 4: Versuchsdurchführung Überblick	- 62 -
Tabelle 5: Versuchsdurchführung Pantone V3	- 66 -
Tabelle 6: Versuchsdurchführung Pantone V4	- 67 -
Tabelle 7: Messergebnisse, Temperaturen, Gesamtübersicht	- 69 -
Tabelle 8: Abgaskonzentrationen, Einzelmessungen Pantone V2	- 71 -
Tabelle 9: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Gesamtübersicht	- 74 -
Tabelle 10: Abgaskonzentrationen, prozentuale Abweichung	- 75 -
Tabelle 11: Verbrauchsabschätzung, Ergebnisse	- 77 -

Abkürzungsverzeichnis

λ -Bretts.	Lambda Wert nach Brettschneider Rechnung
.txt	Dateiendung für das Text Dateiformat
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
C ₃ H ₈	Propan
C ₄ H ₁₀	Butan
CH ₄	Methan
C _n H _m	Kohlenwasserstoffverbindungen, allgemeine Schreibweise
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
div.	divers
E10	Ottokraftstoff mit 10% Bioethanol-Anteil
etc.	et cetera
Fig.	Englisch für <i>figure</i>
GEET	englische Abkürzung für <i>Global Environmental Energy Technology</i>
HC	englische Abkürzung für <i>hydrocarbons</i> ; deutsch <i>Kohlenwasserstoffe</i>
Krad	Kraftrad, technischer Sammelbegriff für Motorräder, Motorroller, ...
LKW	Lastkraftwagen
LPG	englische Abkürzung für <i>Liquefied Petroleum Gas</i>
Min	Minuten
n	Drehzahl
N	magnetischer Nordpol
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
OT	Oberer Totpunkt

PC	Personal Computer
PKW	Personenkraftwagen
S	magnetischer Südpol
THC	unverbrannte Kohlenwasserstoffe
V	Volt, Einheit
Var.	Variante
Verg.	Vergaser
Vol.-%	Volumenprozent

Danksagung

In diesem Kapitel möchte ich allen Unterstützern dieser Arbeit für Ihren zeitlichen und finanziellen Einsatz danken. Da die im Rahmen dieser Ausarbeitung durchgeführten Arbeiten und Untersuchungen zu den wenigen gehören, die durch keine Firma, bzw. ein Unternehmen unterstützt wurden, war ich persönlich noch mehr auf die Hilfe meiner Familie, meiner Hochschule und meiner Freunde angewiesen. Für diese großzügige, hilfreiche und geduldige Unterstützung von allen Seiten möchte ich mich an dieser Stelle von Herzen und ausdrücklich bedanken!

Besonderen Dank möchte ich weiter an meinen betreuenden Professor Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Foken richten, welcher mir nicht nur stets mit Rat und Tat bezüglich jeder elektrotechnischen Frage zur Seite stand, sondern auch bereit war einen nicht geringen finanziellen Beitrag zur Umsetzung dieser Ausarbeitung zu leisten. Ebenso möchte ich meinem zweiten betreuenden Professor Herrn Dr.-Ing Steffen Zwahr vielmals danken, welcher für diese Ausarbeitung mit seinem Fachwissen und dem zur Verfügung stellen der notwendigen Messtechnik im Bereich der Motorentchnik einen nicht geringeren Beitrag geleistet hat. Einen großen Teil der Ausarbeitung hat die Fertigung und Montage der einzelnen Aufbauten eingenommen. Aus diesem Grund möchte darüber hinaus dem Werkstattmeister Jens Hamm und seinem Kollegen Frank Höltzel meinen größten Dank aussprechen. Die Arbeit mit den Händen und an den Maschinen hat mir noch immer die meiste Freude bereitet, welche durch die Gesellschaft, den Rat und die Unterstützung durch Herrn Hamm und Herrn Höltzel nur noch verstärkt wurde. Viele neue Fertigkeiten und Kenntnisse konnte ich weiter auch im Elektronik Labor von Herrn Ing. Bernd Mast sammeln, welcher mir viele neue Einblicke und Erkenntnisse in ein Arbeitsgebiet gewähren konnte, welches mich schon seit längerer Zeit interessiert hat. Ebenso für die tatkräftige Unterstützung bei der Entwicklung der elektronischen Schaltungen sowie für die mehrmalige Hilfe bei der Programmierung des Arduino Controllers möchte ich darüber hinaus noch meinem Kommilitonen und guten Freund Christian Dziurzik danken.

Zu Letzt möchte ich an dieser Stelle meinen persönlichen und herzlichsten Dank an zwei ganz besondere Personen richten, meine Mutter und meinen Vater, sowie an den Rest meiner geliebten Familie. Ohne Sie gäbe es das Fundament auf dem all dies gebaut wurde sicher nicht. Dank Ihrer Liebe, Ihrem Rat und Ihrem Tadel stehe ich da, wo ich heute stehen darf und dafür bin ich immer wieder sehr dankbar.

Das Geschenk der mentalen Kraft kommt von Gott, dem göttlichen Wesen, und wenn wir unseren Verstand auf diese Wahrheit richten, kommen wir in den Einklang mit der Großen Energie.

Nikola Tesla, 1856 – 1943

Halte dich von negativen Menschen fern. Sie haben ein Problem für jede Lösung.

Albert Einstein, 1879 - 1955

1 Einleitung

1.1 Thema

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Untersuchung von alternativen Gemischaufbereitungssystemen, basierend auf den Entdeckungen und Erfindungen von Paul Pantone und Thomas Ogle.

1.2 Kommentar zu Hauptinformationsquellen

Um das gewählte Thema sinnvoll bearbeiten zu können, musste man quasi zwangsläufig die englische Sprache beherrschen. Da diese Arbeit im Rahmen eines deutsch-englischen Masterkurses entstanden ist, wurde auch diese Arbeit bilingual verfasst. Aus diesem Grund wird auf Übersetzungen verzichtet.

Es gab zwar auch viele deutsche Foreneinträge und Internetseiten zum Thema GEET, jedoch sind diese meist wenig wissenschaftlich. Da die Informationen zum Teil aus verschiedenen Ländern zusammengetragen worden und Englisch die aktuelle Weltsprache dient, sind bedeutend mehr Informationen zum Thema GEET in Englisch als in Deutsch verfügbar.

Das 143 Seiten lange Manuskript der sogenannten „Panacea-BOCAF Online University“ (Link: <http://www.panacea-bocaf.org/contact.htm>) zum Thema GEET „geet fuel processor.pdf“¹ stellte sich als eine der ausführlichsten Quellen und Informationssammlungen zum Thema GEET heraus. Darin wurden viele Informationen verschiedener Quellen der letzten Jahrzehnte zusammengefasst. Die in diesem Dokument enthaltenen Erklärungsansätze sind im Vergleich zu anderen Informationen im Internet hinreichend wissenschaftlicher Natur. Sie schließen bereits bekannte thermodynamische Gesetze, wie zum Beispiel das sehr interessante Thermodynamische Moment, mit ein.

Darüber hinaus wurden die Patente der beiden Erfinder als Informationsquellen genutzt, auf welche später näher eingegangen wird.

¹ „geet fuel processor.pdf“ Online Datei, siehe Literaturverzeichnis

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel soll auf die bereits technisch eingesetzten Gemischaufbereitungssysteme, sowie bereits genutzte Restwärmegewinnung an Verbrennungsmotoren eingegangen werden.

2.1 Verbrennungsmotoren

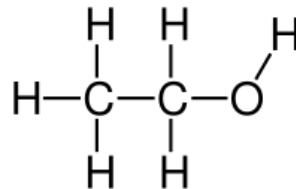
Da der Verbrennungsmotor als solcher schon bereits im Jahre 1928 durch Henry Fords bekanntes Model A in Großserie gefertigt wurde und darüber hinaus heutzutage in allen Bereichen der Industrie und der Fortbewegung zum Einsatz kommt sowie auch der breiten Öffentlichkeit zur Nutzung zur Verfügung steht, wurde an dieser Stelle nicht noch einmal explizit auf das grundlegende Prinzip dieser Kolbenkraftmaschine eingegangen.

2.2 Grundlegende Energiegewinnung durch Verbrennung

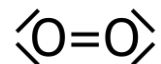
2.2.1 Verbrennung von Ethanol

Da in einem Kolbenmotor die mechanische Energie durch die Verbrennung von Kraftstoffen gewonnen wird, sollen im Folgenden die grundlegenden Prinzipien einer solchen Verbrennung, am Beispiel einer Ethanolverbrennung, erläutert werden. Ethanol ist ein Alkohol und wird bereits großflächig als alleinstehender Kraftstoff oder für Kraftstoffgemische, wie das bekannte ‚E10‘ (10% Ethanolanteil) für Ottomotoren, eingesetzt. In dafür vorgesehenen Motoren kann der Kraftstoff direkt und ohne Beimischung anderer Flüssigkeiten verwendet werden.

Die Summenformel für Ethanol lautet C_2H_5OH :



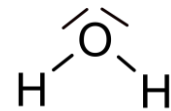
Das Ethanolmolekül besteht folglich aus zwei Kohlenstoff-, einem Sauerstoff- und sechs Wasserstoffatomen. Für die Energiegewinnung werden nun die Wasserstoffatome des Ethanols mit dem Sauerstoff der Luft in einer Verbrennung oxidiert. Da Sauerstoff in unserer Atmosphäre als kovalenter Homodimer auftritt, lautet die Strukturformel für Sauerstoff wie folgt:



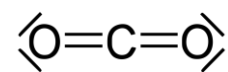
Wie aus der Chemie bereits bekannt, benötigt man nun für die stöchiometrische² Reaktion drei Sauerstoffmoleküle für ein Ethanolmolekül.



Als Reaktionsprodukte bleiben Wasser und Kohlendioxid übrig. Das Wasser entsteht aus der bereits genannten Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff und hat die rechts dargestellte Strukturformel.



Die übrigen Kohlenstoffatome reagieren ihrerseits ebenfalls mit dem Luftsauerstoff zu Kohlendioxid.



Die Reaktion lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen:

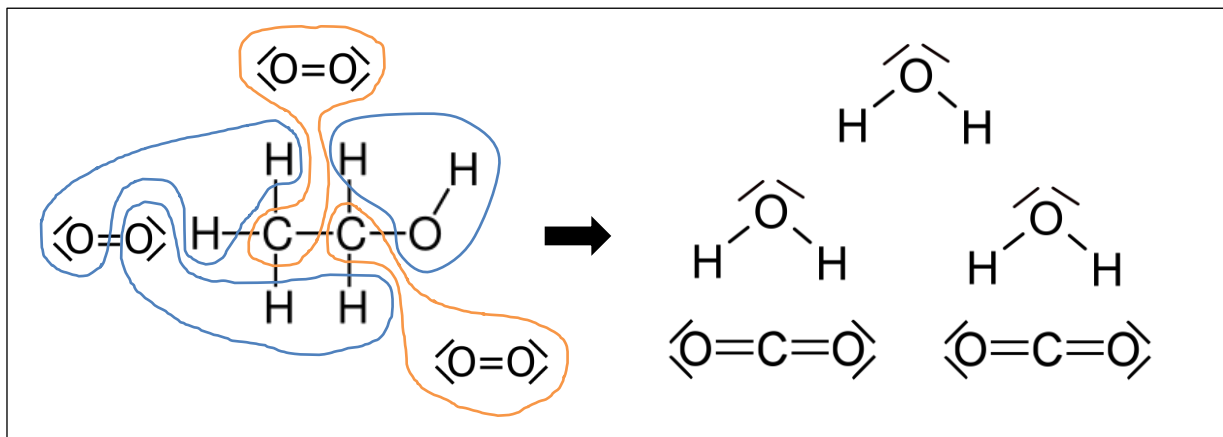
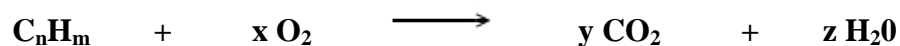


Abbildung 1: Ethanolverbrennung

Nahezu alle eingesetzten fossilen Kraftstoffe bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen unterschiedlicher Größen. Die grundlegende Verbrennungsreaktion bleibt jedoch gleich, wie die folgende allgemeine Schreibweise zeigen soll.



² Siehe auch Kap. 5.2.1 Stöchiometrie oder Verbrennungsluftverhältnis

2.2.2 Schadstoffe

Da die Verbrennung jedoch nicht immer vollkommen und stöchiometrisch³ abläuft, können auch Reaktionspartner fehlen oder überschüssig sein. Eine solche Verbrennung wird auch als unvollkommene Verbrennung bezeichnet. Die bei einer solchen Verbrennung entstehenden Verbindungen werden allgemein als Schadstoffe klassifiziert, da sie eine Gefahr für das Ökosystem, die Tierwelt und den Menschen darstellen.

Die erste Art der Schadstoffe sind die Kohlenstoffverbindungen CO und CO₂, wobei die Kohlenmonoxid-Verbindung CO deutlich toxischere Wirkung hat als die im Biokreislauf vorkommende Kohlenstoffdioxid-Verbindung; welche nichtsdestotrotz im Verdacht steht starken Einfluss auf das Klima zu nehmen und ebenfalls als Treibhausgas gilt.

Da für die Reaktion in einem typischen Verbrennungsmotor jedoch kein reiner Sauerstoff zum Einsatz kommt, sondern Luftsauerstoff (Bezeichnung für den Sauerstoff im Gasgemisch ‚Luft‘⁴), reagieren auch andere Bestandteile der Luft während der Verbrennung. Dies ist durch die hohen Temperaturen und Drücke während der Verbrennung zu erklären. Allen voran reagiert hauptsächlich noch Stickstoff mit dem vorhandenen Sauerstoff, da Stickstoff mit einem Anteil von circa 78 Vol.-% den größten Anteil des Gasgemisches Luft einnimmt. Auf Grund der vielen Oxidationsstufen des Stickstoffs können jedoch verschiedene Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen entstehen. Diese unterschiedlichen Verbindungen werden dabei unter dem Begriff ‚Stickoxide‘ zusammengefasst und mit der Strukturformel NO_x ausgedrückt. Die häufigsten sind Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO₂. Diese Stickoxide zählen zu den Schadstoffen und sind unerwünschte Nebenprodukte der Verbrennung mit Luft, statt reinem Sauerstoff.

Die letzte Gruppe der am häufigsten auftretenden Schadstoffe am Verbrennungsmotor ist die der unverbrannten Kohlenwasserstoffe. Wie der Name schon verrät sind dies Kraftstoff-Verbindungen, welche bei der Oxidationsreaktion nicht vollständig mit Sauerstoff reagieren konnten. Es bleiben folglich unterschiedlich große Kraftstoff- bzw. Kohlenwasserstoffmoleküle zurück. Kohlenwasserstoffe werden allgemein unter der Strukturformel HC (für ‚hydrocarbons‘) zusammengefasst. Für die Analyse als Schadstoff wird zusätzlich zwischen der gesamten Menge an unverbrannten Kohlenwasserstoffen (THC) und den Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen (NMHC) unterschieden.

³ Siehe auch Kap. 5.2.1 Stöchiometrie oder Verbrennungsluftverhältnis

⁴ Zitat aus <https://de.wikipedia.org/wiki/Luft>:

„Als Luft bezeichnet man das Gasgemisch der Erdatmosphäre. Trockene Luft besteht hauptsächlich aus den zwei Gasen Stickstoff (rund 78,08 Vol.-%) und Sauerstoff (rund 20,95 Vol.-%). Daneben gibt es noch die Komponenten Argon (0,93 Vol.-%), Kohlenstoffdioxid (0,04 Vol.-%) und andere Gase in Spuren. Gasförmiges Wasser (Wasserdampf) ist im Mittel zu 1,3 Vol.-% in Bodennähe und zu 0,4 Vol.-% in der gesamten Erdatmosphäre enthalten, bei den obigen Werten aber nicht mitgerechnet.“

2.3 Gemischbildung und Verbrennung am Ottomotor

Zum Betrieb eines Verbrennungsmotors, egal für welchen Kraftstoff dieser Konzipiert ist, muss grundlegend ein Gemisch aus Kraftstoff und Sauerstoff (in Form von Luftsauerstoff) hergestellt werden. Im Folgenden soll deshalb genauer auf die wichtigsten Faktoren bei der Gemischbildung eingegangen werden. Dieses Gemisch wird dem Brennraum zugeführt und durch einen Energieeintrag entzündet. Dieser Energieeintrag kann durch einen Zündfunken oder die Kompression des Gemisches, mit daraus resultierender Erwärmung bis zum Punkt der Selbstentzündung, erfolgen. Das Prinzip der Zündung kommt dabei für Kraftstoffe mit hohem Flammpunkt (z.B. Benzin, Erdgas, etc.) zum Einsatz und das Prinzip der Selbstentzündung bei Kraftstoffen mit niedrigem Flammpunkt (z.B. Diesel, Biodiesel, Schweröl, etc.). Nach der Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches findet der Verbrennungsprozess statt. Die durch die Verbrennung frei werdende Energie wird durch einen Kolbentrieb in mechanische und thermische Energie, in Form von Rotation an der Kurbelwelle, umgewandelt und so nutzbar gemacht.

Die Effizienz und der Schadstoffausstoß hängen maßgeblich von der „Qualität“ der Verbrennung ab und diese wiederum von unterschiedlichen Faktoren. Auf die wichtigsten soll im Folgenden näher eingegangen werden.

2.3.1 Stöchiometrie oder Verbrennungsluftverhältnis

Da in der Verbrennungskraftmaschine Kraftstoffe mit Luftsauerstoff reagieren sollen, spielt das Verhältnis zwischen Kraftstoff und zur Verfügung stehendem Luftsauerstoff eine primäre Rolle für die Gemischbildung. Das sog. Verbrennungsluftverhältnis kann wie folgt definiert werden:

Das Verbrennungsluftverhältnis setzt die tatsächlich für eine Verbrennung zur Verfügung stehende Luftmasse m_{L-tats} ins Verhältnis zur mindestens notwendigen stöchiometrischen Luftmasse m_{L-st} , die für eine vollständige Verbrennung benötigt wird:

$$\lambda = \frac{m_{L-tats}}{m_{L-st}}$$

Für den Zahlenwert ist der Grenzwert 1 von besonderer Bedeutung:

- Ist $\lambda = 1$, so gilt das Verhältnis als **stöchiometrisches Verbrennungsluftverhältnis** mit $m_{L-tats} = m_{L-st}$; das ist der Fall, wenn alle Brennstoff-Moleküle vollständig mit dem Luftsauerstoff reagieren, ohne dass Sauerstoff fehlt oder unverbrannter Kraftstoff übrig bleibt (**vollständige Verbrennung**).
- $\lambda < 1$ (z. B. 0,9) bedeutet „Luftmangel“ (bei Verbrennungsmotoren spricht man von einem *fetten* oder auch *reichen* Gemisch)
- $\lambda > 1$ (z. B. 1,1) bedeutet „Luftüberschuss“ (bei Verbrennungsmotoren spricht man von einem *mageren* oder auch *armen* Gemisch)

Aussage: $\lambda = 1,1$ bedeutet, dass 10 % mehr Luft an der Verbrennung teilnimmt, als zur stöchiometrischen Reaktion notwendig wäre. Dies ist gleichzeitig der *Luftüberschuss*.

Abbildung 2: Definition Verbrennungsluftverhältnis⁵

⁵ <https://de.wikipedia.org>; siehe Literaturverzeichnis

Das Verbrennungsluftverhältnis λ gibt also an, ob dem Motor genügend Luftmenge zum vorhandenen Kraftstoff zugeführt wurde und sollte im Idealfall bei $\lambda=1,0$ liegen. Ein Luftmangel, bzw. Luftüberschuss, hat Auswirkungen auf die Leistung und den Kraftstoffverbrauch des Motors. Der zugrunde liegende Zusammenhang wird in der Abbildung⁶ rechts dargestellt. Da die Leistung jedoch maßgeblich von der Drehzahl abhängt, gilt diese Art der Darstellung nur für einen stationären Lastfall. Bei konstanter Drehzahl ist der Kennwert λ folglich ein Maß für die Arbeitsfähigkeit, bzw. das Drehmoment des Motors.

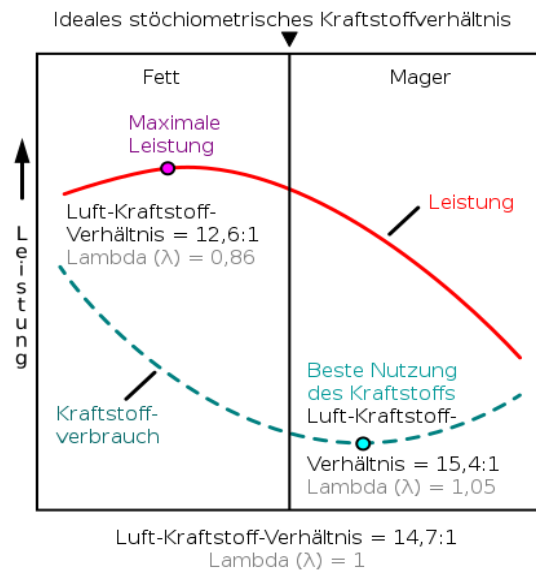


Abbildung 3: Stöchiometrisches Kraftstoffverhältnis

Da das Verbrennungsluftverhältnis λ auch die Verbrennungstemperatur bestimmt, hat es in Folge dessen auch maßgebliche Auswirkungen auf den Schadstoffausstoß des Motors. Der Zusammenhang zwischen λ und den ausgestoßenen Schadstoffen wird in einer sogenannten Abgaskurve visualisiert, welche beispielhaft im Folgenden dargestellt wird:

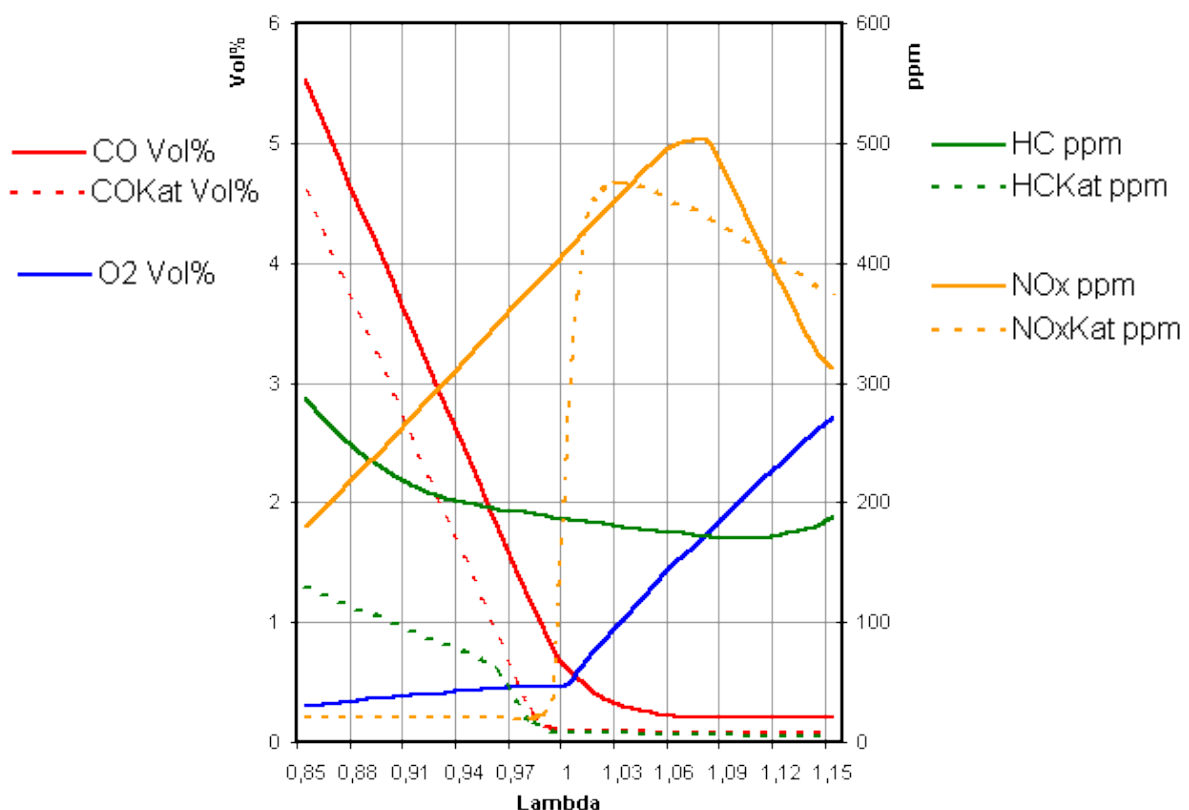


Abbildung 4: Abgaskurve Beispiel⁷

⁶ <https://de.wikimedia.org>; siehe Literaturverzeichnis

⁷ <http://www.biat.uni-flensburg.de>, siehe Literaturhinweise

Für eine gute Verbrennung ist jedoch nicht nur die chemische Stöchiometrie des Gemisches entscheidend, sondern auch der Grad der Homogenisierung der Reaktionspartner. Dies muss getrennt betrachtet werden, da der Kennwert λ nur eine allgemeine Aussage über die Verfügbarkeit von Luftsauerstoff im Motor darstellt, unberücksichtigt der örtlichen Lage der Reaktionspartner.

2.3.2 Homogenes Gemisch

Ein weiterer wichtiger Faktor für eine gute Verbrennung ist die Homogenität des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Die Homogenität beschreibt dabei allgemein die räumliche Lage unterschiedlicher Stoffe in einem vorgegebenen Raum, wobei man zwischen einem homogenen, einem heterogenen und einem inhomogenen Gemisch unterscheidet. Man spricht von einem homogenen Gemisch, wenn die unterschiedlichen Stoffe gleichmäßig vermischt sind, von einem heterogenen Gemisch, wenn die unterschiedlichen Stoffe im Raum lokale Anhäufungen zeigen und von einem inhomogenen Gemisch, wenn die unterschiedlichen Stoffe räumlich klar getrennt sind. Zur Vereinfachung werden die drei Zustände an unterschiedlichen Flüssigkeitsgemischen veranschaulicht:

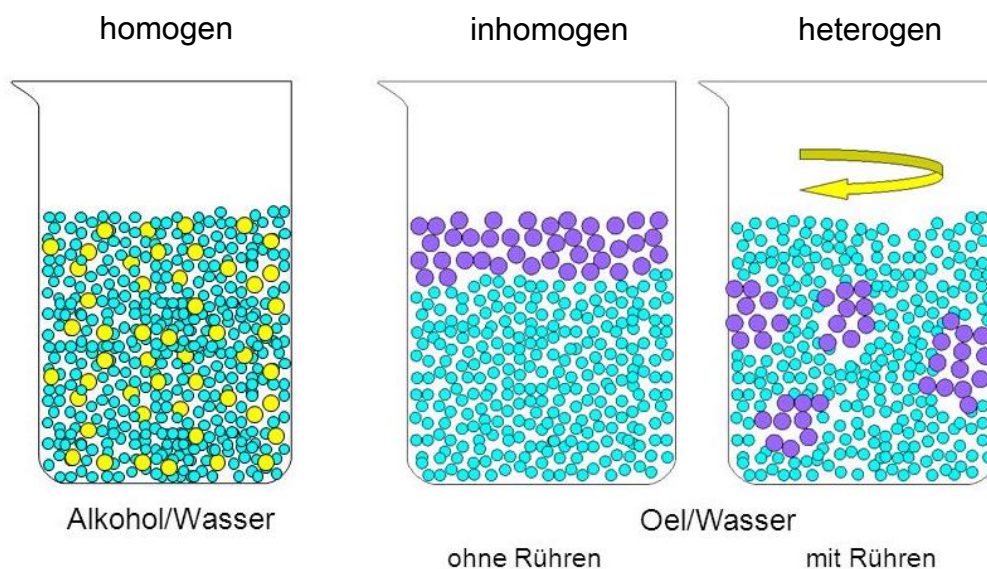


Abbildung 5: Homogenität

Für eine gute Verbrennung ist es nun wichtig, dass auch das Kraftstoff-Luft-Gemisch, welches dem Verbrennungsmotor zugeführt wird, möglichst homogen durchmischt ist. Dies führt zu einer besseren und schnelleren Verbrennungsreaktion nach der Zündung, siehe Kapitel 5.2.4 Verbrennung und Flammenfront.

2.3.3 Aggregatzustände der Reaktionspartner

Für die chemische Reaktion der Verbrennung ist es notwendig, dass die Reaktionspartner denselben Aggregatzustand aufweisen. In den häufigsten Fällen ist es jedoch so, dass nur der Sauerstoff, bzw. die Luft, in gasförmigem Zustand zur Verfügung stehen. Die Reaktionspartner werden in den meisten Fällen flüssig (Benzin, Ethanol, Öl, Diesel, Wachs, etc.) oder in fester Form (Holz, Kohle, etc.) für die Verbrennung bereitgestellt, manchmal jedoch ebenfalls im gasförmigen Zustand (Methan, Ethan, etc.). In den Fällen in denen feste oder flüssige Reaktionspartner zum Einsatz kommen findet eine Umwandlung des Aggregatzustandes vor der eigentlichen Verbrennungsreaktion statt. Bei der Verbrennung von Holz zum Beispiel findet durch die eingebrachte Wärme (Flamme) zuerst eine sogenannte Vergasung statt. Dabei entsteht das sogenannte Holzgas, welches dann wiederum mit der Luft reagiert/verbrennt und die eigentliche Flamme über dem Holz erzeugt. Unter Luftmangel kann dieses Holzgas auch in sogenannten Holzvergasern produziert werden (ähnlich dem Prozess des Kohlenmeilerns) und mit diesem wiederum Verbrennungsmotoren betrieben werden. Der Betrieb in einem PKW ist ebenfalls möglich, wie bereits mehrfach gezeigt wurde:



Abbildung 6: PKW mit Holzvergaser⁸

Wird der Kraftstoff in flüssiger Form bereitgestellt, findet ebenfalls eine Umwandlung des Aggregatzustandes in die Gasphase statt bevor die eigentliche Verbrennungsreaktion abläuft. Auf den genauen Ablauf der Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Gasförmig stehen zum Beispiel Kraftstoffe wie Propan zur Verfügung, welches beispielsweise Einsatz in Gabelstaplern mit Verbrennungsmotoren findet. Propan wird zwar unter hohem Druck flüssig in einem Hochdruckbehälter gespeichert, ist jedoch bei Umgebungsdruck gasförmig. Vor der Zufuhr in den Verbrennungsmotor wird es deshalb in einem Verdampfer unter Absenkung auf Umgebungsdruck verdampft und anschließend für die Verbrennung mit Luft vermischt.

⁸ <https://upload.wikimedia.org>, siehe Literaturhinweise

2.3.4 Verbrennung und Flammenfront

Welchen Einfluss die zuvor genannten Faktoren der Stöchiometrie, Homogenität und der Aggregatzustände auf die Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches haben, soll nun an zwei unterschiedlichen Zuständen in einem Verbrennungsmotor schematisch und schrittweise dargestellt werden. Ein wichtiger Faktor für die Verbrennung ist die Geschwindigkeit der Flammenfront. Je schneller die Flammenfront durch das Gemisch laufen kann, desto schneller kann der Kraftstoff verbrannt werden und desto mehr Energie kann auf Grund des Impulses freigesetzt werden. Eine solche sehr schnelle Verbrennung wird auch als Explosion bezeichnet und ist selbstverständlich in einer Verbrennungskraftmaschine gewollt.

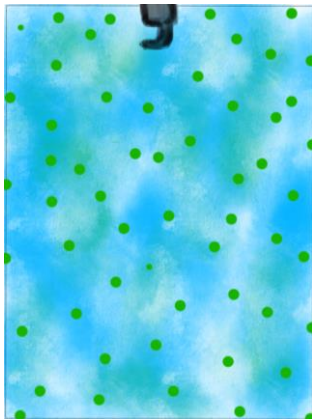
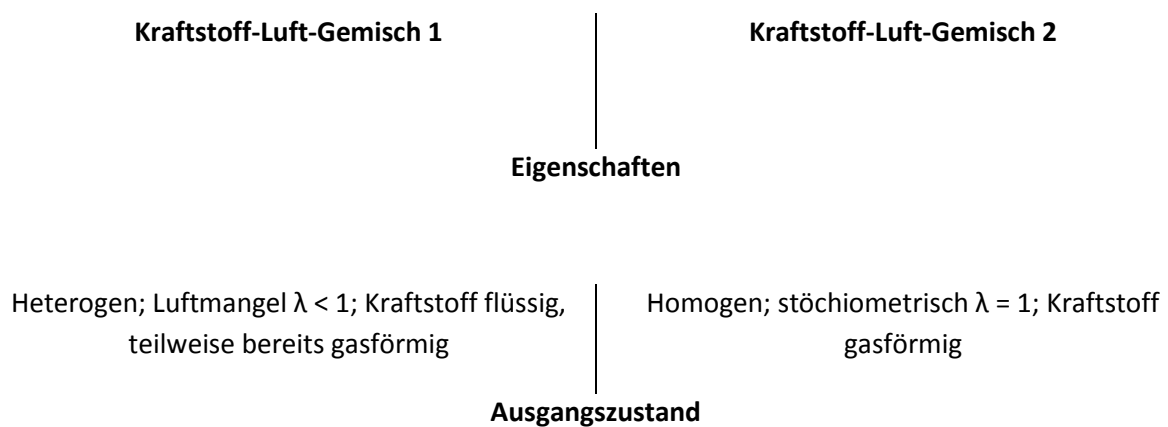


Abbildung 7: Verbrennung Gemisch 1 Ausgangszustand

Der Kraftstoff ist flüssig in kleinen Tropfen (grüne Punkte) heterogen mit der Luft (blau) vermischt, dazwischen befinden sich bereits zündfähige Gasgemische aus Luft und gasförmigem Kraftstoff (blau/grün).



Abbildung 8: Verbrennung Gemisch 2 Ausgangszustand

Der Kraftstoff ist bereits gasförmig (grün) und homogen mit der Luft (blau) vermischt.

Einbringen der Zündenergie

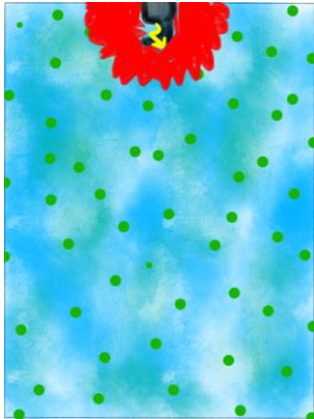


Abbildung 9: Verbrennung Gemisch 1 Zündenergie



Abbildung 10: Verbrennung Gemisch 2 Zündenergie

Die Verbrennungsreaktion wird durch einen Zündfunke (gelb) gestartet und ausgehend von diesem breitet sich eine Flammenfront (rot) im Brennraum aus.

Ausbreitung der Flammenfront

Die Flammenfront (rot) breitet sich im Kraftstoff-Luft Gemisch (grün/blau) aus. ‚Vor‘ der Flammenfront befindet sich folglich unverbranntes Gemisch (grün/blau), ‚in‘ der Flammenfront (rot) findet die Reaktion statt und ‚hinter‘ ihr befinden sich die ersten Abgase (hellbraun).



Abbildung 11: Verbrennung Gemisch 1 Flammenfront

In Gemisch 1 erreicht die Flammenfront (rot) einen Tropfen (grüne Punkte), dieser wird im Folgenden genauer betrachtet.

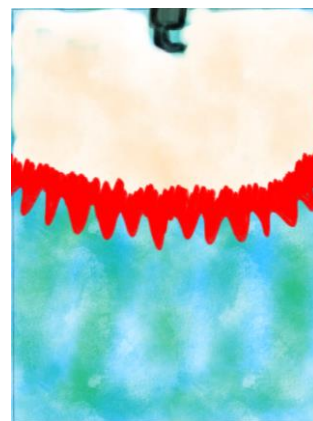


Abbildung 12: Verbrennung Gemisch 2 Flammenfront

Da der Kraftstoff (grün) in Gemisch 2 gasförmig vorliegt, kommt es nicht zur Tröpfchenbildung. Die Flammenfront (rot) kann durch die Homogenität des Kraftstoff-Luft-Gemisches (grün/blau) schnell durch den Brennraum laufen.

Detailansicht Tropfen (Gemisch 1)

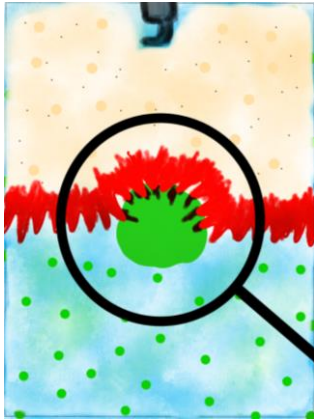


Abbildung 13: Verbrennung Gemisch 1 Tropfen I

Die Flammenfront (rot) erreicht den Rand des Kraftstofftropfens (grüner Kreis). Hier liegt der Kraftstoff nicht mehr gasförmig vor, wie im Rest des Brennraums, sondern flüssig, was Einfluss auf die Verbrennung nimmt. Am Rand können Kraftstoff und Luftmoleküle noch miteinander reagieren und es kommt zur Verbrennung (schwarz), im Inneren des Tropfens bleiben jedoch teilweise verbrannte oder sogar unverbrannte Kraftstoffmoleküle zurück, da der Kraftstoff hier noch flüssig ist und für eine vollständige Verbrennung nicht genügend Luftsauerstoff (blau) zur Verfügung steht.

Es kann also nur der Teil des Kraftstoffes verbrannt werden, der gasförmig mit der Luft vermischt ist und so ein zündfähiges Gemisch ergibt.



Abbildung 14: Verbrennung Gemisch 1 Tropfen II

Nachdem die Flammenfront (rot) den Tropfen (grün) passiert hat bleiben verschiedene Reaktionsprodukte übrig:

- Am Rand des Tropfens konnte eine annähernd vollständige Verbrennung stattfinden, deshalb findet man in diesem Bereich ‚normale‘ Abgase wie CO_2 (hellbraun).
- In der nächst tiefer gelegenen Schicht herrschte zum Zeitpunkt der Reaktion bereits ein Sauerstoffmangel, auf Grunde dessen hier teilweise unverbrannte Kraftstoffanteile zu finden sind (schwarz). Ein typisches Abgas für diesen Bereich ist das Kohlenmonoxid CO (schwarz), bei dem sich sofort das fehlende Sauerstoffatom (im Vergleich zum CO_2) erkennen lässt.
- Ist der Tropfen groß genug, bleiben auch unverbrannte Kraftstoffanteile zurück (grün, mittig im Tropfen). Diese stellen dabei die unverbrannten Kohlenwasserstoffe, THC genannt, dar, welche als besonders gefährliche Schadstoffe ausgestoßen werden.

Fortlaufen der Flammenfront



Abbildung 15: Verbrennung Gemisch 1 Geschwindigkeit

Durch die Heterogenität des Kraftstoff-Luft-Gemisches (grün/grüne Punkte/blau) breitet sich die Flammenfront (rot) unterschiedlich schnell in dem Gemisch aus.

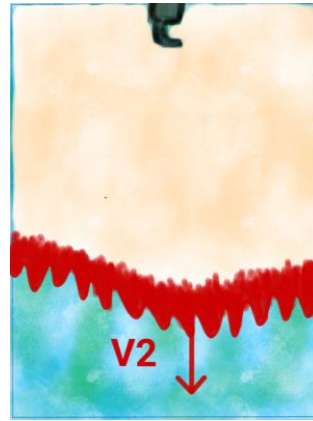


Abbildung 16: Verbrennung Gemisch 2 Geschwindigkeit

Durch die Homogenität des Gemisches (grün/blau) breitet sich die Flammenfront schnell und gleichmäßig im Brennraum aus.

Zwischen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten (über die Brennräume gemittelt) der Flammenfronten V1 und V2 besteht dementsprechend folgender Zusammenhang:

$$V1 < V2$$

Verlauf der Verbrennung und Ergebnis

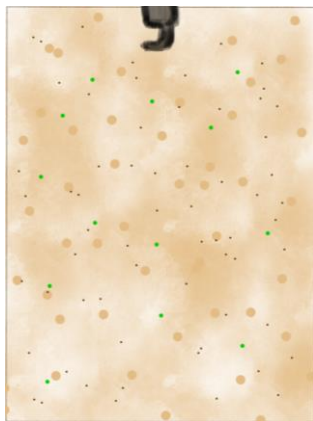


Abbildung 17: Verbrennung Gemisch 1 Ergebnis

Da die Verbrennung langsamer ablief und eine unvollständige Verbrennung des Kraftstoffes stattfand, bleiben viele Schadstoffe zurück. Darunter Abgase wie Kohlenstoffdioxid CO_2 (hellbraun, hellbraune Punkte), Kohlenstoffmonoxid CO (schwarze Punkte) oder unverbrannte Kohlenwasserstoffe THC (grüne Punkte).



Abbildung 18: Verbrennung Gemisch 2 Ergebnis

Die Verbrennung läuft schnell ab und es bleiben deutlich weniger Schadstoffe zurück. Das Abgas besteht hauptsächlich aus weniger schädlichem Kohlenstoffdioxid CO_2 .

Es zeigt sich also, dass gute Stöchiometrie und Homogenität des Gemisches deutlich zur Effektivität der Verbrennung und der Reduzierung des Schadstoffausstoßes beitragen.

2.4 Gemischbildungssysteme

2.4.1 Vergaser

Eine immer noch häufig eingesetzte Möglichkeit der Gemischaufbereitung für einen Verbrennungsmotor ist die des Vergasers. Grundlegend funktionieren alle Vergaser nach einem ähnlichen Prinzip. Die unten dargestellte Abbildung zeigt das Funktionsprinzip dieser Gemischbildung. Die vom Motor angesaugte Luft (blau) wird in einer Venturi-Düse durch die Verengung des Strömungsquerschnittes beschleunigt. Durch die so erhöhte Strömungsgeschwindigkeit sinkt der Druck in der Verengung und mit Hilfe des so erzeugten Unterdruckes wird der Kraftstoff durch eine Düse (rot) gezogen und im Luftstrom zerstäubt (rot).

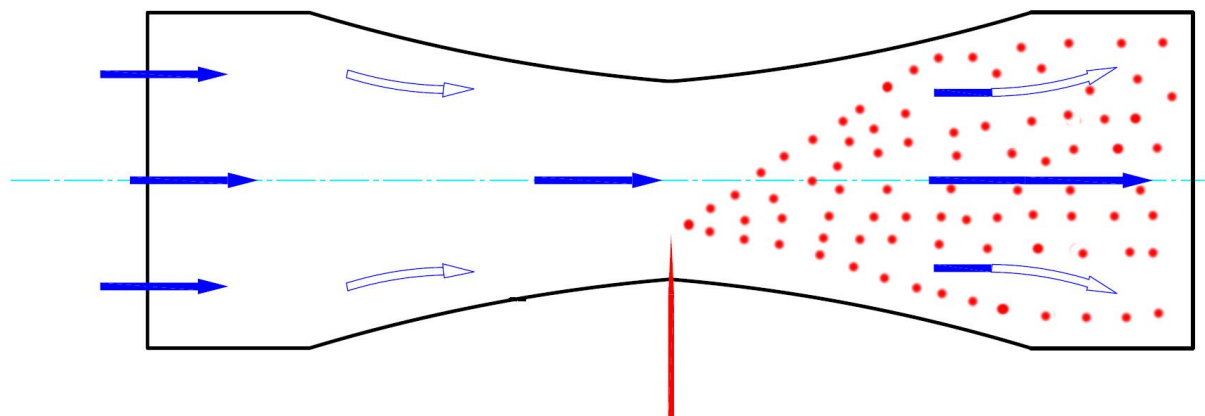


Abbildung 19: Funktionsprinzip Vergaser⁹

Dieses einfache Prinzip einer solchen Kraftstoffzerstäubung wurde seit seiner Erfindung, bereits Ende des 19. Jahrhunderts zusammen mit dem Otto-Motor, stets weiter optimiert und kommt noch heute, eben wegen seiner Einfachheit, viel zum Einsatz. Anwendung findet der Vergaser in so gut wie allen Bereichen in denen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Dabei wird der Vergaser häufig für Anwendungen gewählt die kostengünstig, simpel und möglichst wartungsfrei sein sollen. Verzichtet wird dafür im Gegenzug auf eine optimale Gemischbildung, was Verschlechterungen bei der Effizienz und dem Schadstoffausstoß zur Folge hat. Dies liegt daran, dass mit der Vergasermethode nur relativ große Tröpfchen erzeugt werden können, was die Qualität der Verbrennung negativ beeinflusst (siehe Kapitel 5.2.4 Verbrennung und Flammenfront).

⁹ <http://aeviate.de>, siehe Literaturhinweise

Einen kleinen Einblick in die Vielzahl der möglichen Anwendungsgebiete zeigt die folgende Auflistung:

- Mobilität:
 - Motorroller
 - Motorräder
 - Kraftfahrzeuge

- Stationäre Energieerzeugung:
 - Mobile Notstromaggregate (wie im Beispiel dieser Ausarbeitung)
 - Stationäre Notstromaggregate
 - Mobile / Stationäre Pumpen

- Handgehaltene Werkzeuge:
 - Kettensägen
 - Trennschleifer
 - Bodenbohrapparate

2.4.2 Saugrohreinspritzung

Ebenfalls bereits Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt wurde das sogenannte Benzin-Einspritz-Verfahren. Dabei wird der Kraftstoff (damals hauptsächlich Benzin) mit Hilfe einer Pumpe durch eine Düse in den Ansaugtrakt des Motors gespritzt. „Die Idee der Benzineinspritzung ist fast so alt wie der Verbrennungsmotor selbst: Schon 1884 konstruierte Johannes Spiel bei der Halleschen Maschinenfabrik einen Stationärmotor mit einer mechanischen Einspritzpumpe.“¹⁰

Später wurde das Prinzip durch immer bessere Pumpen, was höhere Arbeitsdrücke ermöglichte, sowie feinere Düsen, was zur besseren Zerstäubung des Kraftstoffes beiträgt, stetig optimiert. Die Abbildung rechts zeigt schematisch den grundlegenden Aufbau einer Saugrohreinspritzanlage.

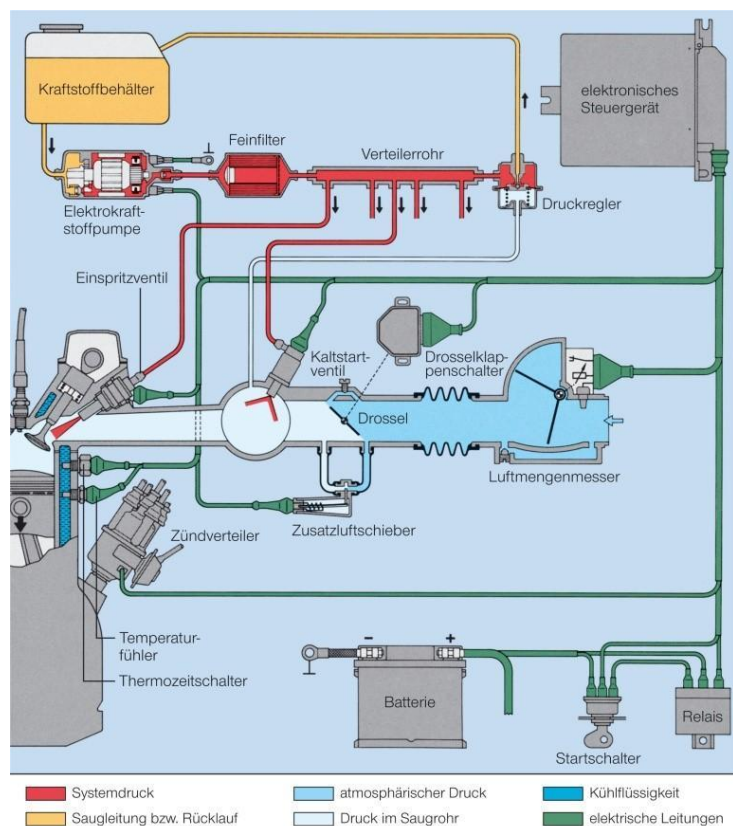


Abbildung 20: Saugrohreinspritzung

¹⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Benzineinspritzung>

2.4.3 Direkteinspritzung

Auch die Direkteinspritzung, bei der der Kraftstoff nicht in den Ansaugtrakt des Motors, sondern direkt in den Brennraum eingespritzt wird, wurde im selben Zeitraum entwickelt. Zu Beginn jedoch nicht am Otto-Motor sondern parallel dazu bei der Entwicklung des Diesel-Prozesses:

„Herbert Akroyd Stuart konstruierte 1886 den Glühkopfmotor mit einer direkten Einspritzung (durch den Zylinderraum in den Glühkopf). Bei Glühkopfmotoren sind die Anforderungen an Einspritzdruck und -zeit gering. Auch Rudolf Diesel versuchte sich um 1890 an einer direkten Einspritzung, es gelang ihm aber nicht, eine Pumpe zu bauen, die einerseits den dafür notwendigen hohen Druck liefern konnte und andererseits genau genug regelbar war. Deshalb verwendete er eine Dosierpumpe mit niedrigem Druck und einen Luftkompressor, um den Treibstoff mit Druckluft fein im Brennraum zu verteilen. Derartige Motoren bewährten sich in ortsfesten Antrieben, ab 1903 in der Binnenschifffahrt und ab 1910 in Hochseeschiffen.“¹¹

Die folgende Abbildung zeigt einen direkten Einspritzvorgang in den Zylinder:

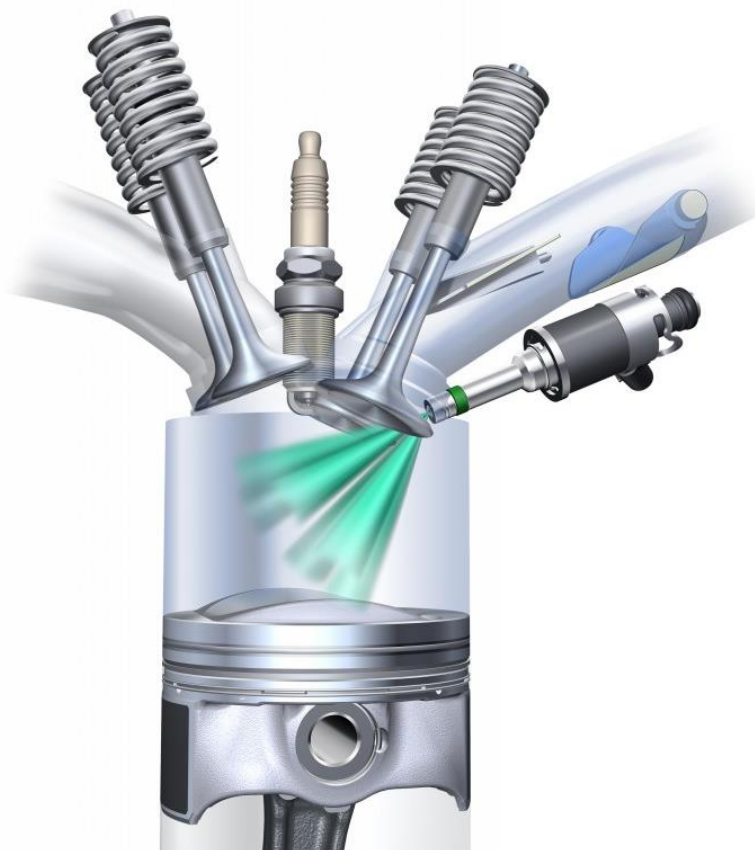


Abbildung 21: Direkteinspritzung¹²

¹¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Direkteinspritzung>

¹² https://www.audi-technology-portal.de/files/images/517/bild_2.151_brennraum__large.jpg

Auf Grund seiner feineren Zerstäubung wird das Direkteinspritz-System seit der Entwicklung immer häufiger eingesetzt. Durch moderne Pumpen, Leitungen und Düsen arbeiten die Systeme heutzutage mit Drücken über 3000 bar. Dies ermöglicht eine sehr feine Zerstäubung des Kraftstoffes, wodurch sich eine deutlich bessere Effizienz und Schadstoffemission im Vergleich zu einem Vergaser feststellen lässt. Darüber hinaus werden Direkteinspritzsysteme für eine Vielzahl von Kraftstoffen eingesetzt.

Anwendung finden Einspritzsysteme ebenfalls in so gut wie allen Bereichen in denen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Auf Grund ihrer höheren Komplexität kommen sie jedoch nur dort zum Einsatz, wo eine bessere Effizienz und verbesserter Schadstoffausstoß sowie höhere Leistung die höheren Produktionskosten rechtfertigen. Einen kleinen Einblick in die möglichen Anwendungsgebiete zeigt die folgende Auflistung:

- Mobilität:
 - Motorräder
 - Kraftfahrzeuge
 - Lastkraftwagen
 - Flugzeuge
 - Schiffe

- Stationäre Energieerzeugung:
 - Notstromaggregate
 - Blockheizkraftwerke

2.4.4 Alternative Systeme

Neben den klassischen Gemischaufbereitungssystemen, welche bereits in den Kapiteln 5.1 bis 5.3 beschrieben wurden, gibt es noch weitere Systeme zur Herstellung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches am Verbrennungsmotor. Eine immer häufiger eingesetzte Möglichkeit ist die Einspritzung von gasförmigen Kraftstoffen wie Propan (C_3H_8), Erdgas (hauptsächlich Methan CH_4) oder Autogas (auch LPG genannt; aus dem Englischen *Liquefied Petroleum Gas*; Mischung aus Propan C_3H_8 und Butan C_4H_{10}) in den Ansaugtrakt eines Verbrennungsmotors.

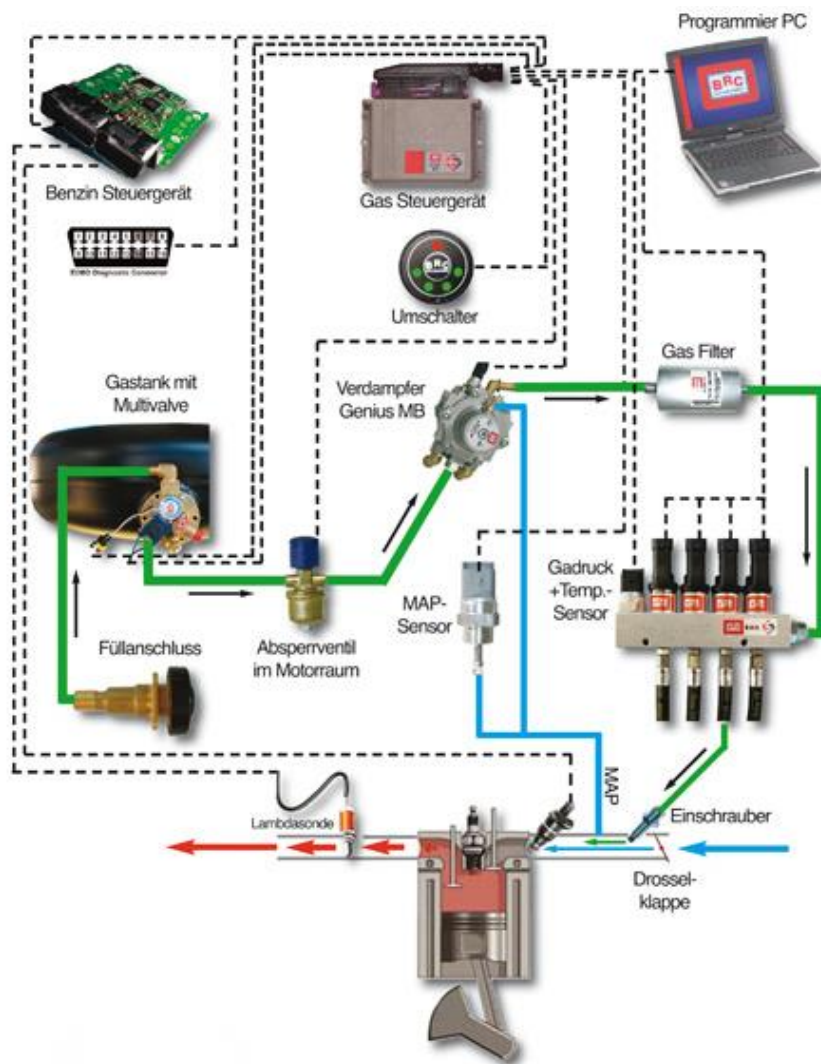


Abbildung 22: Gasanlage¹³

Dabei wird der Kraftstoff unter hohem Druck verflüssigt und in einem drucksicheren Tank gespeichert. Um den flüssig gespeicherten Kraftstoff nun vor der Einspritzung zu verdampfen wird dieser durch einen Druckregler geleitet, in welchem sich sein Druck auf Umgebungsdruck reduziert. Da die Siedetemperaturen (-162°C für Methan, -42°C für Propan) der verwendeten Kraftstoffe deutlich unter den üblichen Umgebungstemperaturen liegen, wechseln die Kraftstoffe durch die Reduzierung des Druckes automatisch in die Gasphase. Anschließend wird der bereits verdampfte Kraftstoff mit Luft vermischt und das Gemisch dem Brennraum zugeführt.

¹³ http://www.blomenkemper.com/schema_sq_lpg.jpg

2.5 Wirkungsgrad

Da der Verbrennungsmotor primär zur Erzeugung von mechanischer Energie in Form von Rotation eingesetzt wird, wird auch bei der Effektivitätsbetrachtung die gewonnene mechanische Energie gegenüber der eingebrachten Energie in Form von Kraftstoff betrachtet. Dieses Verhältnis wird als sogenannter Wirkungsgrad wiedergegeben:

„Der Wirkungsgrad einer technischen Einrichtung oder Anlage ist eine Größe der Dimension Zahl und beschreibt in der Regel das Verhältnis der Nutzenergie E_{ab} zur zugeführten Energie E_{zu} . Wenn keine Verfälschung durch gespeicherte Energie erfolgt, kann auch mit der Leistung gerechnet werden: Verhältnis der Nutzleistung P_{ab} zur zugeführten Leistung P_{zu} . Üblicherweise wird der Wirkungsgrad mit dem griechischen Buchstaben η (eta) bezeichnet.

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}}$$

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

¹⁴

Da der Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors jedoch stark vom Lastfall und der Motorart abhängig ist, gibt es stark unterschiedliche Angaben zum allgemeinen Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors. Moderne Schiffsdiesel zum Beispiel, bei denen auch die Abwärme nutzbar gemacht wird, erreichen einen Wirkungsgrad von bis zu 50%. Die im großen Stil eingesetzten Ottomotoren im PKW-Sektor erreichen heutzutage üblicherweise einen Wirkungsgrad von etwa 33%, wie in der folgenden Abbildung schematisch und ausdrücklich beispielhaft dargestellt wird:

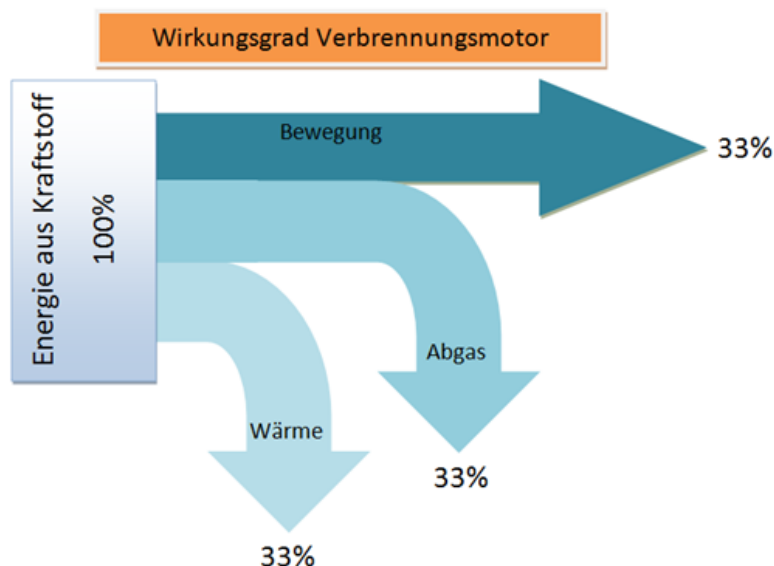


Abbildung 23: Wirkungsgrad Verbrennungsmotor¹⁵

¹⁴ <https://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad>

¹⁵ <http://www.cbcity.de>, siehe Literaturhinweise

Zieht man nun zusätzlich die Wirkungsgrade für ein Gesamtsystem hinzu, wie im folgenden Falle für einen PKW, lässt sich die weitere Abnahme des gewollten Wirkungsgrades (in diesem Falle die Bewegungsenergie) erkennen:

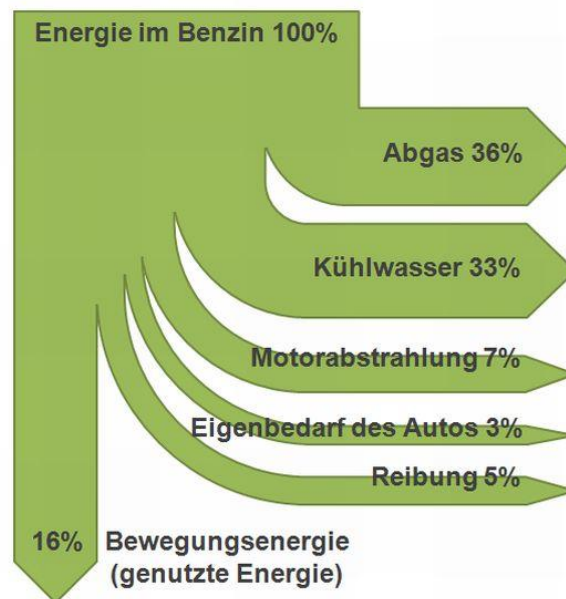


Abbildung 24: Wirkungsgrad PKW¹⁶

Deutlich sichtbar wird in beiden Abbildungen, dass der größte Teil der eingebrachten Energie in Form von Abgas, bzw. über das Kühlwassersystem des Motors, verloren geht. Insgesamt gehen so fast 70% der eingebrachten Energie in Form von ungenutzter Restwärme verloren.

2.6 Abgaswärmerückgewinnung an Verbrennungsmotoren

Auch wenn sich die Wärmeverluste bei Verbrennungsmotoren auf fast 70% belaufen, wird nur bei den wenigsten Applikationen die Restwärme im Abgas, bzw. im Kühlwasser genutzt. Für die drei Hauptgruppen im Einsatzgebiet der Verbrennungsmotoren soll nun im folgenden Kapitel betrachtet werden, ob eine Abgaswärmerückgewinnung stattfindet und falls ja, wie.

¹⁶ <https://www.greengear.de>, siehe Literaturhinweise

2.6.1 PKW- und Nutzfahrzeugmotoren

Auch wenn der PKW- und Nutzfahrzeuge-Sektor das wohl größte Einsatzgebiet der Verbrennungsmotoren darstellt, kommen hier keine Techniken der Wärmerückgewinnung in großen Stückzahlen zum Einsatz. Für gewöhnlich wird hier das Abgas zur Schadstoffreduzierung mittels Katalysatoren etc. nachbehandelt und zur Lärmreduzierung durch Schalldämpfer geführt. Eine Nutzung der Restwärme findet nicht statt. Auch bei der Restwärme im Kühlwasser kann von keiner effektiven Nutzung der Abwärme gesprochen werden. Ein Teil der Restwärme wird hier zwar über Wärmetauscher zur Klimatisierung des Innenraums oder zum Vorheizen von Dieselmotoren genutzt, jedoch werden hier deutlich geringere Wärmemengen benötigt als insgesamt (vor allem bei Vollast) durch den Motor zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus besteht auch nicht immer ein Bedarf an Wärme für die Klimatisierung des Innenraums. Im Sommer beispielsweise wird keine Wärme im Innenraum benötigt. Der Rest der vorhandenen Wärme des Kühlwassers wird über einen Wärmetauscher, welcher am Fahrzeug angebracht ist, an die Umgebungsluft abgegeben und somit nicht effektiv nutzbar gemacht.

2.6.2 Schiffbau und Luftfahrt

Auch in der Luft- und Schifffahrt kommen Verbrennungsmotoren zwar sehr häufig vor, doch auch hier findet keine effektive Abwärmenutzung von Abgas und Kühlwasser statt. Vor allem im Bereich des Schiffbaus kommen bis heute nahezu ausschließlich Verbrennungsmotoren zum Einsatz, bei denen die überschüssige Abwärme des Kühlwassers über Wärmetauscher an das Umgebungswasser, auf dem das Schiff fährt, abgegeben wird. Ein Teil der Kühlwasserwärme wird jedoch auch hier zur Klimatisierung des Innenraums genutzt. Eine Nutzung der Abgasrestwärme findet in der Regel nicht statt. Eine Ausnahme im Bereich des Schiffbaus stellen jedoch sehr große Schiffsmotoren dar, welche beispielsweise in großen Kreuzfahrtschiffen oder Supertankern eingesetzt werden. Hier treiben die Motoren nicht mehr direkt eine Schraube an, sondern Generatoren, welche wiederum elektrische Energie für das gesamte Schiff bereitstellen. Diese elektrische Energie wird dann zum einen Teil für den Antrieb des Schiffes mittels Elektromotoren benötigt zum anderen Teil schlichtweg für die Versorgung des Schiffes mit Strom. Die Abwärme von Abgas und Kühlwasser wird dabei für die Beheizung der Innenräume aber auch für andere Anwendungen (z.B. Erwärmen des Pools und des Frischwassers) genutzt.

In der Luftfahrt kommen mittlerweile jedoch hauptsächlich effizientere Antriebe zum Einsatz, allen voran das klassische Turbinen-Strahltriebwerk. Auch hier bleibt jedoch ein Großteil der Abgas- und Kühlwasserrestwärme ungenutzt.

Nur bei sehr großen Motoren wird die Abwärme effektiver genutzt. Mehr dazu im nächsten Kapitel.

2.6.3 Stationäre Motoren

Das wohl bekannteste Einsatzgebiet für große, stationäre Motoren ist das der kombinierten Wärme- und Stromgewinnung, auch *Blockheizkraftwerk* genannt. Hier wird sowohl die Abwärme des Abgases, als auch die des Kühlwassers nutzbar gemacht:

„Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) ist eine modular aufgebaute Anlage zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme, die vorzugsweise am Ort des Wärmeverbrauchs betrieben wird. Es kann auch Nutzwärme in ein Nahwärmenetz eingespeist werden. Sie nutzt dafür das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung.

Als Antrieb für den Stromerzeuger können Verbrennungsmotoren, d. h. Diesel-, Pflanzenöl- oder Gasmotoren, aber auch Gasturbinen, Stirlingmotoren oder Brennstoffzellen verwendet werden.

Der höhere Gesamtnutzungsgrad gegenüber der herkömmlichen Kombination von lokaler Heizung und zentralem Kraftwerk resultiert daraus, dass die Abwärme der Stromerzeugung direkt am Ort der Entstehung genutzt wird. Der Wirkungsgrad der Stromerzeugung liegt dabei, abhängig von der Anlagengröße, zwischen 25 und 38 % (bezogen auf den Heizwert). Falls die Abwärme vollständig und ortsnah genutzt wird, kann ein Gesamtwirkungsgrad bezüglich eingesetzter Primärenergie von 80 bis 90 % (bezogen auf den Heizwert) erreicht werden. [...]

Übliche BHKW-Module haben elektrische Leistungen zwischen einem Kilowatt (kW) und einigen zehn Megawatt (MW). Unter 50 kW spricht man auch von Mini-Kraft-Wärme-Kopplung (Mini-KWK), unter 10 kW von Mikro-KWK. Anlagen mit weniger als 2,5 kW nennt man auch Nano-BHKW. Mini- und Mikro-KWK werden in Wohn- und Geschäftsquartieren, Krankenhäusern, Schwimmbädern und Mehrfamilienhäusern, aber auch in Betrieben und im Siedlungsbau verwendet. Insbesondere die Nano-BHKW-Klasse eignet sich auch für Einfamilienhäuser. Die Kraft-Wärme-Kopplung wird ebenfalls in Heizkraftwerken genutzt, dort typischerweise mit elektrischen Leistungen von einigen hundert MW.¹⁷

¹⁷ <https://de.wikipedia.org/wiki/Blockheizkraftwerk>

3 Präzisierung der Aufgabenstellung

3.1 Entwicklung alternativer Gemischaufbereitungssysteme

Die Aufgabe dieser Ausarbeitung liegt nun darin weitere Möglichkeiten zur Gemischaufbereitung am Verbrennungsmotor zu entwickeln und zu untersuchen. Dazu wurden zuerst zwei alternative Ansätze, nämlich der Paul Pantone Prozess und der Tom Ogle Vergaser, näher betrachtet und im Anschluss kombiniert und gebaut sowie sowohl getrennt, als auch in Zusammenarbeit getestet. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden ausgewertet und die einzelnen Systeme letztendlich miteinander verglichen.

3.2 Randbedingungen

Das zu erarbeitende System soll dabei an einem 2,6 kW Notstromaggregat mit 4-Takt Ottomotor zum Einsatz kommen und muss dementsprechend konstruktiv an dieses angepasst sein. Darüber hinaus soll das System mit verschiedenen Kraftstoffen, sowie Wasser als Additiv, getestet werden. Auf dem Bild rechts sind die technischen Daten des Versuchsmotors zu sehen:



Abbildung 25: Versuchsaggregat

3.3 Ziel

Ziel dieser Untersuchungen ist es ein Gemischaufbereitungssystem zu entwickeln, welches den Verbrauch und den Schadstoffausstoß des Verbrennungsmotors, bei gleichbleibender Abgabeleistung des Stromgenerators, nachweislich reduziert und somit zur Verbesserung der Effizienz des Gesamtsystems beiträgt.

4 Der Paul Pantone Prozess

4.1 Hintergrund und Erfinder

Die erste Erfindung, die Grundlage dieser Entwicklung werden soll, ist der sogenannte *Paul Pantone Prozess*, benannt nach seinem Erfinder Paul Pantone.

„Paul Pantone (verstorben im Dezember 2015) stammte aus Utah, USA. Er war sein ganzes Leben lang ein Entwickler. Seit den 1970er Jahren hat er an der GEET-Technik gearbeitet. 1984 hat er seinen „GEET-Prozessor“ erstmals öffentlich vorgestellt. 1997 Patentanmeldung Nr. 5,794,601 und am 18.08.1998 mit der Nr. US Cl. 123/538 Patent gewährt. Die Grundlagen seiner Technik stammen aber schon aus viel früherer Zeit. So nutzt auch die Ölindustrie die Dampfspaltung zum Cracken langkettiger Kohlenwasserstoffe. Die dazu hohen Temperaturen werden beim Verbrennungsmotor am Auslasskrümmer locker übertroffen.“¹⁸

Kern seiner Entwicklungen war der hier bereits genannte *GEET-Processor*, wobei die Abkürzung GEET für *Global Environmental Energy Technology* steht.



Abbildung 26: Paul Pantone (1950 - 2015)¹⁹

Trotz seiner Arbeiten und seiner Entdeckungen gibt es keinen Wikipedia Eintrag zu Paul Pantone, weder in der deutschen noch in der englischen Wikipedia!

¹⁸ <http://www.slimlife.eu/wordpress/2017/11/geet-plasma-reaktor-nach-paul-pantone/>

¹⁹ Paul Pantone.jpg, siehe Literaturverzeichnis

4.2 Allgemeines Funktionsprinzip

Das grundlegende Prinzip des GEET-Reaktors ist in den unten dargestellten Abbildungen zu sehen. Diese stammen aus dem Patent mit der internationalen Veröffentlichungsnummer ‚WO 96/14501‘, welches vollständig im Anhang enthalten ist. Wie zu sehen, nutzt der GEET-Processor die Wärme des vom Motor erzeugten Abgases um den Kraftstoff vorzubehandeln:

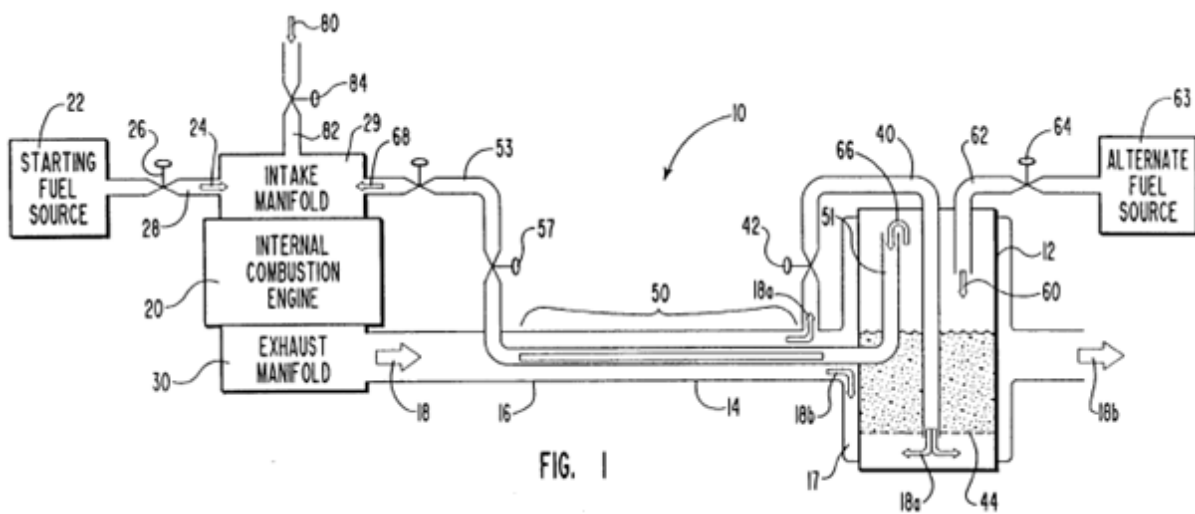


Abbildung 27: Fig. 1, internationales Patent WO 96/14501²⁰

Dazu wird der Kraftstoff (63) in einem Kraftstoffvergaser (12) zuerst verdampft (66) und im Anschluss durch ein Rohr (51) geleitet, welches wiederum Teil des eigentlichen Reaktors (50) ist. Der Reaktor (50) besteht aus einem inneren Rohr (51) für das Kraftstoffgas und einem äußeren Rohr (16) für das Abgas (18) des Motors (20). Der vorbehandelte Kraftstoff (68) wird im Anschluss mit Frischluft (80) vermischt und dem Motor (20) über den Ansaugtrakt (29) zugeführt. Nach der Verbrennung werden die heißen Abgase (18) durch den Krümmer (30) in den Reaktor (50) geleitet. Nachdem ein Teil der Abgaswärme im Reaktor (50) genutzt wurde, wird das kühlere aber immer noch warme Abgas (18b) um den Kraftstoffvergaser (12) herum geführt (17), wo es den Kraftstoff erwärmt, und anschließend über einen normalen Auspuff abgeführt (18b).

Da manche Kraftstoffe erst bei heißem Reaktor (50) eingesetzt werden können, gibt es zusätzlich zum normalen Kraftstoffvergaser (12) eine zusätzliche Kraftstoffquelle (22), mit der der kalte Motor wenn nötig gestartet und der Reaktor vorgewärmt werden kann.

²⁰ Patent WO 96/14501, siehe Literaturhinweise bzw. Anhang

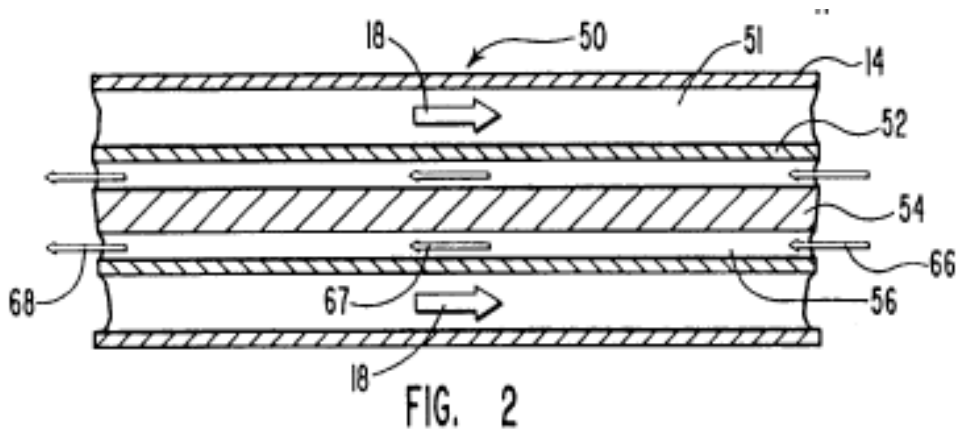


Abbildung 28: Fig. 2, internationales Patent WO 96/14501²¹

In der Abbildung oben ist das Innere des Reaktors zu sehen. Dieser besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Rohren, einem inneren (52) und einem äußeren (50). Im Inneren des inneren Rohres (52) wiederum befindet sich ein frei beweglicher, zylindrischer Kern (54). Während des Betriebes werden nun die heißen Abgase (18) und die Kraftstoffdämpfe (67) im Gegenstrom-Verfahren aneinander vorbei geführt.

4.3 Erklärungsansätze

Zur Erläuterung des grundlegenden Funktionsprinzips werden die Inhalte des zuletzt genannten Patent WO 96/14501, sowie die des bereits erwähnten PDF's der Panacea-BOCAF University herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt nun einen Erklärungsansatz zu den Vorgängen im inneren Rohr des Reaktors, erstellt von Naresh Vasant, zu finden auf Seite 130:

²¹ Patent WO 96/14501, siehe Literaturhinweise bzw. Anhang

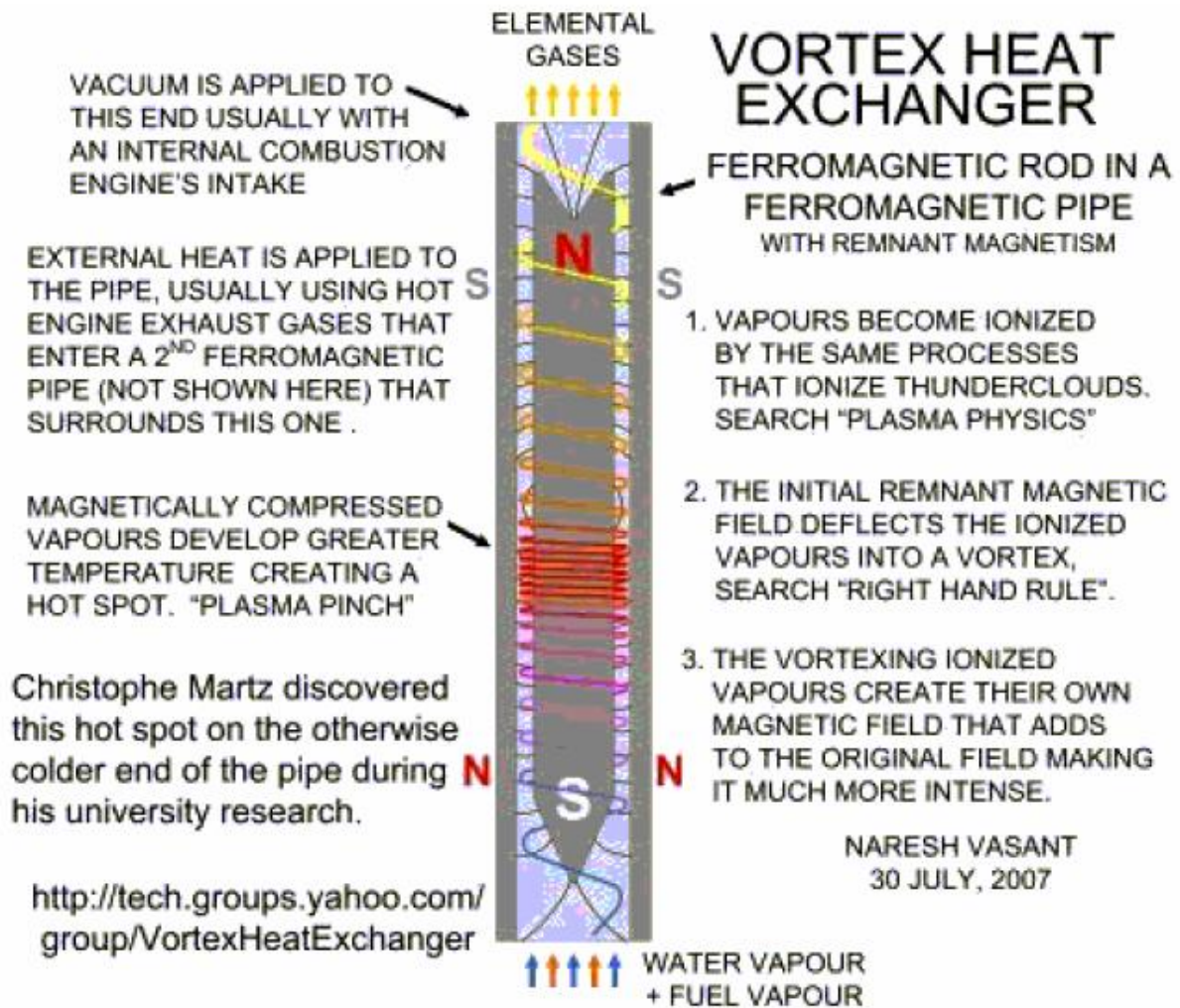


Abbildung 29: Vortex Heat Exchanger²²

Wie zu sehen, strömen die Kraftstoffgase von unten nach oben durch das innere Rohr des Reaktors. Das Abgas erwärmt dieses innere Rohr, wie in Kapitel 9.2 bereits erläutert wurde. Die Richtung ist dabei insofern entscheidend, dass der Reaktor im besten Falle vertikal ausgerichtet wird. Dies ist zu beachten, da es im Reaktor zu magnetischen Phänomenen kommen soll und bei falscher Ausrichtung das Erdmagnetfeld die Magnetisierung des Reaktors stören könnte.

Durch den Abgasegendruck herrscht im äußeren Rohr ein leichter Überdruck, wohingegen durch den Ansaugprozess des Motors im inneren Rohr ein Unterdruck entsteht. Dieser Unterdruck sollte für die Reaktion im Reaktor möglichst groß sein, sprich es muss ein möglichst starkes Vakuum vorherrschen.

Durch die starke Erhitzung der zugeführten Gase sowie der starken Abkühlung der entgegenströmenden Abgase soll es nun zu einer Aufladung und Ionisierung der Gase kommen, ähnlich wie es bei der Entstehung von Gewittern der Fall ist. Die so ionisierten Gase besitzen magnetische Eigenschaften und richten sich nun folglich nach der ‚Rechten-Hand-Regel‘ im

²² „GEET fuel procesor_PANACEA.pdf“, siehe Literaturhinweise bzw. Anhang

vorgegebenen Magnetfeld aus (deshalb vertikal ausgerichtet) und es kommt zu einer Wirbelbewegung um den inneren Kern. Da die nun um den Kern rotierenden ionisierten Gase wiederum selbst magnetische Eigenschaften besitzen, verstärken sie die Magnetisierung des Reaktors. Die Polungen des Kerns sowie die des inneren Rohres sind in der Abbildung mit N für Nordpol und S für Südpol kenntlich gemacht. Im Optimalfall würde nun durch diese Ionisierung ein Plasmaring am Ende des Kerns entstehen.

Durch die Ionisierung und Erhitzung der Kraftstoffgase sollen diese nun für die eigentliche Verbrennung aufbereitet werden. Der Sinn dieser Aufbereitung soll letztendlich darin bestehen, dass die Kraftstoffmoleküle aufgespalten werden und so ein hochreaktives Gas aus Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff entsteht. Die Vorgänge der Ionisierung und der Kraftstoffaufspaltung werden durch das vorherrschende Vakuum begünstigt.

4.4 „Free GEET Plans“

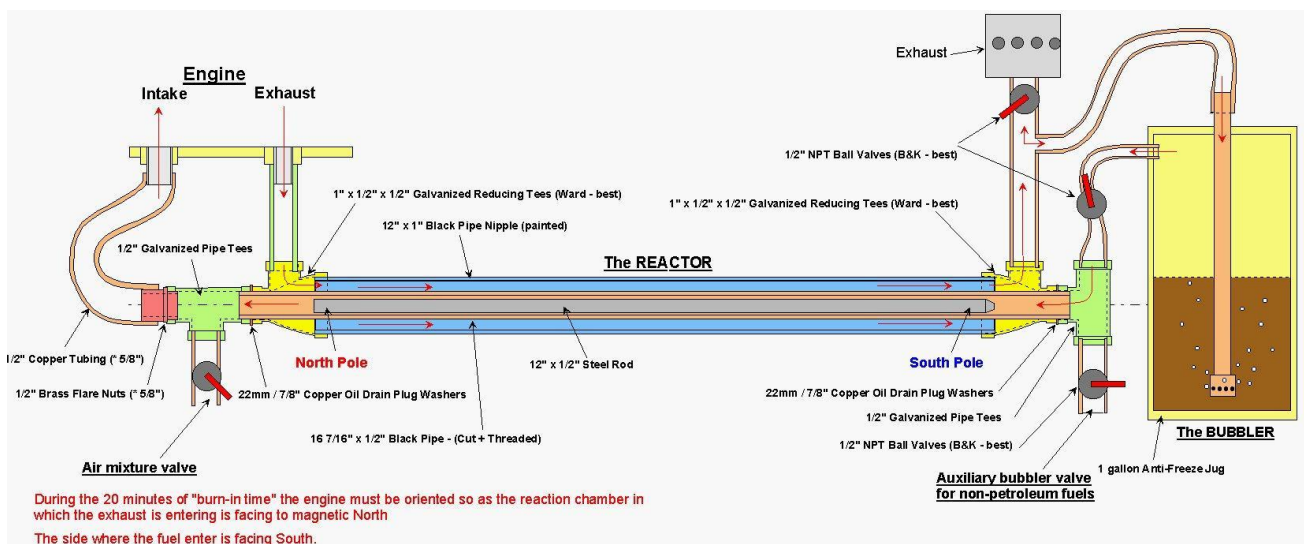


Abbildung 30: Free GEET Plans²³

Als Grundlage für einen ersten Prototypen wurden die durch Paul Pantone selbst im Internet verbreiteten, sogenannten ‚Free GEET Plan‘, verwendet. Hauptbestandteil dieser einfachen Pläne ist die rechts dargestellte Abbildung. Dieser einfache GEET-Aufbauplan wurde von Paul Pantone erstellt, damit sozusagen jeder einen einfachen GEET Reaktor bauen und testen kann. Zu diesem Zweck sind die Pläne selbst sehr einfach gehalten und für den Aufbau des Reaktors benötigt man lediglich im Handel erhältlichen Klempnerbedarf. Dieser Reaktor ist für Verbrennungsmotoren mit einer Leistung von nicht mehr als 20 PS gedacht und besteht aus einem ½“ Rohr für das innere Reaktorrohr und einem 1“ Rohr für das äußerer Reaktorrohr. Diese werden mit zwei 1“ x ½“ x ½“ T-Verbindern konzentrisch verbunden und mit weiteren ½“ Fittings sowie Kugelhähnen mit dem Motor und dem Kraftstoffvergasertank (auch ‚Bubbler‘ genannt) verbunden.

²³ http://www.science-explorer.de/GEET-Motor_l.jpg, auch hier wird explizit auf die Ausrichtung des Reaktors gegenüber dem Erdmagnetfeld hingewiesen.

5 Der Tom Ogle Kraftstoffvergaser

5.1 Hintergrund und Erfinder

Die zweite alternative Gemischaufbereitungsmethode ist die des ‚*Ogle Vergasers*‘, benannt nach ihrem Erfinder Thomas Ogle. Im Gegensatz zu Paul Pantone gibt es zwar einen Wikipedia Eintrag über Tom Ogle, dieser ist jedoch insgesamt nur wenige Zeilen lang und beläuft sich unter anderem auf die folgenden Informationen:

„Tom Ogle (1953 - 19 August 1981) was an American inventor. He claimed to have invented a modified carburetor which drastically increased fuel economy. Ogle claimed that his device could allow cars to reach up to 100 miles per gallon [entspricht etwa 2,35 l/100km]. Initial tests appeared to support Ogle's claim, and received some media attention. However, Ogle's test was not conducted under rigorous scientific scrutiny, and his performance has not been independently duplicated.“²⁴



Abbildung 31: Tom Ogle

²⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Tom_Ogle

Tom Ogle hat einen alternativen Kraftstoffvergaser erfunden, auf dessen Funktionsweise gleich noch näher eingegangen wird. Seinen Vergaser hat er am 20.06.1977 unter der Nummer US 4,177,779 zum Patent angemeldet, anhand dessen kurz die Funktionsweise erläutert werden soll.

5.2 Allgemeines Funktionsprinzip

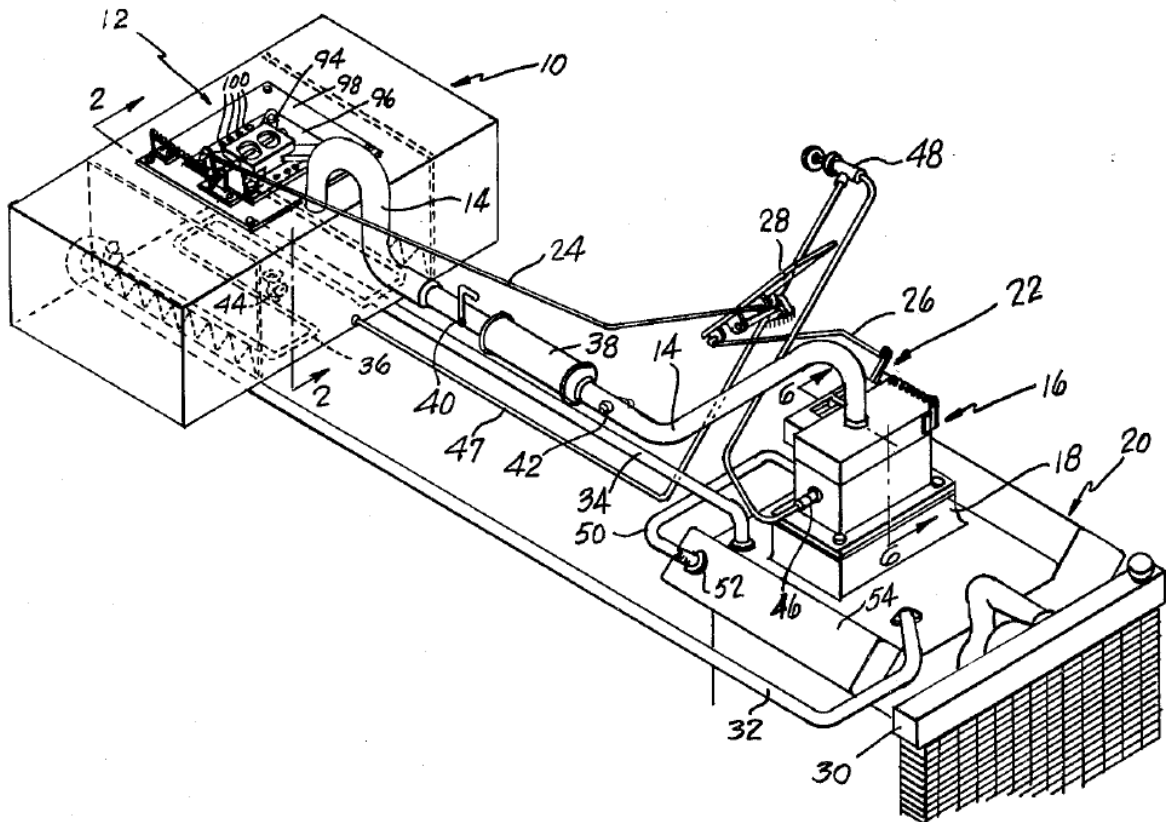


Abbildung 32: Fig. 1 US Patent Nr. 4,177,779²⁵

Thomas Ogle erkannte offensichtlich, dass für eine saubere Verbrennung im Motor (20) nur Kraftstoffgase und Frischluft im Brennraum benötigt werden. Deshalb konstruierte er einen Tank (10) der einem inneren Unterdruck standhalten konnte. In diesem Tank (10) wird der Kraftstoff vergast, gefiltert und bereits mit etwas Frischluft vermischt. Anschließend wird das Gasgemisch nochmals gefiltert (38) und über einen Schlauch (14) einer speziellen ‚Gasausgleichskammer‘, wie er es nennt, zugeführt. Diese liegt direkt vor dem Ansaugtrakt (18) des Motors (20) und dient schlichtweg der Vermischung des Kraftstoffgases mit ausreichend Frischluft.

²⁵ US Patent Nr. 4,177,779, siehe Literaturhinweise bzw. Anhang

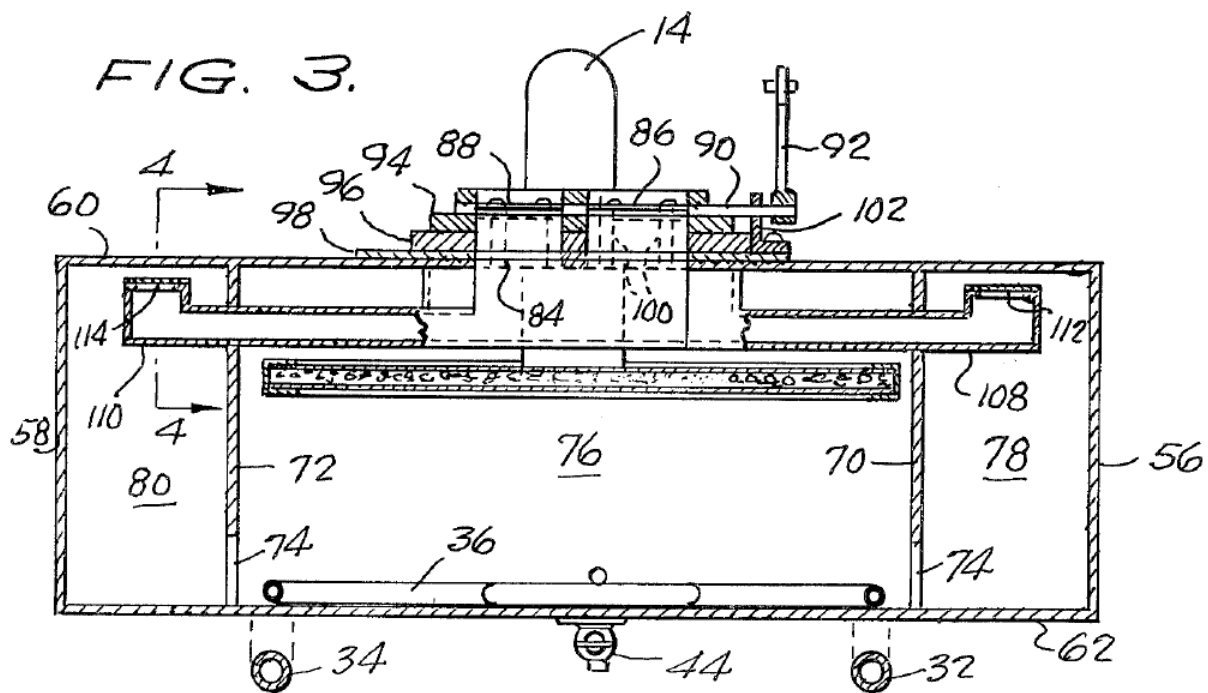


Abbildung 33: Fig. 3 US Patent Nr. 4,177,779²⁶

Der Kraftstofftank selbst besteht aus einer Zuluftklappe (92), mit der die zuströmende Luft begrenzt werden kann, aus einem schwenkbaren Zwischenfilter (134) und einem Wärmetauscher (36).

Durch den Ansaugprozess des Motors (20) entsteht im Schlauch (14) und somit auch im Tank (10) ein Unterdruck, durch welchen Frischluft aus der Umgebung in den Tank gedrückt wird. Die Luft wird dann über Nebenkammern (78, 80) und Kanäle (74) unter die Flüssigkeitsgrenze gedrückt und ‚sprudelt‘ somit den Kraftstoff auf. Während die Luft die Flüssigkeit in Form von kleinen Blasen durchdringt kommt es zur Verdampfung, bzw. Verflüchtigung des flüssigen Kraftstoffes und dieser wechselt in die Gasphase. Das Gemisch, welches sich in der inneren Kammer (76) bildet, wird im Anschluss durch einen, in den Tank (10) integrierten, Filter (134) geleitet. Dieser Filter (134) dient hauptsächlich dazu, die durch das Aufsprudeln hochgeschleuderten Tropfen davon abzuhalten den Tankausgang (82) zu erreichen.

Wechselt ein Stoff vom flüssigen in den gasförmigen Zustand, so wird dafür Verdampfungswärme benötigt. Wird keine zusätzliche Wärme eingebracht, da der Siedebereich beispielsweise nahe an der Umgebungstemperatur liegt (für Benzin von 30 bis 215°C), wird diese Verdampfungswärme der Flüssigkeit und Umgebung entzogen und diese kühlt immer weiter ab, bis die Temperatur der Flüssigkeit die der niedrigsten Siedetemperatur erreicht und quasi keine weitere Verdampfung mehr stattfindet. Da diese, für Benzin als Kraftstoff, bei einer üblichen Nutzung im PKW garantiert erreicht wird, muss dem zu verdampfenden Kraftstoff die nötige Verdampfungswärme zugeführt werden, um eine dauerhafte Verdampfung zu ermöglichen.

²⁶ US Patent Nr. 4,177,779, siehe Literaturhinweise bzw. Anhang

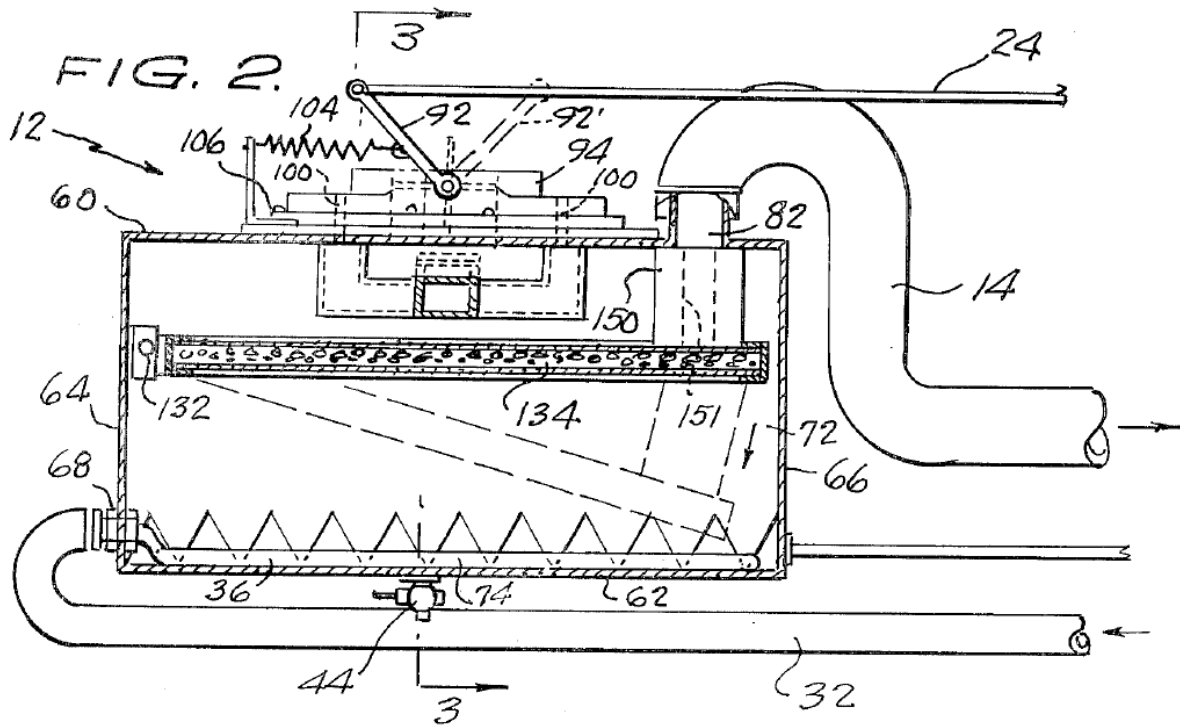


Abbildung 34: Fig. 2 US Patent Nr. 4,177,779²⁷

Dieses Problem konnte Tom Ogle geschickt mit einem integrierten Wärmetauscher (36) lösen, welcher die vorhandene Restwärme im Kühlwasser des Motors nutzt, um den Kraftstoff die nötige Verdampfungswärme zuzuführen und ihn so im Siedebereich über 30°C zu halten. Dazu wird das Kühlwasser über einen Vorlauf (32) dem Wärmetauscher (36) im Tank (10) zugeführt und über einen Rücklauf (34) wieder in den Kühlkreislauf des Motors zurückgeführt.

5.3 Anpassung und Anwendung am Pantone Reaktor

Da der GEET Reaktor bestenfalls mit Kraftstoffgasen betrieben werden sollte eignet sich der, durch Tom Ogle erfundene, Tank ebenfalls für den Betrieb an einem solchen Reaktor. Genau genommen stellt er sogar eine Optimierung gegenüber dem am GEET üblicherweise verwendeten ‚Bubler‘ dar, da deutlich mehr Filter eingesetzt werden und der Kraftstoff durch genutzte Restwärme durchgehend beheizt wird.

²⁷ US Patent Nr. 4,177,779, siehe Literaturhinweise bzw. Anhang

6 Entwicklung

6.1 Entwicklungsphasen

Die Entwicklung eines Gemischaufbereitungssystems auf Grundlage der Pantone und Ogle Entdeckungen wurde in vier aufeinanderfolgenden Phasen untersucht:

- Phase 1:
- Konstruktion und Bau eines Ogle Vergasers
 - Konstruktion und Bau eines GEET-Reaktors nach den „Free GEET Plans“ (im Folgenden *Pantone V1* genannt)
 - Test eines Ogle Vergasers
 - Test eines Pantone V1
- Phase 2:
- Simulation, Konstruktion und Bau eines zweiten GEET-Reaktors (im Folgenden *Pantone V2* genannt)
 - Test des Pantone V2 mit einem Ogle Vergaser
- Phase 3:
- Anpassung und Modifikation des Pantone V2 auf Kraftstoffeinspritzung (im Folgenden *Pantone V3* genannt)
 - Entwicklung und Bau einer geeigneten elektronischen Versuchsschaltung
 - Test des Pantone V3 mit Kraftstoffeinspritzung
- Phase 4:
- Bau eines variabel einstellbaren Reaktors aus Stahl und Messing (im Folgenden *Pantone V4* genannt)
 - Test des Pantone V4

Einen grundlegenden Vergleich der einzelnen Systeme zeigen die folgenden Tabellen:

Tabelle 1: Systemvergleich I

	Ogle Vergaser	Pantone V1	Pantone V2
Materialien	Edelstahl, Aluminium Messing-fittings, EPDM, Acrylglas, Hochtemperatur- silikon, Edelstahl- wellschlauch	Stahlfittings & -Rohr, Messing, Messing- fittings, Hoch- temperatursilikon, Edelstahl- wellschlauch	Edelstahlfittings & -Rohr, Messing, Messingfittings, Hochtemperatur- silikon, Edelstahl- wellschlauch
Funktion	Kraftstoffvergasung durch Unterdruck und Ausprudeln	Kraftstoff- vorbehandlung durch Wärme und Unterdruck	Kraftstoff- vorbehandlung durch Wärme und Unterdruck
Kraftstoff- aufbereitung	Aufsprudeln	Aufsprudeln	Aufsprudeln

Tabelle 2: Systemvergleich II

	Pantone V3	Pantone V4	Universalsteuergerät
Materialien	Edelstahlfittings & Rohr, Messing, Hochtemperatursilikon, Edelstahlwellschlauch	Stahl, Messing, Messingfittings, Hochtemperatursilikon, Edelstahlwellschlauch	Stahl/Aluminium-Gehäuse, Lötplatine, elektronische Bauteile, Anschlüsse & Buchsen, Kabel, Arduino Mega & PIC32 Mikrocontroller
Funktion	Kraftstoffvergasung mittels Einspritzung, Kraftstoffvorbehandlung durch Wärme und Unterdruck	Kraftstoffvorbehandlung durch Wärme und Unterdruck	Verarbeitung div. Sensorsignale, variables Ansteuern von Einspritzdüsen und Zündspule, Datalog Ausgabe über Serial Port
Kraftstoffaufbereitung	Einspritzung	Aufsprudeln	-

6.2 Pantone V1

Die Grundlage für den Pantone V1 stellen die „Free GEET Plans“ dar, auf welche bereits im Kapitel 10.4 näher eingegangen wurde. Der Entwurf des Aufbaus fiel hier dementsprechend einfach aus. Der Reaktor und der Vergasertank wurden nach dem folgenden Schema ausgelegt. Zusätzlich dazu wurde ein 3D-Modell eines solchen Reaktors erstellt und die Positionierung des Reaktors am Generator im Vorhinein getestet (siehe Kap. 12.2 Pantone V1). Eingesetzt wurde dazu die Software Autodesk Inventor.

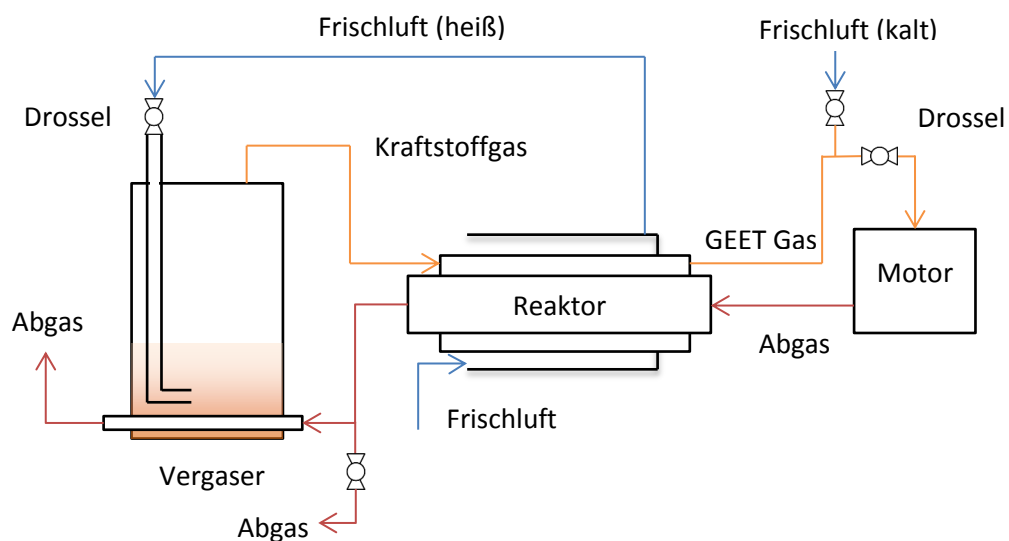


Abbildung 35: Pantone V1, systematisch

6.3 Pantone V2

Da sich während der Versuche mit dem Pantone V1 herausgestellt hat, dass nicht nur der Reaktor zu groß für den verwendeten Motor war, sondern auch der Krümmerschlauch zu klein für die auftretenden Abgasströme, wurde darauffolgend ein komplett neuer Reaktor basierend auf Edelstahlschweißittings konzipiert. Hierbei wurden die verfügbaren Informationen zur Dimensionierung des Reaktors dem Panacea²⁸ Dokument entnommen und zusätzlich durch eine Simulation optimiert (siehe Kap. 7.5 *Pantone V2*). Wichtige Größen hierbei waren unter anderem die Durchmesser und Längen der Rohre und des Kerns. Auch die jetzt verwendete Einengung des Abgases im Bereich des Kerns ist dieser Quelle entnommen und stammt ursprünglich aus Präsentationsmaterial von Paul Pantone selbst.

Die Informationen sind dem Dokument ‚Angaben zur Dimensionierung‘ im Anhang zu entnehmen.

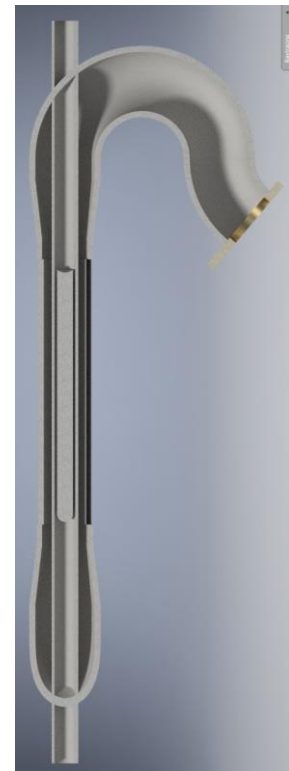


Abbildung 36: Pantone V2, Entwurfsphase

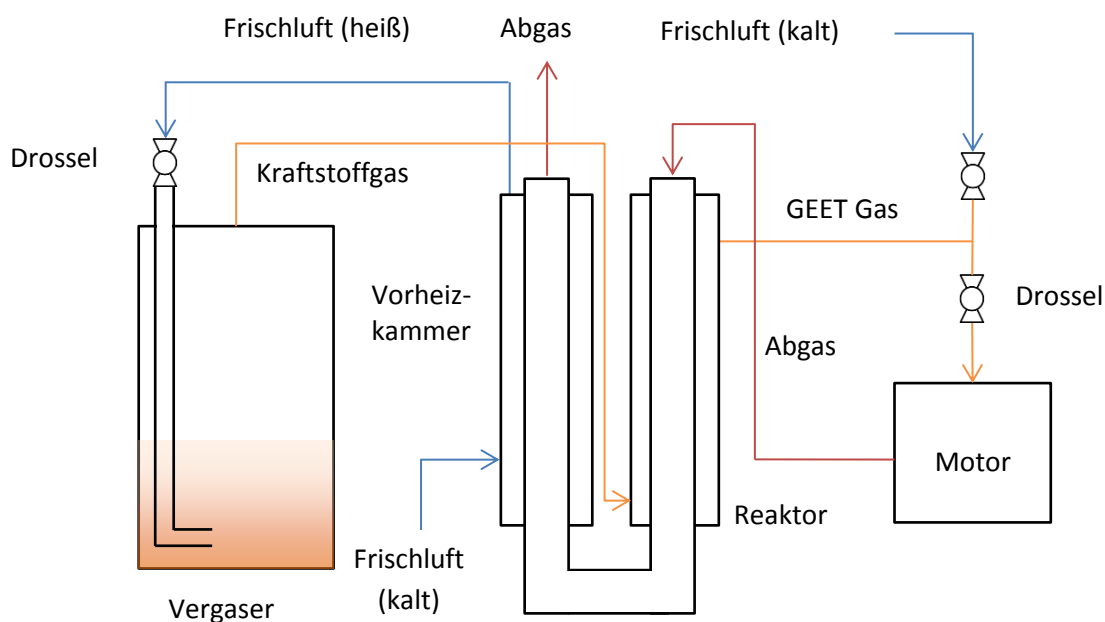


Abbildung 37: Pantone V2, schematisch

Die Abbildung oben zeigt den schematischen Aufbau der zweiten Pantone Variante. Wie zu erkennen ist, wurde nach dem Reaktor eine Vorheizkammer vorgesehen, welche zum Erhitzen der Frischluft genutzt werden soll. Diese wird ebenfalls über die Abgase erwärmt.

²⁸ „GEET fuel procesor_PANACEA.pdf“, siehe Literaturhinweise bzw. Anhang

6.4 Kraftstoffvergasertank



Für die Entwicklung eines geeigneten Ogle Tanks wurde eine Konstruktion mittels CAD-Software erstellt. Die Größe wurde dabei auf die gegebenen Platzverhältnisse angepasst, die Dimensionierung der Wandstärke entsprechend der zu erwartenden Unterdrücke. Für die optische Kontrolle des Füllstandes und der Vorgänge im Inneren wurde darüber hinaus ein ebenfalls drucksicheres Sichtfenster, welches aus Sicherheitsgründen aus Acrylglas besteht, verbaut. Da der Pantone V1 bereits nahezu vollständig aus zölligen Fittings besteht, wird der Ogle Tank im Bereich seiner Anschlüsse ebenfalls auf zölliges Rohrgewinde angepasst. Zur Verbindung der einzelnen Komponenten werden anschließend Edelstahlwellschläuche eingesetzt, welche sowohl ausreichende Druck- als auch Temperaturstabilität aufweisen.

Da der verwendete Versuchsmotor jedoch nicht über eine Wasserkühlung verfügt, kann auch keine Restwärme aus solchem bezogen werden. Deshalb wurde der verwendete Ogle Tank dahingehend angepasst, dass nicht das Kühlwasser durch den Tank geleitet wird, sondern ein Teil des warmen Restabgases.

Abbildung 38: Vergasertank, gerendert

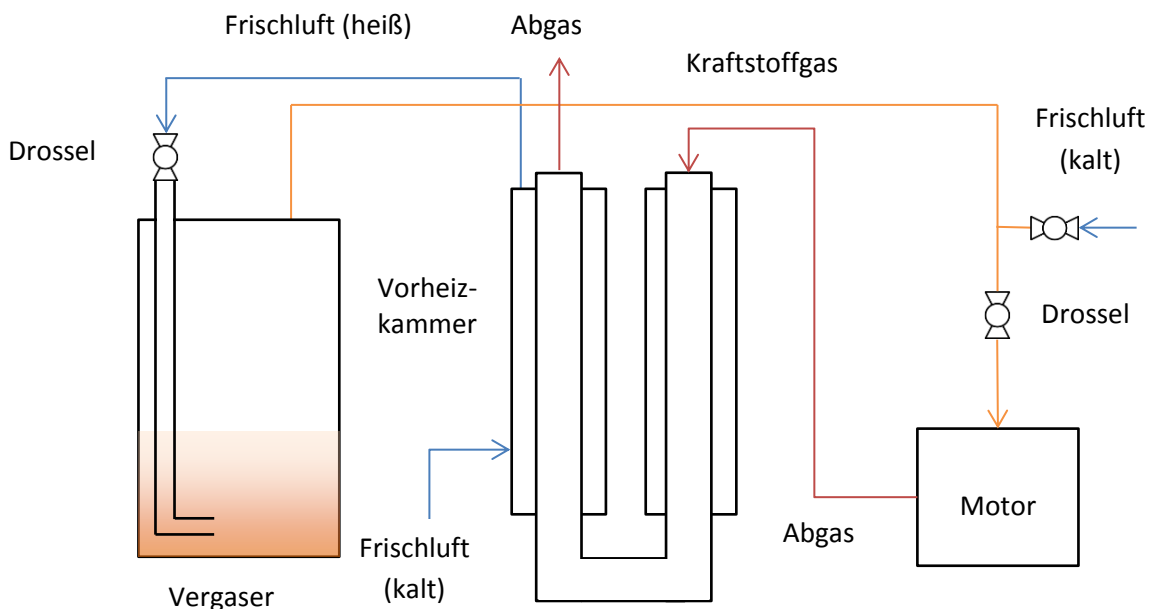


Abbildung 39: Vergasertank, schematisch

Um den Kraftstoffvergasler alleinstehend am Motor testen zu können, wird die Vorheizkammer der zweiten Pantone Variante zur Generierung der benötigten Verdampfungswärme genutzt. Der Reaktor selbst bleibt ungenutzt.

6.5 Pantone V3

Da beim Thema GEET-Reaktor immer wieder eine Vielzahl von Kraftstoffen aufgeführt wird, wird der Ogle Tank in der dritten Versuchsvariante durch eine Kraftstoffeinspritzung, angebracht im Bereich des Auspuffs in der Vorheizkammer, ersetzt. Hier soll nun die Restwärme des Abgases die Kraftstoffe zuerst verdampfen, bevor sie ebenfalls durch den Reaktor geleitet werden. Dazu wurde eine elektrische Versuchsschaltung entworfen, welche zwei getrennte Einspritzdüsen ansteuern kann. Darüber hinaus wurden für diese Einspritzdüsen selbstverständlich geeignete Systeme zur Kraftstoffversorgung bereitgestellt. Diese bestehen jeweils aus einem Kraftstofftank, einer Kraftstoffförderpumpe, einem Filter, einem Überdruckventil und einem Manometer zum Überwachen des Druckes.

Den schematischen Anschluss der einzelnen Baugruppen an den Versuchsmotor zeigt die folgende Abbildung:

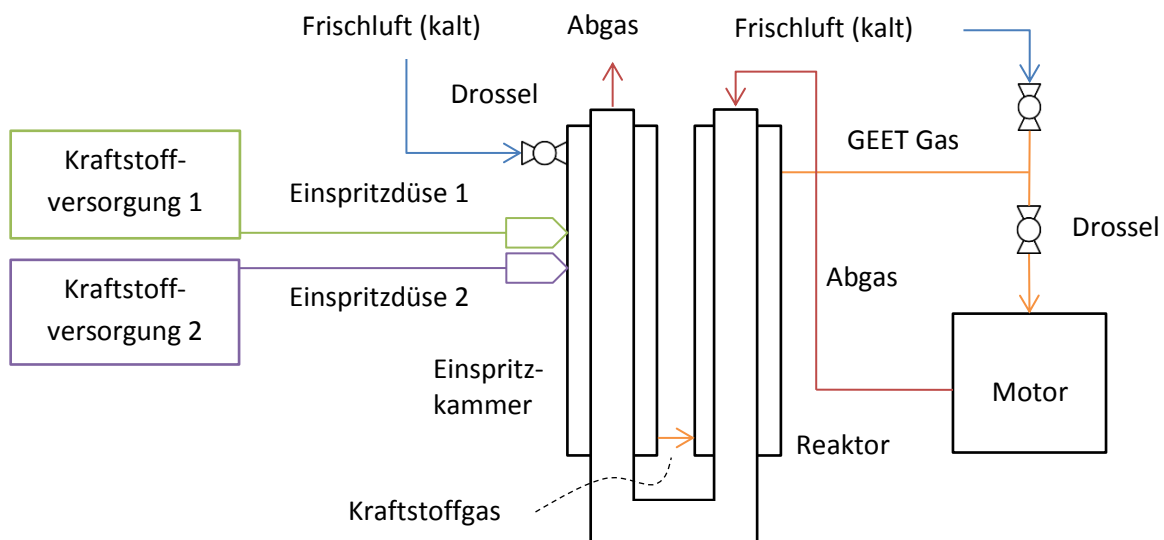


Abbildung 40: Pantone V3, schematisch

6.6 Pantone V4

Immer wieder wird in den GEET bezogenen Dokumenten die Magnetisierbarkeit des Reaktors angesprochen. Die Empfehlungen zum Bau eines solchen gut magnetisierbaren Reaktors weisen dazu auf einfache, gut ferromagnetische Stahlsorten (auch *Baustähle* genannt), wie S235 (ehemals St35) oder S355 (ehemals St52), hin. Auf Grund der besseren Beständigkeit bei den gegebenen Einsatzumständen wurde jedoch ein Edelstahl (V2A) für die Varianten 2 und 3 gewählt. Um auszuschließen, dass diese Materialwahl maßgeblichen Einfluss auf die Versuche nimmt, wurde in der vierten Variante ein Pantone Reaktor aus S235 Material entworfen.

Da für die effektive Nutzung der Wärme die Länge des Reaktors eine Rolle spielt (längerer Reaktor = mehr Fläche für den Wärmeaustausch) wurden für den vierten Reaktor Klemmversraubungen als Verbindungstechnik gewählt. Mit Hilfe dieser Konstruktionsweise ist es möglich diverse Rohr- und Reaktorlängen unkompliziert umzusetzen. Zur Änderung der Länge müssen lediglich die zwei Klemmversraubungen an den Endstücken gelöst werden. Danach kann sowohl das innere als auch das äußere Rohr aus den Endstücken entfernt werden und je nach Wunsch längere, bzw. kürzere Rohre eingesetzt werden. Die folgende Abbildung zeigt eines der beiden Endstücke:

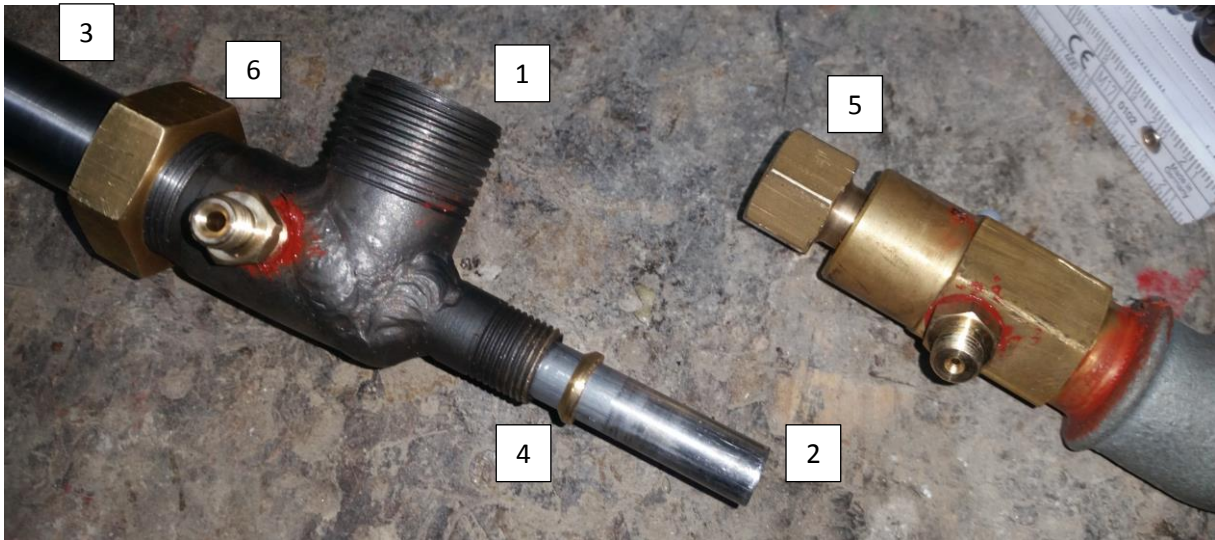


Abbildung 41: Pantone V4, Klemmringverschraubung

Das Endstück (1) besteht aus verschweißten S235 Rohrstücken. Das innere (2) und äußere Rohr (3) sind bereits eingesetzt. Auf dem inneren Rohr ist der Messingklemmring (4) zu erkennen, welcher in Verbindung mit der Messingverschraubung (5) das Rohr und das Endstück form- und kraftschlüssig, sowie gasdicht miteinander verbindet. Die Klemmringverschraubung des äußeren Rohres (6) ist bereits montiert.

Da die vierte Variante des Pantone Reaktors primär darauf ausgelegt wird die Magnetisierung im Vergleich zu einem Edelstahlreaktor zu untersuchen, sowie unterschiedliche Reaktorlängen, wird in der vierten Variante keine Kraftstoffeinspritzung vorgesehen. Wie bereits erwähnt bringt diese eine erhebliche Steigerung des Versuchsaufwandes mit sich, welche zur Überprüfung der genannten Faktoren nicht erforderlich ist. Zur Vergasung des Kraftstoffes wird erneut der Kraftstoffvergasertank eingesetzt.

Der schematische Entwurf ist in der folgenden Abbildung zu sehen:

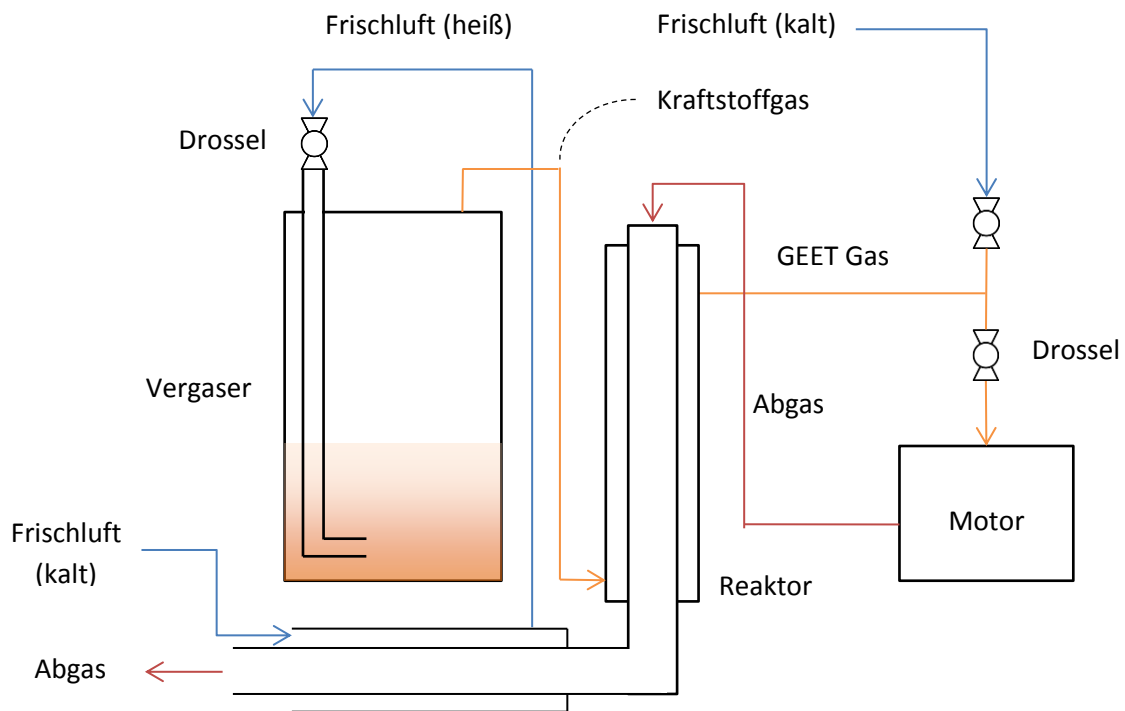


Abbildung 42: Pantone V4, schematisch

6.7 Universalsteuergerät

In der dritten Versuchsvariante, dem Pantone V3, kommt eine Kraftstoffeinspritzung zum Einsatz. Hierfür wird eine elektronische Versuchsschaltung benötigt. Diese muss die Drehzahl des Motors aufnehmen und dieser entsprechend zwei getrennte Einspritzdüsen ansteuern. Zum Einsatz kommen hier Einspritzdüsen aus einem Saugrohreinspritzsystem namens ‚Digijet‘ der Marke Volkswagen. Die Düsen selbst wurden aus einem 1.8L Vierzylinder Ottomotor ausgebaut, ehemals verbaut in der Golf Baureihe 2. Da die Düsen an sich für eine deutlich höhere Brennkammer konzipiert sind, ist eine arbeitsspielgenaue Einspritzung nicht möglich, vielmehr muss die Einspritzfrequenz variabel an die Drehzahl anpassbar reduziert werden, bis ein optimales Luftverhältnis erreicht wird.

Da auf Grund der besseren Brennbarkeit des Gemisches von einer schnelleren Verbrennung ausgegangen werden kann, ist es vorteilhaft den Zündzeitpunkt entsprechend dem verwendeten Kraftstoff anzupassen. Darüber hinaus beeinflusst ein optimaler Zündzeitpunkt die Leistung des Aggregats ebenfalls positiv. Deshalb wurde das Aggregat in der dritten Variante zusätzlich mit einer Steuerung zur variablen Einstellung des Zündzeitpunktes ausgestattet.

Um diese variablen Einstellungen realisieren zu können, wurde ein PIC32 Mikrocontroller verbaut, welcher die nötige Rechengeschwindigkeit bereitstellen kann. Dieser wertet die Drehzahl des Motors, mittels einer Drehzahlscheibe und einem Hallsensor am Auslassventil, aus und berechnet die Einspritzsignale.

Zur Aufnahme diverser Temperaturen und Drücke am System wurde das Universalsteuergerät zusätzlich mit vier Temperatur-, vier Differenzdruck- und vier Überdrucksensoren versehen. Die aufgenommenen Werte dieser Sensoren werden von einem Arduino Mega Mikrocontroller ausgewertet und über die serielle Schnittstelle an einen PC weitergeleitet, dieser wiederum speichert sie in einer .txt-Datei ab, aus welcher später Excel Tabellen und Diagramme erstellt werden können.

Die insgesamt durch das Universalsteuergerät abgedeckten Funktionen sind unten stehend schematisch dargestellt. Eingangssignale sind darauf grün, Ausgangssignale rot eingefärbt:

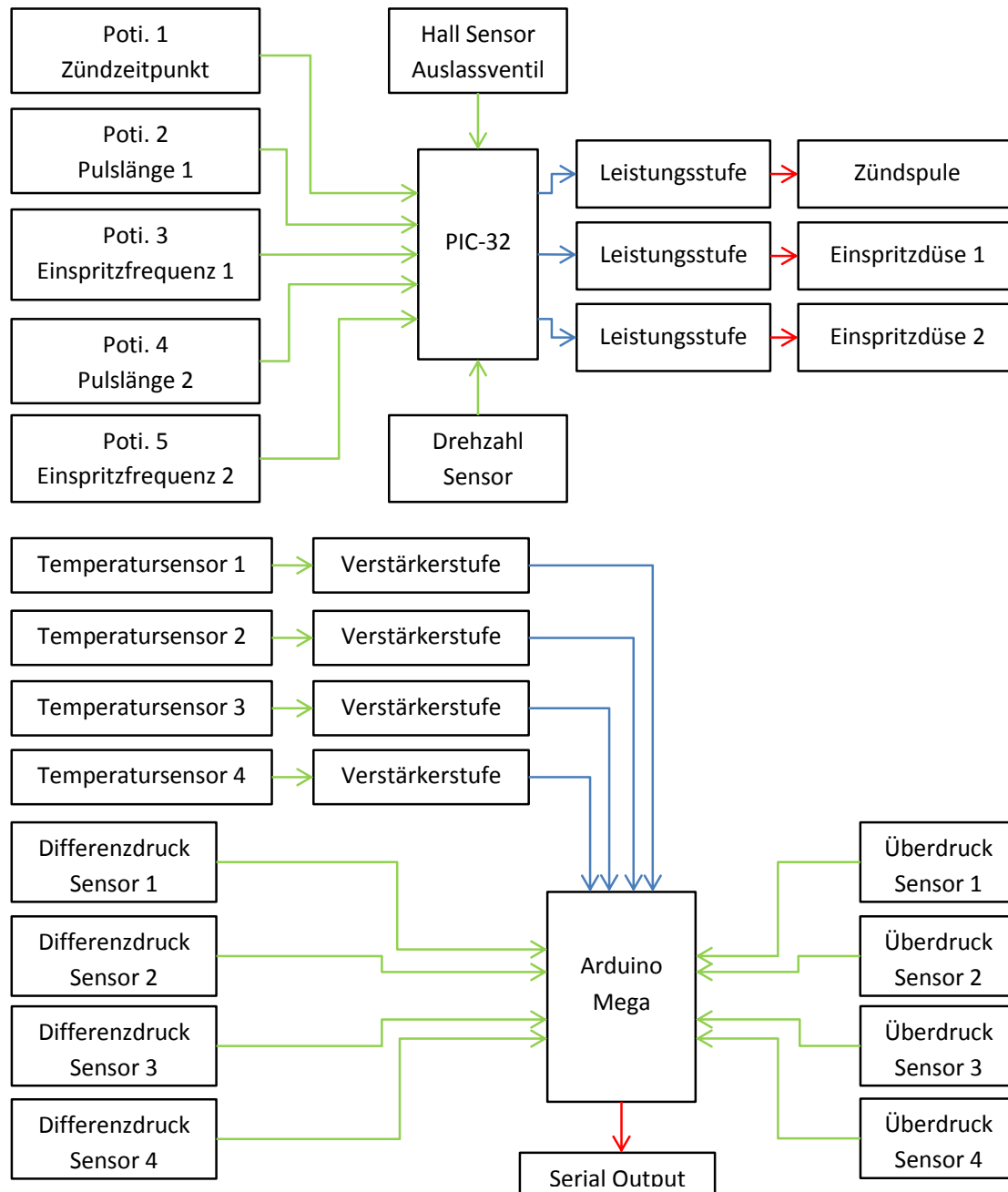


Abbildung 43: Universalsteuergerät, schematisch

7 Konstruktion unterschiedlicher Gemischbildungssysteme

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Konstruktion der Gemischbildungssysteme eingegangen. Die Unterkapitel sind dabei nach Baugruppen sortiert. Die einzelnen Baugruppen wurden nach ihrer Fertigstellung letztendlich zu den unterschiedlichen Gemischbildungssystemen kombiniert.

Alle erstellten Dokumente, Bauteil- und Baugruppenzeichnungen, sowie weitere Bilder der Konstruktions- und Entwicklungsphase befinden sich im Original im Anhang!

7.1 Kaufteil-Datenbank

Um eine möglichst realitätsnahe Konstruktion, sowie möglichst gute Simulationsergebnisse zu erzielen, ist es notwendig alle verwendeten Kaufteile zu digitalisieren. Da es in der Regel keine fertigen 3D-Modelle dieser Bauteile gibt, mussten diese einzeln nach Originalmaßen nachkonstruiert werden. Einen Auszug aus der erstellten Kaufteildatenbank ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

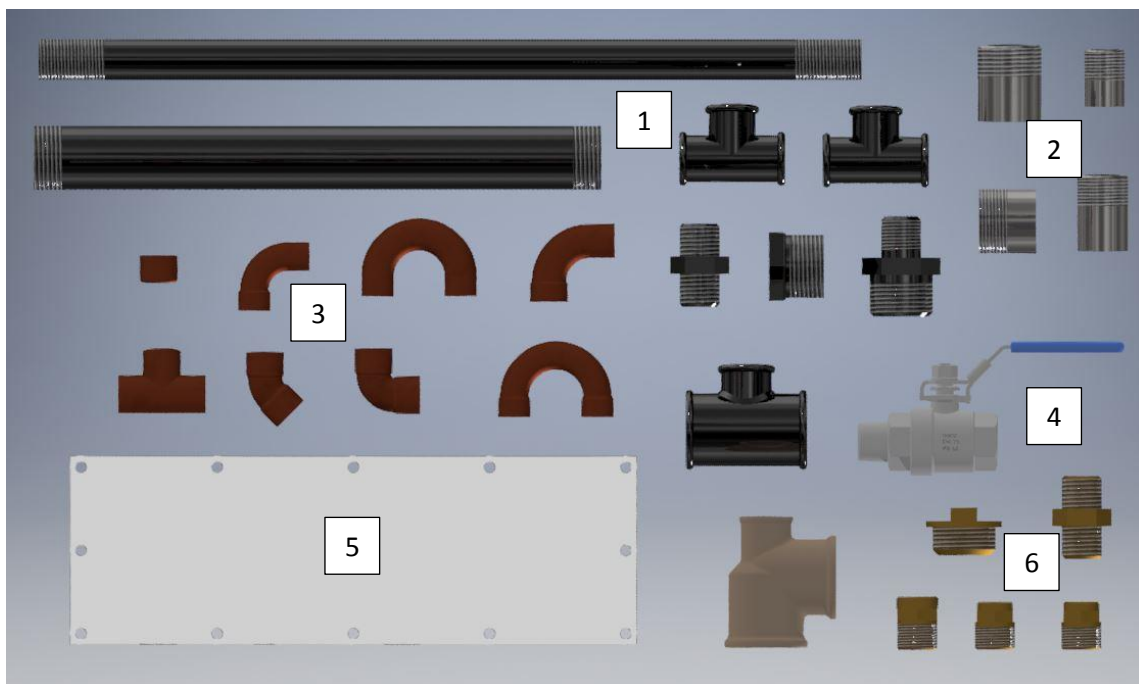


Abbildung 44: Kaufteildatenbank (Auszug)

Zu den Bauteilen, welche für die Entwicklung digitalisiert wurden, gehören wie zu sehen sind unter anderem die verwendeten Stahlrohre und Fittings (1), sowie Schweißfittings aus Edelstahl (2), Kupferfittings (3), die verwendeten 1/2“-Kugelhähne (4, 3D-Modell vom Hersteller), die Plexiglasscheibe (5) oder die verwendeten Kupferfittings (6). Alle verwendeten Modelle sind im Anhang zu finden.

7.2 Pantone V1

Da der erste Pantone Reaktor auf den frei verfügbaren *Geet-Plans* basiert, wurden auch hier die verwendeten Teile digitalisiert und als Baugruppe zusammengefügt. Eine Konstruktion von Fertigungsteilen war nicht notwendig.

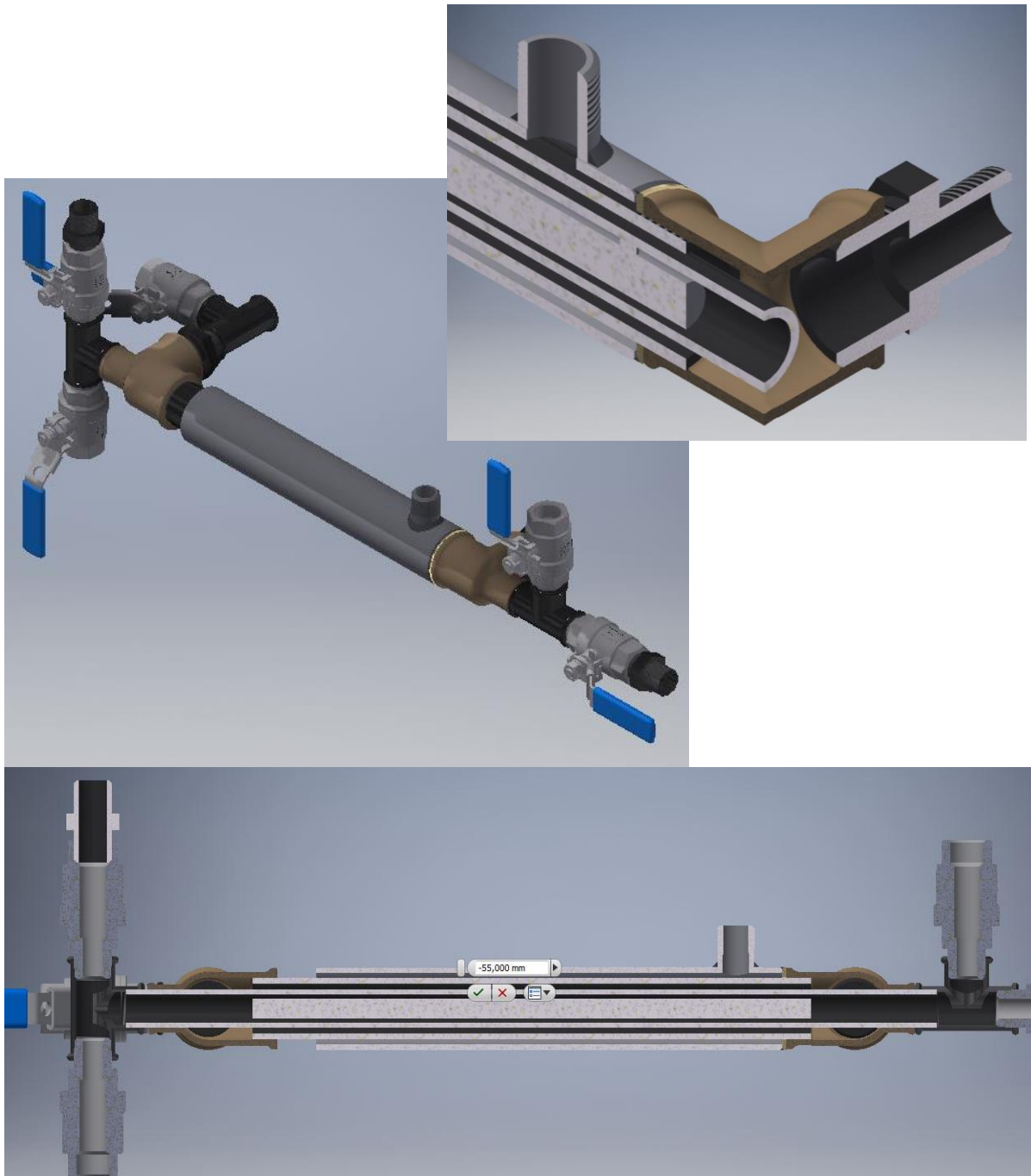


Abbildung 45: Konstruktion Pantone V1, Collage

7.3 Kraftstoffvergaser

Der, durch Tom Ogles Arbeiten inspirierte, Kraftstoffvergaser besteht zum Teil aus Kaufteilen, zum anderen Teil aus Fertigungsteilen. Einen kurzen Überblick sollen die folgende Tabelle und Darstellungen ermöglichen:

Tabelle 3: Konstruktion Vergasertank

Kaufteile	Überarbeitete Kaufteile	Fertigungsteile
½" Doppelnippel aus Messing (1)	Plexiglas Scheibe (6)	Edelstahl Behälter (8)
½" auf 12mm Lötfittings aus Messing (2)	Kupfer Siebrohr (7)	Aluminium Deckel (9)
1" Stopfen aus Messing (3)		
Schrauben und Muttern (4)		
Kupferfittings und –Rohre (5)		

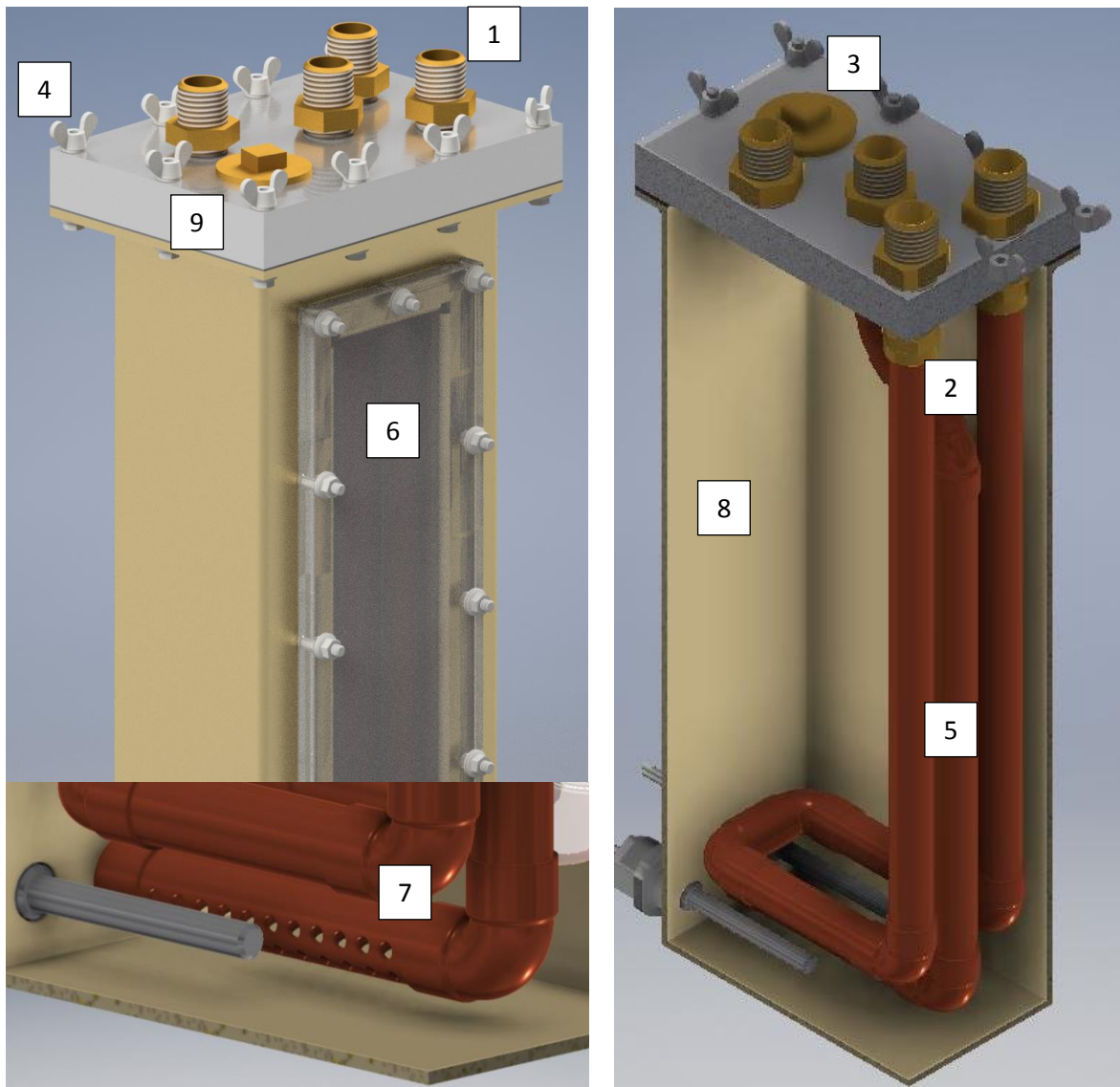


Abbildung 46: Vergasertank, Collage

7.4 Anschlussflansche

Die zu testenden Systeme wurden an einem Notstromaggregat betrieben. Hierfür war es notwendig spezielle Anschlussflansche für die Einlassseite des Motors, also einen Anschluss an den Vergaser (wo vorher der Luftfilter montiert war), sowie für die Auslassseite des Motors (wo sonst Krümmer und Schalldämpfer montiert waren) zu konstruieren. Um eine hohe Passgenauigkeit zu erreichen wurden die konstruierten Flansche vor der Bestellung 1:1²⁹ ausgedruckt und mit der Vergaserdichtung sowie der Krümmerdichtung verglichen:

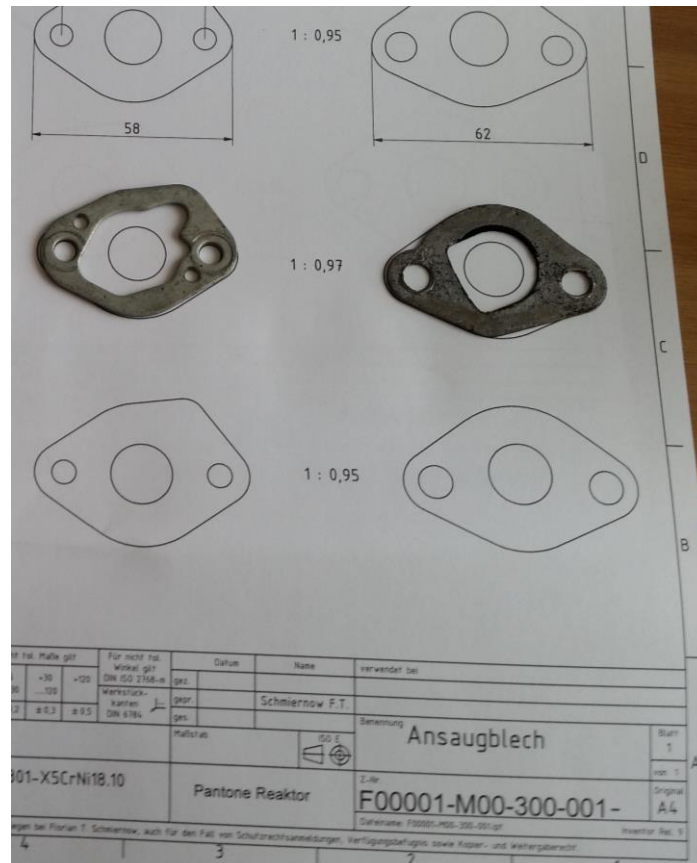


Abbildung 47: Konstruktion Anschlussflansche, Konstruktionszeichnung F00001-M00-300-002

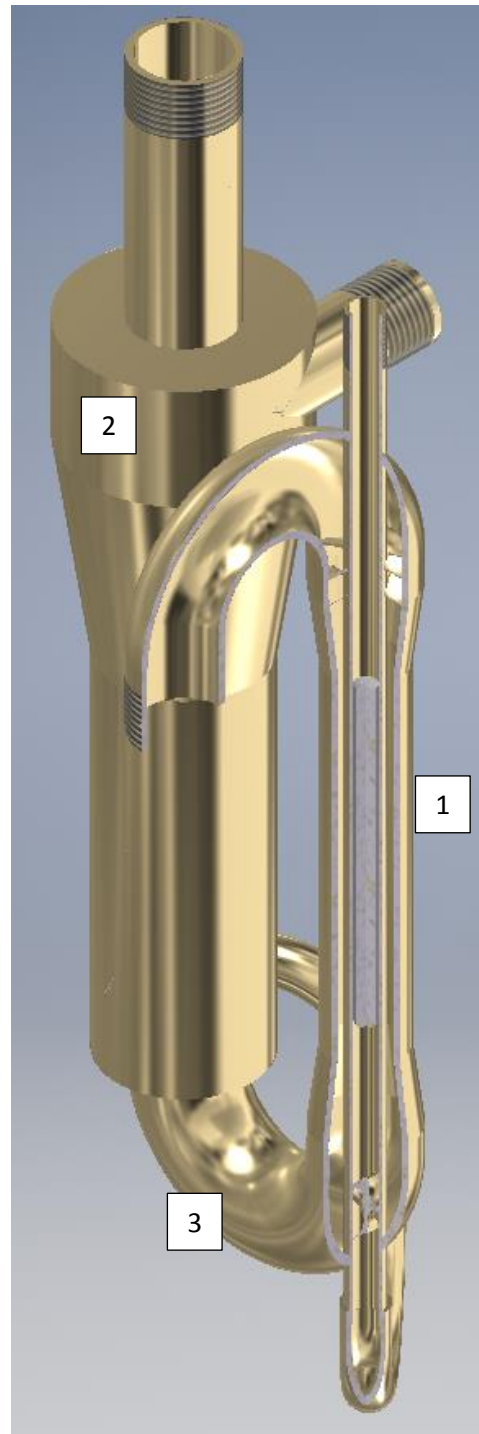
²⁹ Hinweis: Auf der Zeichnung ist der Maßstab 1:0,97 notiert, dieser ergibt sich auf Grund der Maßungengenauigkeiten beim Drucken, die Kontrollmaße 58 mm und 62 mm wurden nach dem Druck nachgemessen, bei einem eingestellten Maßstab von 1:0,97 ergibt sich ein tatsächlicher 1:1 Maßstab auf dem Papier!

7.5 Pantone V2

Nach der Auswertung der Versuchsergebnisse der ersten Pantone Variante haben sich einige Verbesserungsansätze ergeben. Diese sind in die Konstruktion der zweiten Pantone Variante eingeflossen. Unter anderem wurde die gesamte Dimensionierung des Reaktors auf den vorliegenden Motor angepasst. Weiter wurde der Reaktor, um eine bessere Haltbarkeit zu erzielen, aus V2A Edelstahl gefertigt. Grundlage der Konstruktion waren diesmal die im Handel verfügbaren Edelstahlschweißittings. Diese ermöglichten eine einfache und schnelle Beschaffung der notwendigen Bögen und Reduzierungen. Zusätzlich wurden die Rohrmaße auf handelsübliche Zollrohre angepasst.

Zusätzlich wurde der Reaktor (1) um eine Vorheizkammer (2) erweitert. Wie in der Abbildung rechts zu sehen ist, wird das Abgas zuerst von oben nach unten durch den Reaktor geführt und danach mit einem 180° Bogen (3) wieder nach oben geleitet. Dort wird die weitere restliche Abgaswärme genutzt, um die Luft für den Verdampfungsprozess vorzuheizen. In der dritten Variante dient diese Kammer schließlich als Einspritzkammer, in die die Kraftstoffe eingespritzt werden. Auch hier wird die abgegebene Abgaswärme genutzt, um den Kraftstoffen die nötige Verdampfungswärme³⁰ zuzuführen.

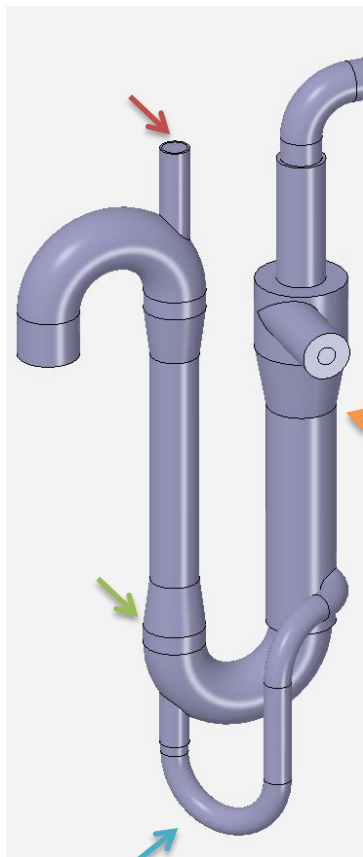
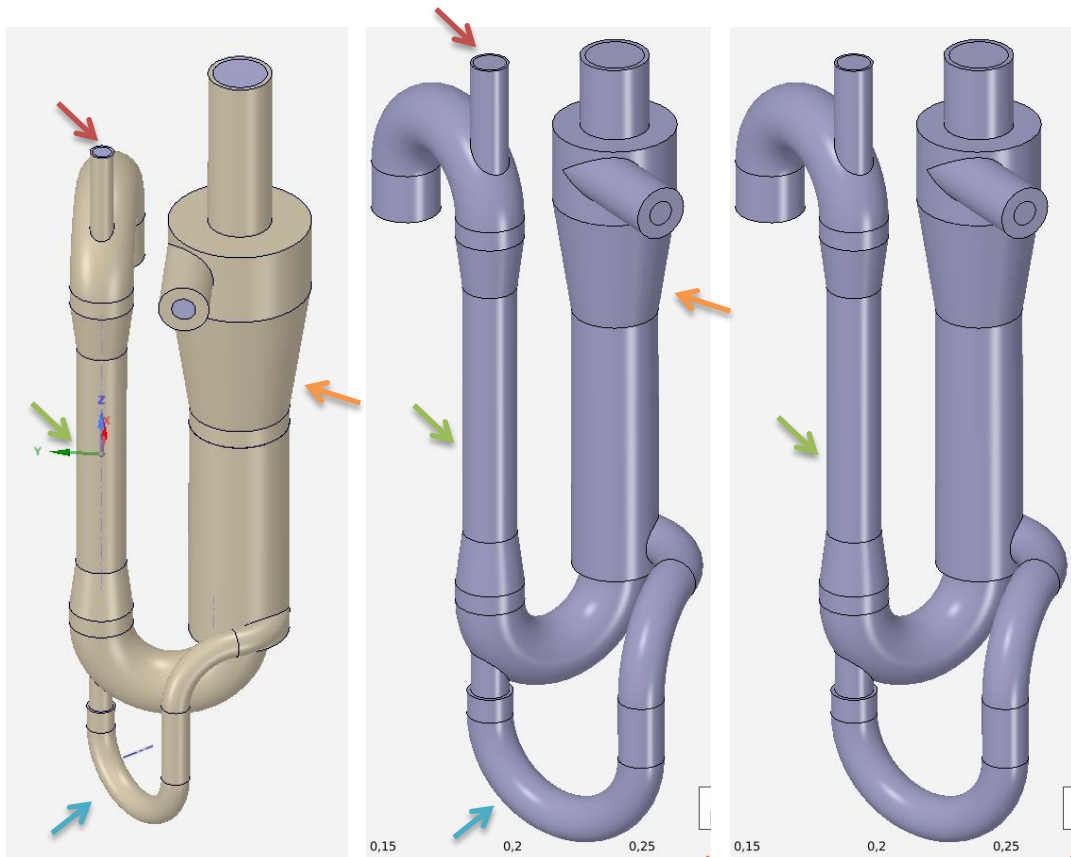
Um die genauen Dimensionen, vor allem aber das Strömungsverhalten, von Reaktor und Vorheizkammer noch vor der eigentlichen Montage und Herstellung beurteilen zu können, wurde eine aufwendige Simulation mit dem Programm Ansys AIM in vier Schritten durchgeführt. In jedem dieser Schritte wurden die Radien und Wandstärken der Rohre basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Simulationsergebnisse angepasst und optimiert.



Die einzelnen Simulationsprotokolle sowie ein tabellarischer Vergleich der so gewonnen Kenngrößen sind im Anhang zu finden!

³⁰ „Die Verdampfungswärme bzw. Verdampfungsenergie ΔQ_v ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um eine bestimmte Menge einer Flüssigkeit vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand zu bringen (Verdampfen). Die Verdampfungswärme ist ein wichtiger Kennwert in der Dampfdruckkurve. Die meist recht hohe Wärmemenge wird technisch zur Kühlung angewendet. Beim umgekehrten Prozess (Kondensation) wird genau diese Wärmemenge wieder als Kondensationswärme frei.“

Einen guten Überblick über die geänderten Formen bieten die Darstellungen der verwendeten Simulationsgeometrien im direkten Vergleich:



Wie sich erkennen lässt, wurden bestimmte Bereiche der Konstruktion systematisch angepasst. So zum Beispiel der Durchmesser von innerem Rohr und Kern (rot), der Durchmesser des äußeren Rohres (grün), Form und Größe des Überströmkanals (blau) oder die Größe der Vorheizkammer (orange).

Parallel zu den Simulationen wurde eine Excel Tabelle zum Vergleich der Simulationsergebnisse geführt. Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Tabelle um div. Diagramme erweitert, welche einen schnellen optischen Vergleich der Ergebnisse möglich macht. Die Tabelle ist ebenfalls im Anhang zu finden, unter dem Titel *„Simulationsdaten.xlsx“*.

Abbildung 48: Entwicklung Simulationsgeometrien, Collage

Die zwei folgenden Abbildungen sollen nun beispielhaft den Entscheidungs- und Entwicklungsprozess während der Simulationsphase darstellen. Es wird zum einen der durchschnittliche, absolute Druck im gesamten Einlasstrakt des Reaktors ‚Absolute Pressure [bar] Intake‘ sowie die Strömungsgeschwindigkeit in diesem ‚Velocity Magnitude [m/s] Intake‘ dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung des Bereiches Intake wurden zusätzlich die Strömungslinien für diesen Bereich abgebildet:

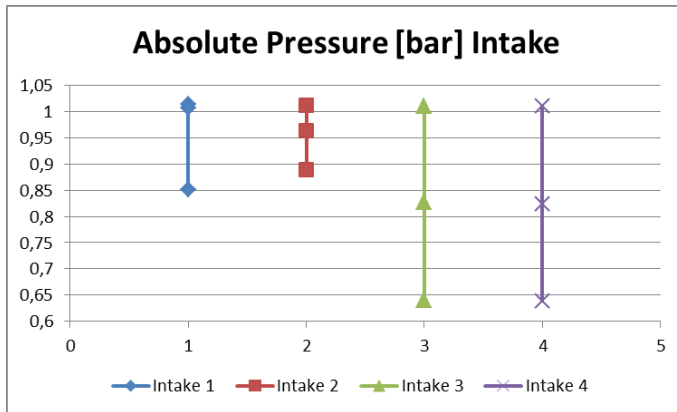


Abbildung 50: Absolute Pressure [bar], Intake

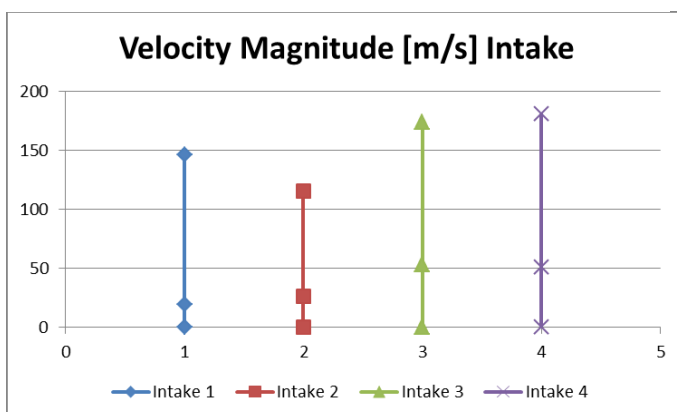


Abbildung 49: Velocity Magnitude [m/s], Intake

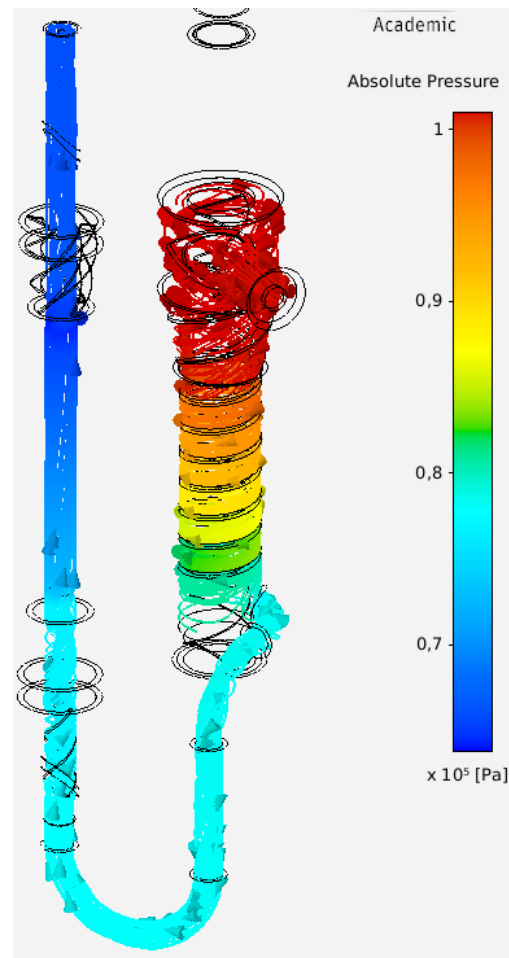
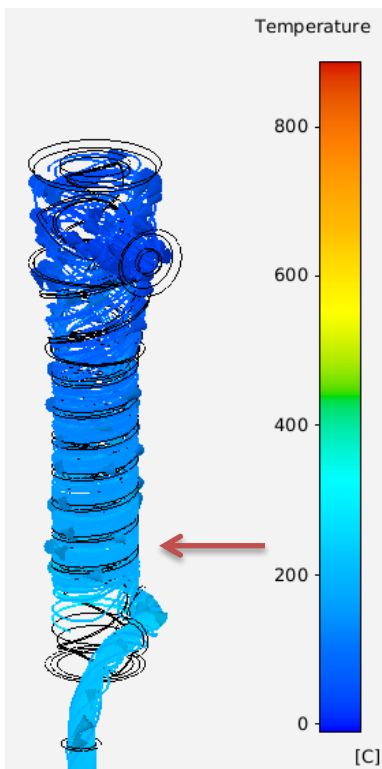
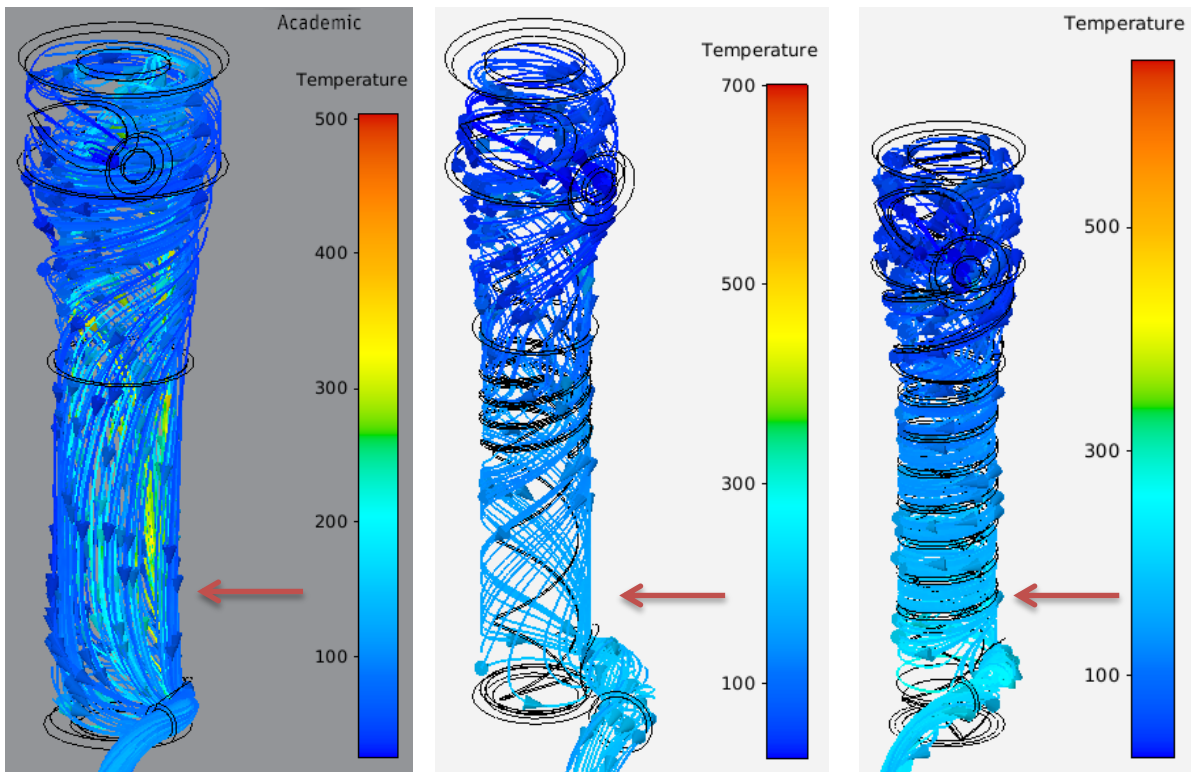


Abbildung 51: Strömungslinien, Absolute Pressure [bar], Intake

Im Inneren des Reaktors sind hohe Strömungsgeschwindigkeiten bei möglichst niedrigem Druck gewünscht. Die Diagramme zeigen, dass durch die Anpassung des inneren Rohrdurchmessers sowie des Kerndurchmessers, der Druck in der Kammer reduziert und die Strömungsgeschwindigkeit erhöht werden konnten.

Des Weiteren konnten mit Hilfe der Simulation weitere kritische Entwurfsfaktoren optimiert werden, so zum Beispiel das Strömungsverhalten in der Vorheizkammer. Dieses ist nicht direkt anhand von Daten in Form von Zahlenwerten zu beurteilen, sondern vielmehr anhand des optischen Ergebnisses. Die Entwicklung der Vorheizkammer ist hier beispielhaft anhand des Temperaturplots im Einlass dargestellt (Temperatur entspricht der Farbänderung entlang der Strömungslinien).



Wie in den vier Abbildungen zu erkennen ist, konnte durch eine Anpassung der Konstruktion das Strömungsverhalten in der Vorheizkammer positiv beeinflusst werden. Zum einen ist die theoretische Ausgangstemperatur im unteren Bereich von ca. 100°C bis 120°C auf ca. 250°C bis 300°C gestiegen, zum anderen konnte die gewünschte wirbelnde Umströmung der Gase um das Auspuffrohr im Inneren erzeugt werden. Die so strömenden Gase haben nun mehr Kontakt zur heißen Auspuffwand und können so mehr Wärme übertragen.

Einen guten Überblick über diese Simulationen bieten die Word Dokumente ‚*Simulationsprotokoll_1.docx*‘ bis ‚*Simulationsprotokoll_4.docx*‘ welche dem Anhang zu entnehmen sind!

Abbildung 52: Simulation Vorheizkammer, Collage

Darüber hinaus bieten die Ergebnisse der Simulation interessante Einblicke in die Idee einer solchen Energieübertragung (in Form von Wärme) wie sie ein Pantone Reaktor liefern könnte. Durch die spezielle Konstruktion und die Einengung der Abgase im Bereich des Reaktors entsteht ein signifikantes Strömungsverhalten, welches anhand der folgenden Darstellungen erläutert werden soll:

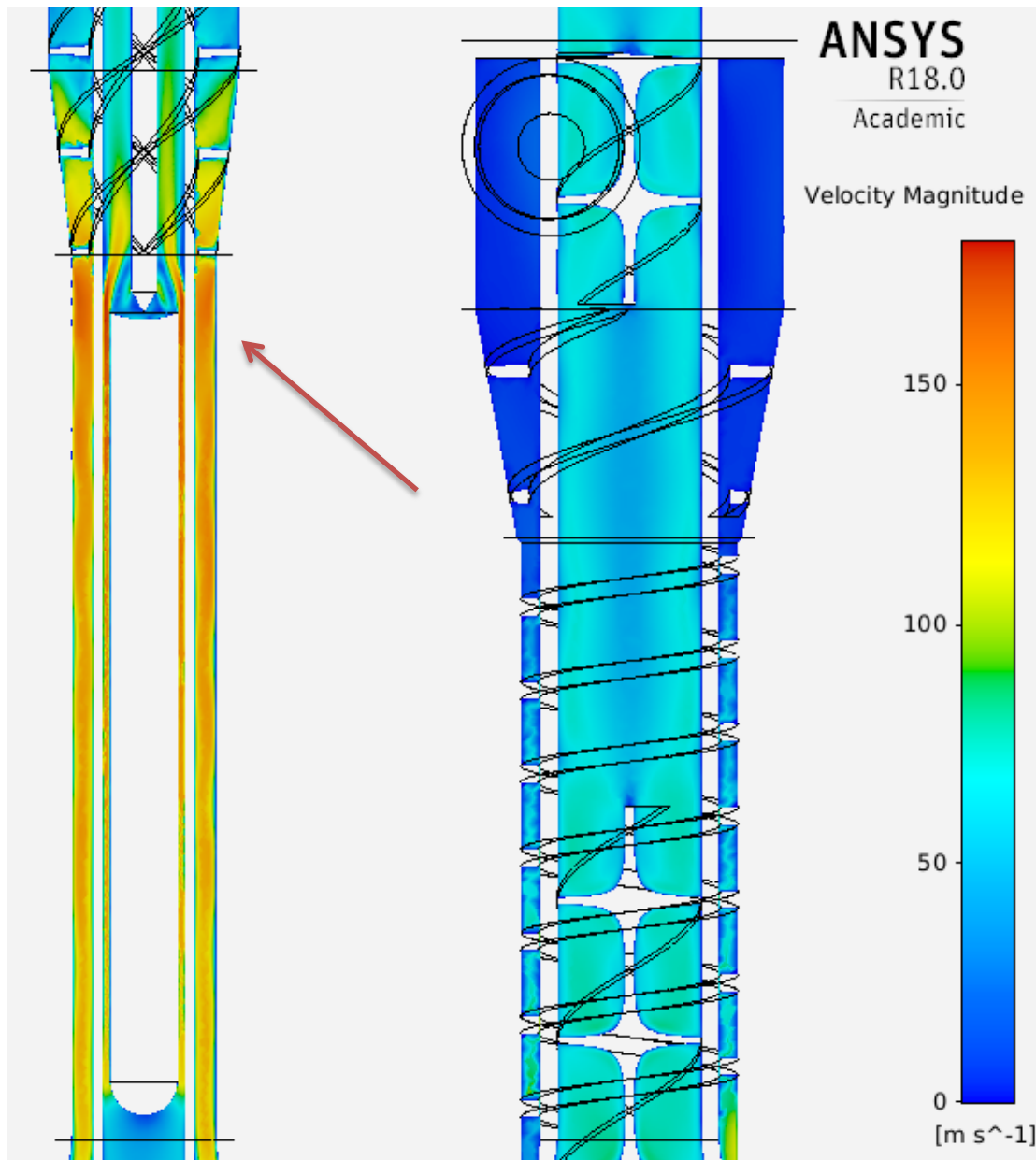


Abbildung 53: Velocity Magnitude Simulation

Wie zu erkennen ist, die Strömungsgeschwindigkeit sowohl des Abgases als auch des Kraftstoffgases, vor allem im Bereich hinter dem Kern, besonders hoch.

Vergleicht man diese Stelle nun genau mit den dort vorherrschenden Temperaturen...

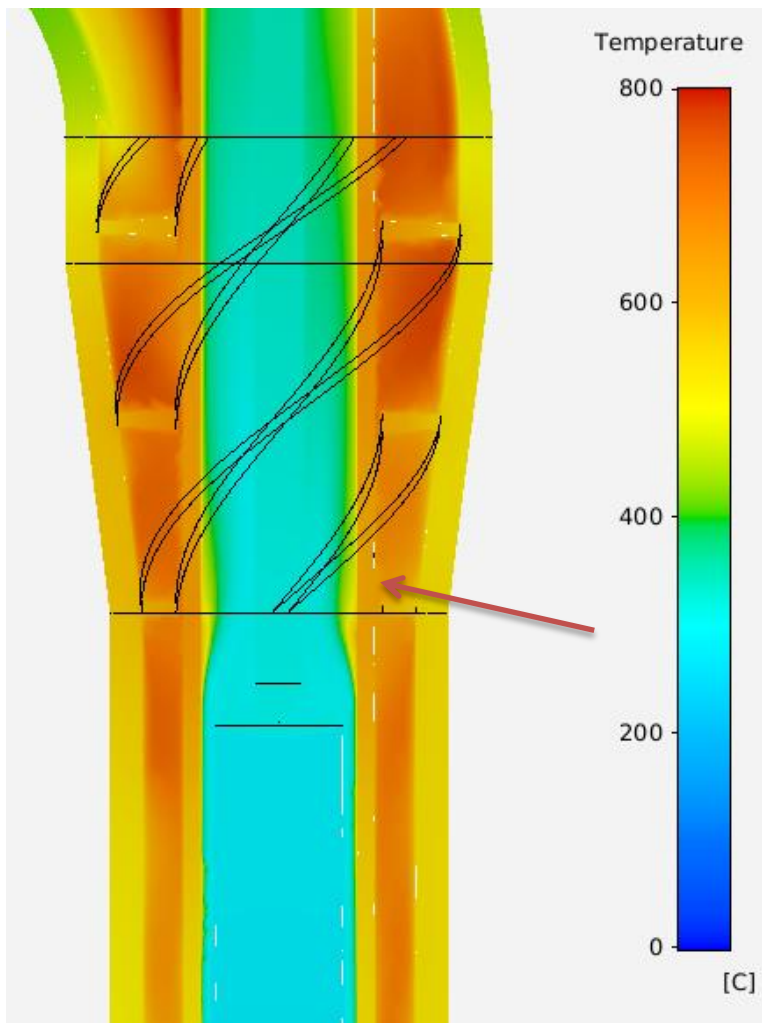


Abbildung 54: Temperature Cut Simulation

... wird schnell deutlich, dass die hohe Strömungsgeschwindigkeit dazu beiträgt, dass an dieser Stelle viel Wärme ausgetauscht wird. Die Abgasseite verliert im Bereich der Einengung deutlich an Temperatur, dass entgegenströmende Kraftstoffgas nimmt im selben Bereich besonders viel Wärme auf. Zusätzlich tritt im Bereich hinter dem Kern eine hohe turbulente, kinetische Energie auf (siehe rechts). Die Kombination dieser drei Faktoren bedeutet einen hohen Energieaustausch zwischen den zwei Gasen und hohe kinetische Energie für die Kraftstoffvorbehandlung im Bereich hinter dem Kern.

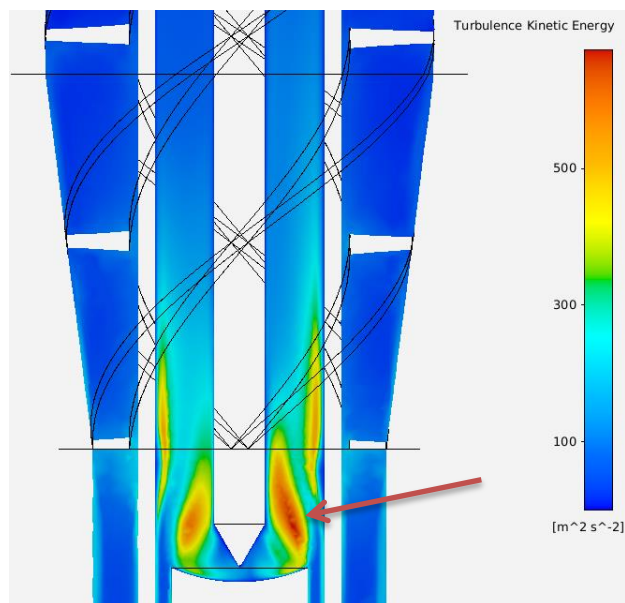


Abbildung 55: Turbulence Kinetic Energy Simulation

7.6 Pantone V3

In der dritten Variante des Pantone Reaktors kamen, wie bereits erwähnt, Einspritzdüsen zum Einsatz. Deshalb musste die Konstruktion der Einspritzkammer für deren Aufnahme entsprechend angepasst werden. Dazu wurden im ersten Schritt die Einspritzdüsen (1) vermessen und in Form eines 3D-Modells digitalisiert (siehe rechts). Anschließend konnten passende Aufnahmhülsen (2) konstruiert und an die Einspritzkammer (3) angepasst werden:



Abbildung 56: 3D-Modell Bosch Einspritzdüse

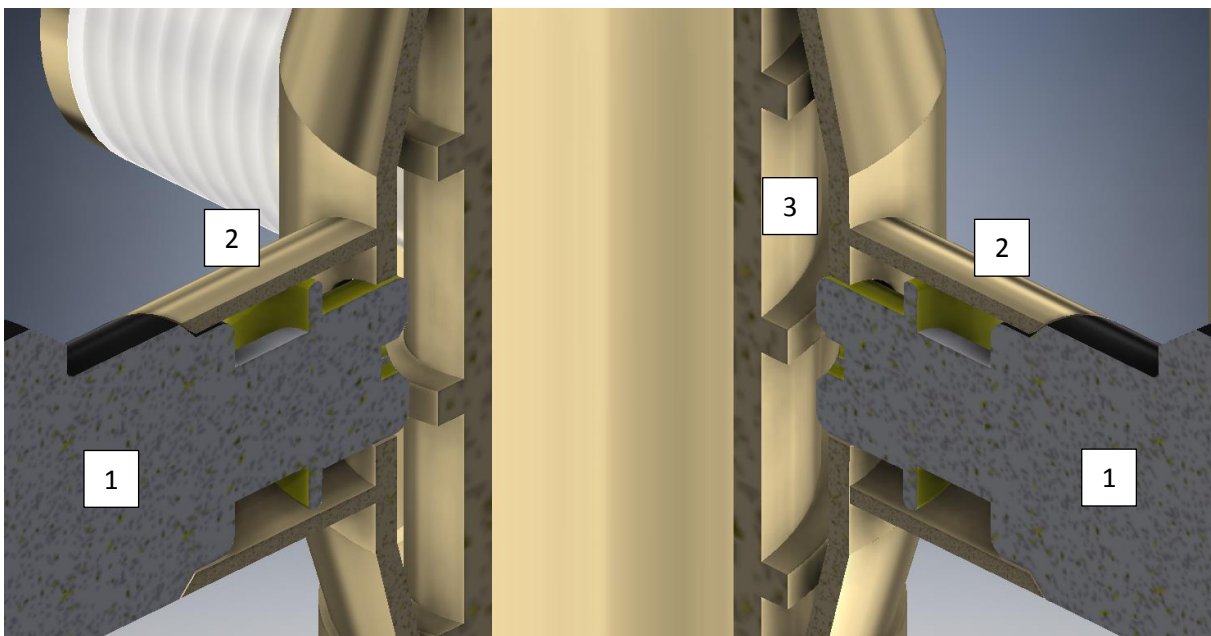


Abbildung 57: Konstruktion, Aufnahmen für Einspritzdüsen

Dabei wurden die Maße der Vorheizkammer aus Variante 2 übernommen. Folglich konnten für die unterschiedlichen Tests der Varianten 2 und 3 ein und derselbe Reaktoraufbau verwendet werden.

7.7 Pantone V4

Der Reaktor des Pantone V4 wurde ohne eigentliche Konstruktionsphase entwickelt. Dies war nicht nötig, da die Längen, Durchmesser und Gewindegrößen von den vorherig entwickelten Reaktoren übernommen und weiter genutzt wurden. Die Materialien und Abmaße wurden dementsprechend direkt während der Fertigung passend gewählt (z.B. $\frac{3}{4}$ “ Rohrgewinde für den Anschluss an einen Fitting, 24 x 1,5mm metrisches Feingewinde für die großen Klemmringverschraubungen, Rohre entsprechender Durchmesser, etc.).

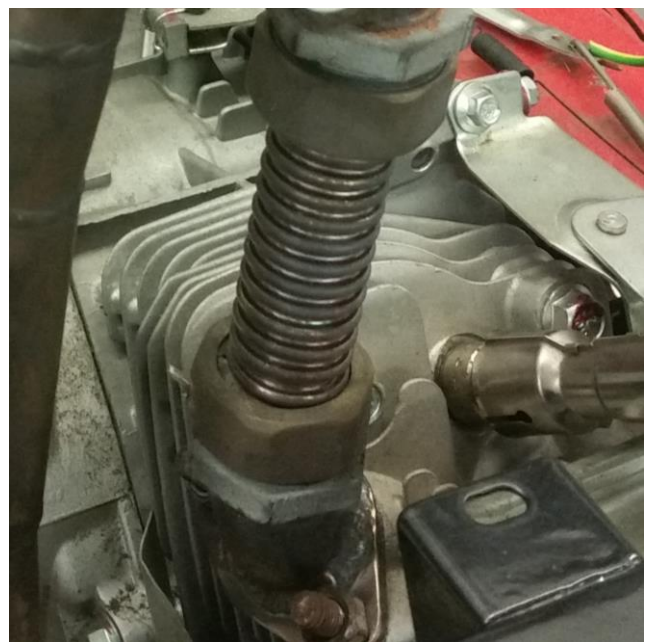
8 Bau und Montage

8.1 Anschlussflansche

Die in Kap. 13.4 beschriebenen *Anschlussflansche* dienen der Verbindung zwischen Motorauslass und Eingang der Abgasseite des Reaktors sowie der Verbindung zwischen Reaktorausgang der Kraftstoffgasseite und dem Motoreinlass. Diese wurden speziell auf die Form des Auslasses sowie auf die Form des Vergasereinlasses angepasst. Da die mitgelieferten Dichtungen der Edelstahlwellschläuche keine geeignete Temperaturbeständigkeit für den Einsatz im Bereich des Krümmers boten, kam an dieser Stelle als Dichtungswerkstoff Kupfer in Form eines flachen O-Rings zum Einsatz. Zusätzlich wurde die Verschraubung mit Hochtemperatursilikon (rot) abgedichtet:



Abbildung 58: Anschlussflansche, oben links: Auslass, oben rechts: Einlass, unten: Auslass ab Pantone V2



Wie bereits erwähnt ließ sich ein zu geringer Strömungsquerschnitt in den $\frac{1}{2}$ " Edelstahlwellschläuchen feststellen. Deshalb wurden sowohl der Anschlussflansch abgasseitig als auch der nachfolgende Edelstahlwellschlauch ab der Variante 2 deutlich vergrößert (Krümmer und Flansch auf $\frac{3}{4}$ ", Edelstahlwellschlauch auf 1", siehe Abbildung rechts).

8.2 Kraftstoffvergaser

Nach der Lieferung der extern gefertigten Bauteile, wurden diese zu einem gasdichten Kraftstoffvergaser zusammengebaut. Dazu wurde die Plexiglasscheibe (1) gebohrt, eingesetzt und verschraubt (2). Zum Aufsprudeln des Kraftstoffes befindet sich im inneren des Tanks ein Kupfersiebrohr (3), welches mittels weiterer Kupferfittings (4) zum Deckel (5) geführt wird. Um die benötigte Verdampfungswärme zuzuführen wird die Abgaswärme genutzt. Ohne Zufuhr von Wärme kühlt sich die Flüssigkeit durch die Verdampfung so lange ab, bis die Temperatur der Flüssigkeit unter die der Verdampfungsgrenze gesunken ist und keine Flüssigkeit mehr verdampfen kann. Um dies zu verhindern wird das noch warme Abgas durch eine Kupferschleife (6) im inneren des Tanks geführt. Die Menge an einströmendem Abgas kann später über einen Kugelhahn geregelt werden. Um zusätzlich zu verhindern, dass nicht verdampfter Kraftstoff in Form von kleinen Tröpfchen durch das Aufsprudeln in den Ansaugtrakt oder den Reaktor gelangt, befindet sich unter dem Auslass ein Filter aus Edelstahlwolle (7).

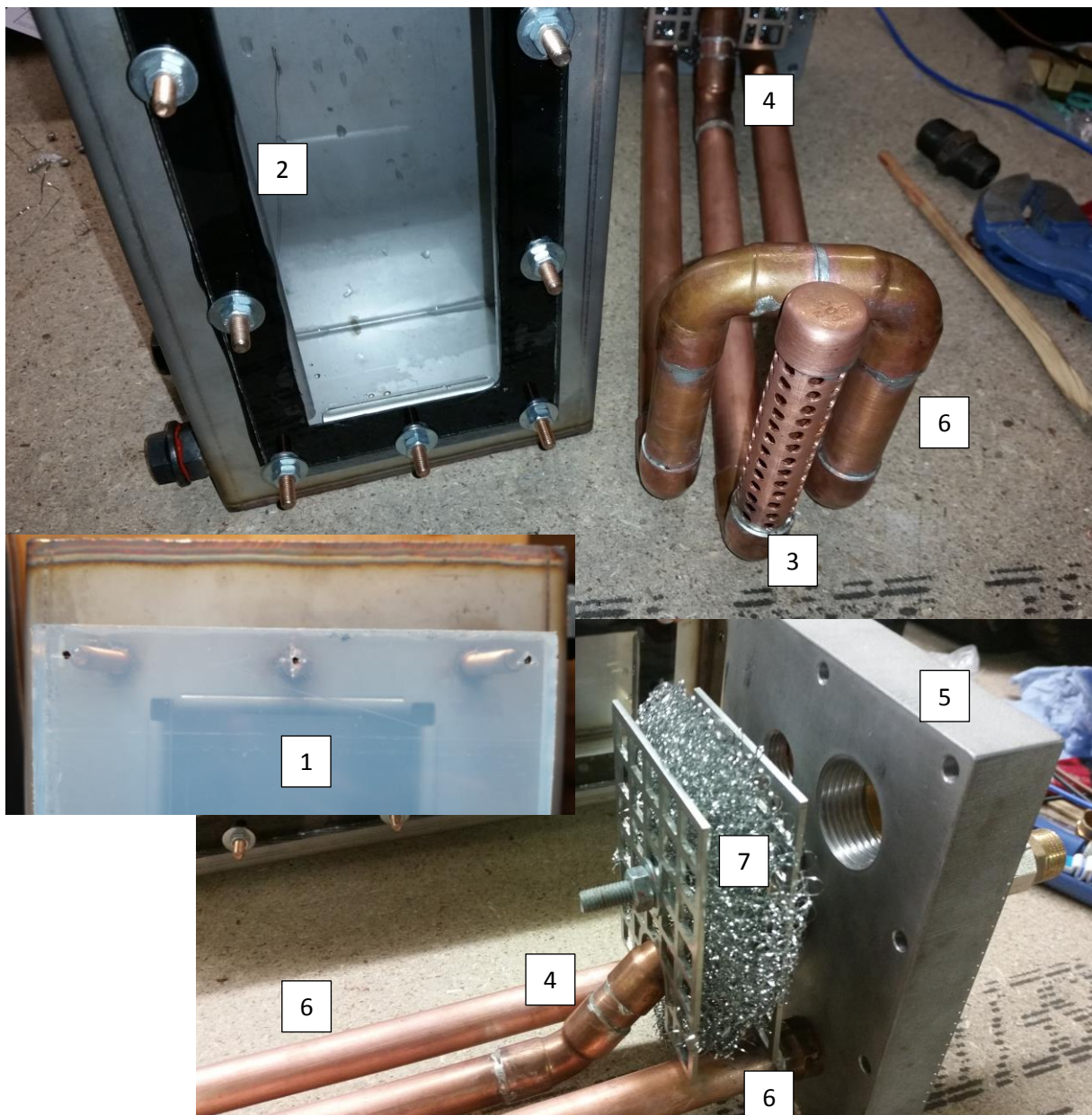


Abbildung 59: Kraftstoffvergaser Bau

8.3 Pantone V1

Die Fittings der Pantone Variante 1 wurden entsprechend der Entwürfe zusammgebaut und mit Hochtemperatursilikon abgedichtet, der Reaktor als solches am Notstromaggregat positioniert und befestigt. Letztendlich wurden alle Baugruppen noch mit ½“ Edelstahlwellschläuchen verbunden:

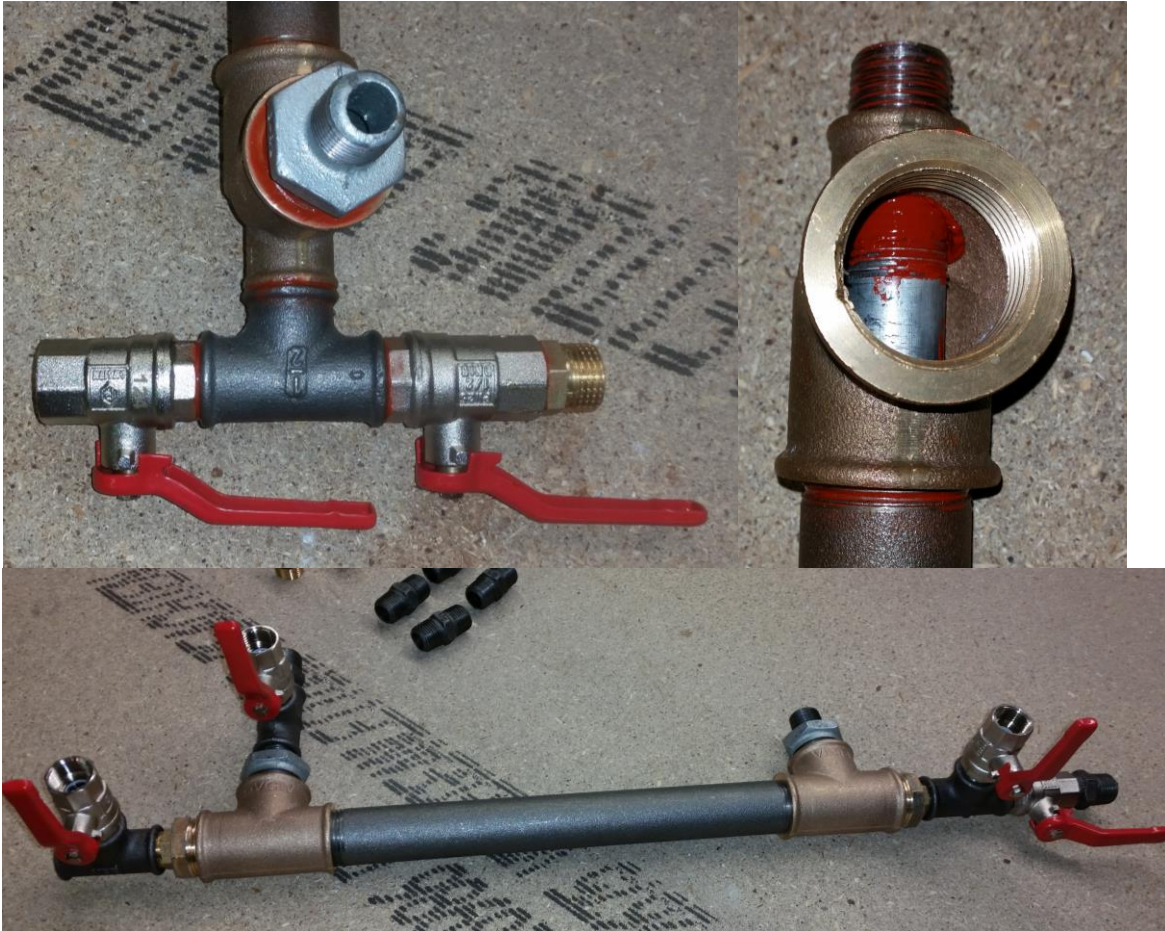


Abbildung 60: Pantone Reaktor V1 Bau

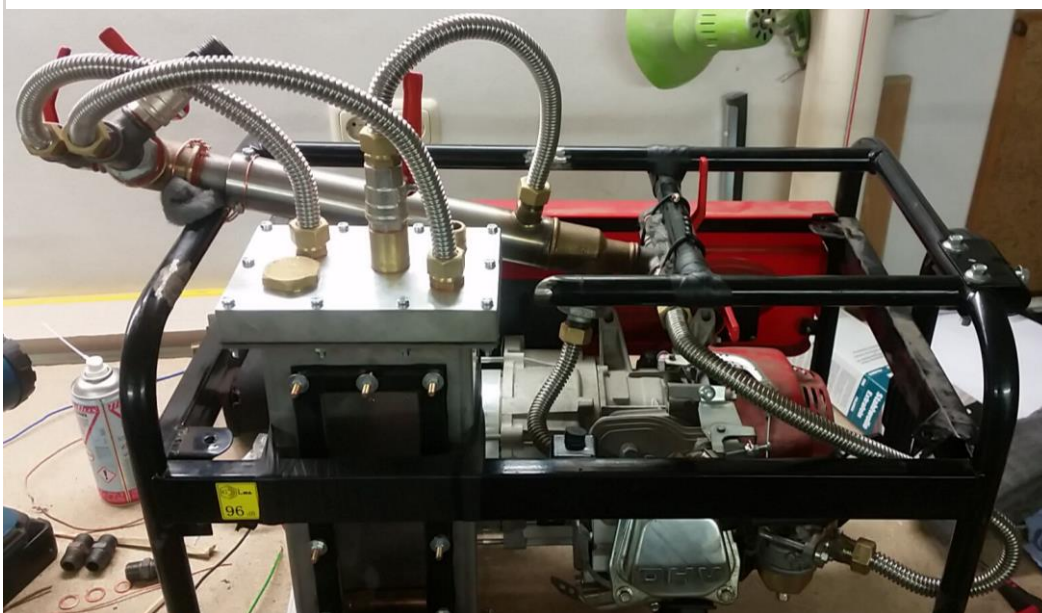


Abbildung 61: Pantone V1 komplett montiert

8.4 Pantone V2

Für den Bau des zweiten Pantone Reaktors kamen hauptsächlich Edelstahlschweißfittings sowie Messingfittings zum Einsatz. Diese wurden entsprechend der Konstruktion nachbearbeitet (z.B. gebohrt, Radien angepasst, gekürzt, etc.) und anschließend unter Zuhilfenahme von Reformiergas zusammen geschweißt, bzw. im Falle der Messingfittings (wieder abgedichtet mit Hochtemperatursilikon) verschraubt:



Abbildung 62: Pantone V2 Bau, Collage

8.5 Pantone V3

Auf Grund der vielen Baugruppen der dritten Variante nahm die Bauzeit dieser Variante deutlich mehr Zeit in Anspruch als die der vorherigen. Als Reaktor wurde zwar der der zweiten Variante übernommen, jedoch stieg die Anzahl der angeschlossenen Peripherbaugruppen. Zum einen mussten für die Einspritzdüsen zwei getrennte Kraftstoffversorgungssysteme inklusive Spannungsversorgung ausgelegt und montiert werden, zum anderen musste das Universalsteuergerät inklusive eigener, doppelter Spannungsversorgung entworfen, gebaut und getestet werden.

8.6 Pantone V4

Für den Bau der Endstücke (Abbildung rechts) des Pantone V4 wurden Einzelstücke aus S235 Rohr gefertigt, Gewinde aufgedreht und diese danach verschweißt. Mit Hilfe der Klemmringverschraubungen (siehe Kap. 11.6 *Pantone V4*) wurden im Anschluss das innere und äußere Rohr montiert.



Abbildung 63: Stahl Endstück Pantone V4

Zur Montage des Reaktors am Notstromaggregat wurde eine Klemmhalterung (1) aus Stahlblech und -Profil gefertigt und mit dem Rahmen des Aggregats verschraubt. Zum Anschluss des Reaktors an den Auslass wurde erneut ein 1" Edelstahlwellschlauch in Verbindung mit einem passenden Anschlussflansch (2) verwendet. Für die Verbindung des Reaktors mit den Vergasertank (3) wurden die Fittings und Kugelhähne (4) der vorherigen Varianten übernommen, sowie die bereits bekannten 1/2" Edelstahlwellschläuche. Auch der Kernhalter (5) wurde von den vorherigen Varianten

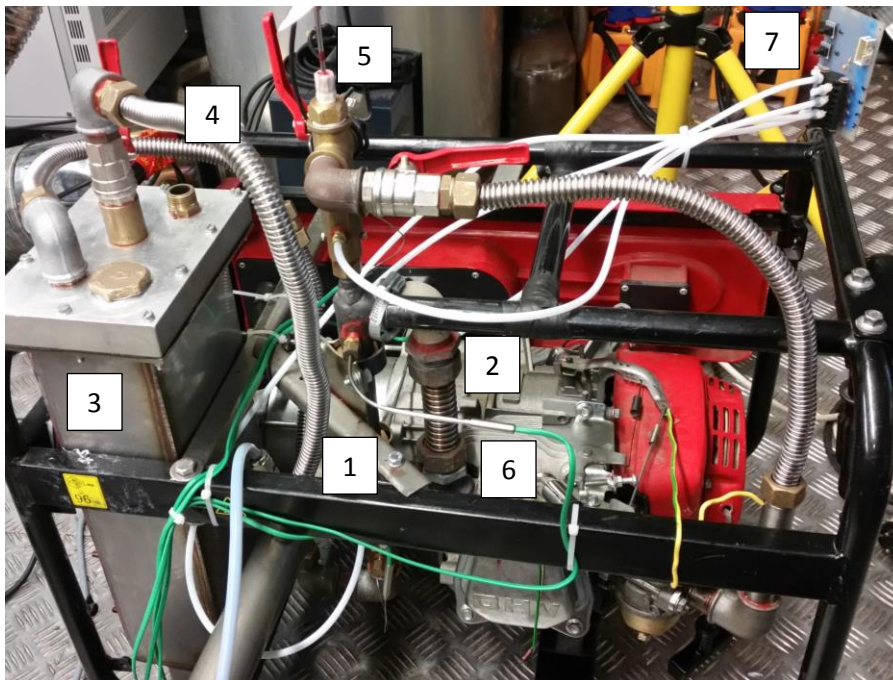


Abbildung 64: Pantone V4, Bau

übernommen, die tiefe des Edelstahlstabes in der Mitte an die neue Kernposition angepasst. Ebenso wurden, wie in der dritten Variante, die Mantel-Thermoelemente (6), für die Temperaturmessungen, sowie die Drucksensoren (7), für die Druckmessungen, angebracht.

8.7 Universalsteuergerät

Um die bereits in Kap. 12.1 *Universalsteuergerät* beschriebene elektronische Versuchsschaltung zu fertigen, wurde ein, den Anforderungen entsprechender, Schaltplan entworfen und mit der kostenlosen Software *LT-Spice*³¹ festgehalten. Der komplette Schaltplan ist im Anhang zu finden.

Um die elektronischen Bauteile und Mikrocontroller angemessen zu schützen, wurde die Versuchsschaltung in einem Stahl / Aluminium Gehäuse (1) untergebracht. An der Vorderseite befinden sich fünf Potentiometer (2) mit welchen die folgenden Funktionen abgedeckt werden (von links nach rechts): Zündzeitpunkt zwischen OT und 10° vor OT, Pulslänge Einspritzdüse 1 von 10ms bis 100ms, Einspritzfrequenz Düse 1 von $1 \cdot n$ bis $0,5 \cdot n$, Pulslänge Einspritzdüse 2 von 0ms bis 50ms, Einspritzfrequenz Düse 2 von $1 \cdot n$ bis $0,1 \cdot n$ ³². Darüber befinden sich zwei Status LED's (3), welche die Zündsignale analog zu den ausgegebenen Signalen wiedergeben. Um die Signale getrennt ein- bzw. ausschalten zu können, ohne die gesamte Stromversorgung zu unterbrechen, gibt es für die drei Ausgangssignale zusätzlich Kippschalter (4). Um bei dem System eine Art *Choke*-Funktion zu ermöglichen, wurde für das Einspritzsignal 1 ein Taster (5) vorgesehen, wird dieser betätigt öffnet sich die erste Einspritzdüse.

Da in der Versuchsschaltung Komponenten unterschiedlicher Spannungen verbaut sind, wird das Universalsteuergerät über ein handelsübliches PC-Netzteil gespeist, welches sowohl eine 12V (für die Einspritzdüsen und die Zündspule) als auch eine 5V Spannungsversorgung (für die Mikrocontroller und weitere integrierte Schaltkreise wie UND-Gatter) zur Verfügung stellen kann. Zur Überwachung der zwei Versorgungsspannungen sind auf der Oberseite des Universalsteuergerätes zwei Status-LED's (6) angebracht, die Linke für 5V, die Rechte für 12V. Im Falle eines Notfalls oder sonstiger Komplikationen wurde aus Sicherheitsgründen ein Zweikanal-Not-Aus-Schalter (7), ebenfalls in die Oberseite der Box, integriert. Wird dieser betätigt ist die Versuchsschaltung sofort spannungsfrei.

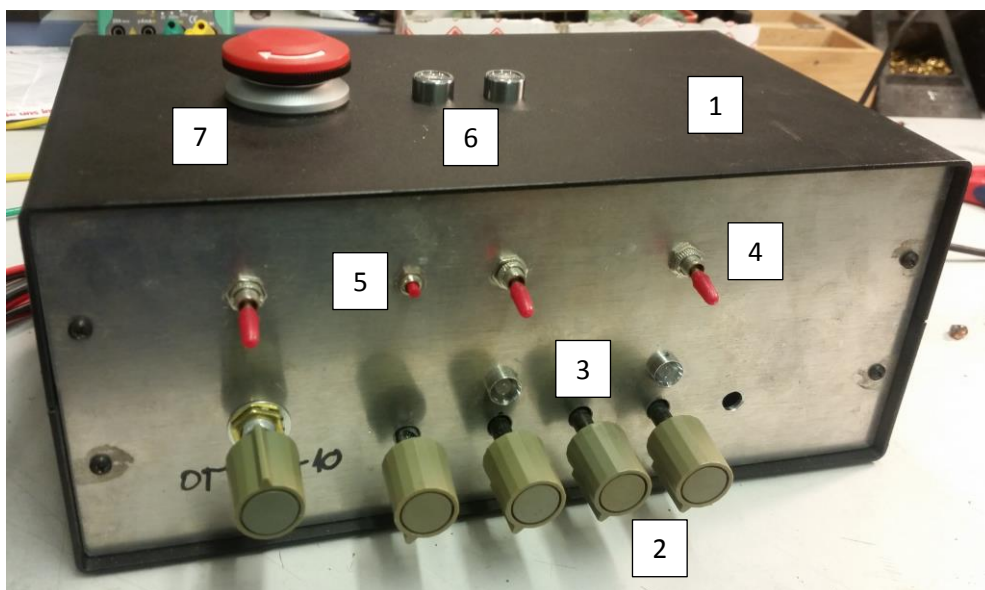


Abbildung 65: Universalsteuergerät, Bau, außen

³¹ <http://www.linear.com/designtools/software/#LTSpice>

³² n = Drehzahl des Motors

Auf Grund der unterschiedlichen Betriebsspannungen der Baugruppen (12V Einspritzdüse ansteuern mit einem 5V Mikrocontroller Signal) sowie dem hohen Störpotenzial der Zündspule musste die Versuchsschaltung in umfangreichen Optimierungsschritten getestet und erweitert werden. Hierzu mussten die Eingangssignale, wie das des Drehzahlsensors oder die des Hall-Sensors, repliziert werden, um sie anschließend von der Versuchsschaltung auswerten und verarbeiten zu lassen. Für diese Zwecke stand ein geeignetes Labor zur Verfügung.

Ein Video während eines laufenden Tests ist im Anhang zu finden! Die Versuchsschaltung wurde nicht EMV geprüft.

9 Prüfstandsversuche

Um die Abgaskonzentrationen der Versuchsaufbauten vergleichen zu können wurden Abgasmessungen auf dem Motorenprüfstand der WHZ Zwickau durchgeführt. Im Folgenden Kapitel wird nun auf die verwendete Messtechnik eingegangen sowie im Anschluss auf die Durchführung der Versuche.

9.1 Prüfstand und Messtechnik

9.1.1 Motorenprüfstand

Die Abbildung zeigt den Motorenprüfstand mit einem Versuchsaufbau der dritten Variante. Es handelt sich dabei um einen reinen Motorenprüfstand, welcher unter anderem mit der folgenden Technik ausgestattet ist: Lastbremse (1) auf luftgefedertem Sockel (2), Abgasabsauganlage (3) und Abgasmesssystem (4).

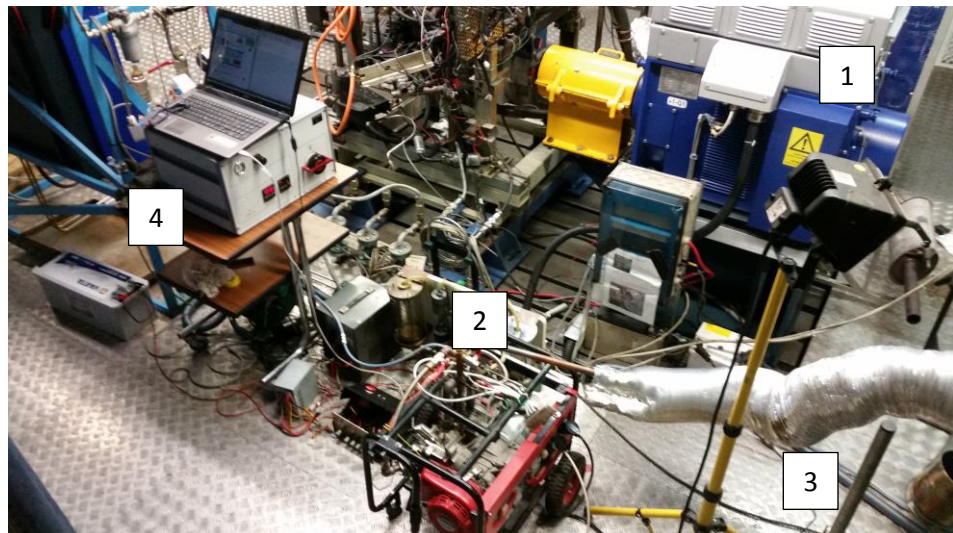


Abbildung 66: Motorenprüfstand mit Versuchsaufbau

Die Abbildung zeigt den Motorenprüfstand mit einem Versuchsaufbau der dritten Variante. Es handelt sich dabei um einen reinen Motorenprüfstand, welcher unter anderem mit der folgenden Technik ausgestattet ist: Lastbremse (1) auf luftgefedertem Sockel (2), Abgasabsauganlage (3) und Abgasmesssystem (4).

9.1.2 Verbrauchsabschätzung

Für die Verbrauchsmessung der getesteten Systeme stand leider keine geeignete Technik mit hoher Genauigkeit zur Verfügung. Dies liegt zum einen an den Systemen selbst, im Vergasertank z.B. ist der Verbrauch nicht oder nur schwer mit einem Durchflusssensor oder ähnlichem messbar, zum anderen auch an der Einfachheit der Baugruppen. Eine Verbrauchsmessung über Durchflusssensoren wäre beim Einspritzsystem zwar prinzipiell möglich, jedoch würde dies den Aufbau des Kraftstoffversorgungssystems deutlich verkomplizieren. Dieser erhöhte Aufwand steht nicht im Verhältnis zur Größe und Leistung des verwendeten Motors. Trotzdem wurden dem Aufbau entsprechend simple Methoden zum Abschätzen des Verbrauches gewählt. So wurde bei den Varianten mit Vergasertank, bzw. normalem Vergaser, zum Beispiel eine fest definierte Menge Kraftstoff (z.B. 200mL Benzin) eingefüllt und das Aggregat so lange betrieben, bis es auf Grund des fehlenden Kraftstoffes wieder von alleine aus ging. So ließ sich der Verbrauch zumindest grob auf eine Stunde Betriebszeit hochrechnen.

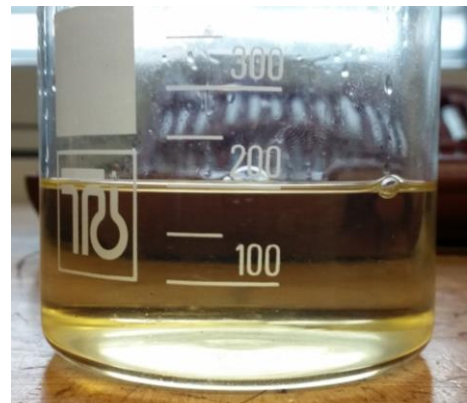


Abbildung 67: 200ml Kraftstoff

Für die Versuche mit Einspritzung hingegen ist das Prinzip des ‚*leer laufen lassens*‘ nicht anwendbar. Dies würde die Lebenszeit der Kraftstoffpumpen gefährden. Deshalb wurde hier eine ausreichende Menge Kraftstoff eingefüllt, der Füllstand am Glas markiert und anschließend das Aggregat eine festgelegte Zeit (z.B. 10 Min.) betrieben. Nach dem Abstellen wurde nun die fehlende Menge Kraftstoff bis zur Markierung nachgefüllt und die eingefüllte Menge notiert. Auch so ließ sich der Verbrauch des Aggregats auf eine Stunde Betriebszeit abschätzen.



Abbildung 68: Horiba Abgasmesssystem

9.1.3 Abgasmesssystem

Für die Messung der Abgaskonzentrationen wurde das Prüfstandsmesssystem der Firma Horiba verwendet. Es handelt sich explizit um das Model MEXA-7100 DEGR, zu welchem jedoch keine weiteren Informationen auf der Internetseite³³ des Herstellers verfügbar sind. Folgende Messwerte werden aufgenommen:

CO (H) CO₂ CO (L) O₂ THC NO_x Lambda

³³ <http://www.horiba.com/de/automotive-test-systems/products/emission-measurement-systems/analytical-systems/standard-emissions/>

9.1.4 Berührungsloses Temperaturmessgerät

Für die Messung diverser Oberflächentemperaturen am Aggregat wurde ein berührungsloses Lasermessgerät der Firma Optris³⁴ verwendet. Es handelte sich dabei um das Model *Optris MiniSight* zu welchem ein Datenblatt im Anhang zu finden ist.

Am Aggregat selbst sowie bei den unterschiedlichen Varianten wurden verschiedene Messstellen gemessen um die Restwärmeemission der verschiedenen Aufbauten miteinander vergleichen zu können. Zu den aussagekräftigsten gehören hier die Temperaturen an folgenden Stellen:

- Vergaser (1)
- Zylinderkopfdeckel (2)
- Zylinder (3)
- Krümmer (4)
- Auspuffaußenseite (5)
- Auspuffende (6)
- Reaktoraußenseite mittig



Abbildung 69: Messpunkte, Collage

³⁴ <http://www.optris.de>

9.1.5 Direkte Temperaturmessung

Für die Temperaturmessungen am Reaktor selbst kam das Handthermometer mit Datenlogger HH520³⁵ der Firma Omega zum Einsatz. Ein vollständiges Datenblatt ist im Anhang zu finden. Das Messgerät ermöglicht die kontinuierliche Abspeicherung von vier getrennten Temperatursensoren, die aufgenommenen Daten können später auf einen PC übertragen und ausgewertet werden. Als Sensoren kamen hochtemperaturstabile Mantel-Thermoelemente³⁶ in den Durchmessern 1,00mm und 3,00mm zum Einsatz, welche mit Messing-Klemmring-Verschraubungen am Reaktor befestigt wurden. Die vier Kanäle wurden wie folgt belegt:

- Kanal 1, 3,00mm: Abgastemperatur vor dem Reaktor (1)
- Kanal 2, 3,00mm: Abgastemperatur nach dem Reaktor (2)
- Kanal 3, 1,00mm: Kraftstoffgastemperatur vor dem Reaktor (3)
- Kanal 4, 1,00mm: Kraftstoffgastemperatur nach dem Reaktor (4)

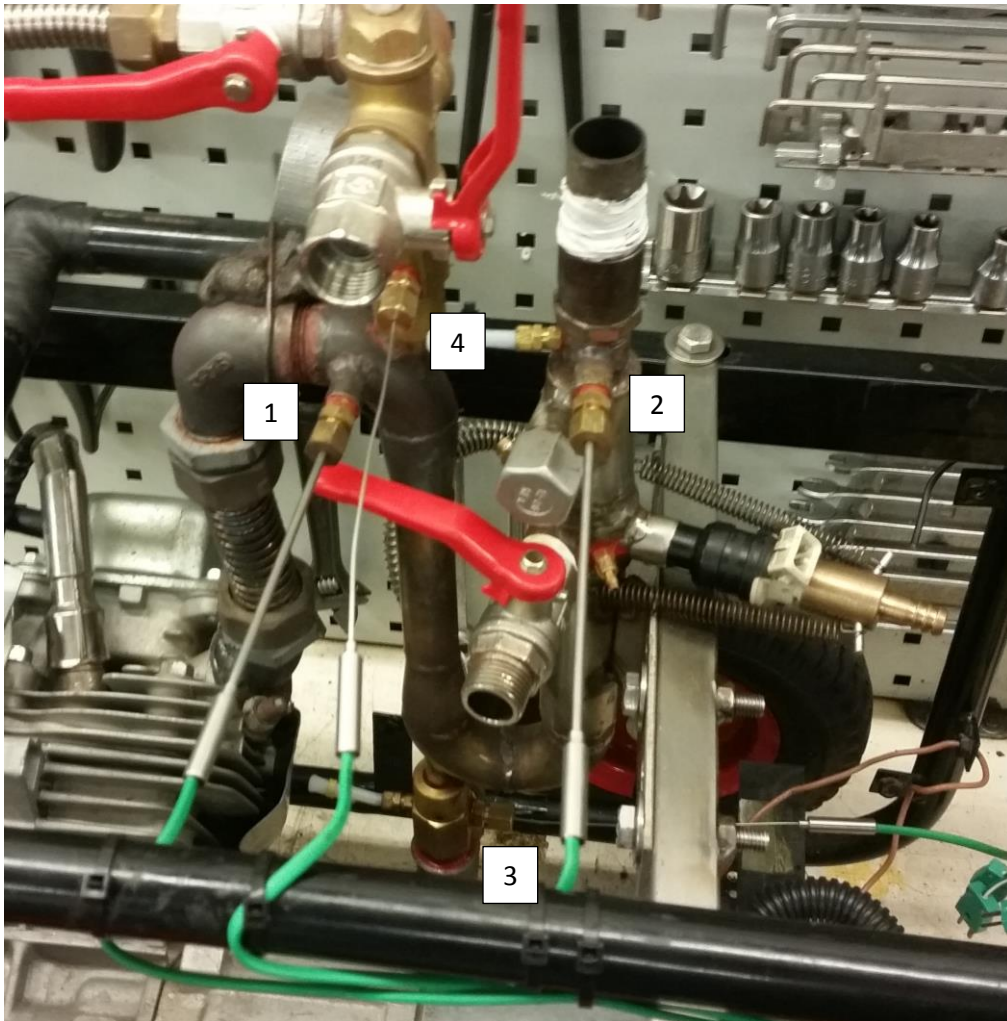


Abbildung 70: Messstellen HH520

³⁵ <https://www.omega.de/pptst/HH520.html>

³⁶ https://www.tcdirect.de/Default.aspx?level=2&department_id=190/1

9.1.6 Druckmessung

Um nicht nur die Temperaturen im Bereich des Reaktors aufzunehmen, sondern auch die an den Messstellen herrschenden Drücke, wurden im Bereich der Temperatursensoren zusätzlich Schlauchtüllen für einen Schlauchdurchmesser von 3,00mm angebracht. Diese wurden im Anschluss mittels hochtemperaturbeständigen Teflonschläuchen (1) mit den Drucksensoren verbunden. Für die Messung dieser Drücke wurden sowohl Differenzdruck- (2) als auch Überdrucksensoren (3) verbaut. Um die Sensoren in der Nähe des eigentlichen Aggregates platzieren zu können, wurden die Sensoren auf einer eigenen Versuchsplatine (4) montiert, welche wiederum mit einem Flachbandkabel (5) mit der eigentlichen Steuerung verbunden wurde.

Die Datenblätter zu den verwendeten Sensoren befinden sich ebenfalls im Anhang.

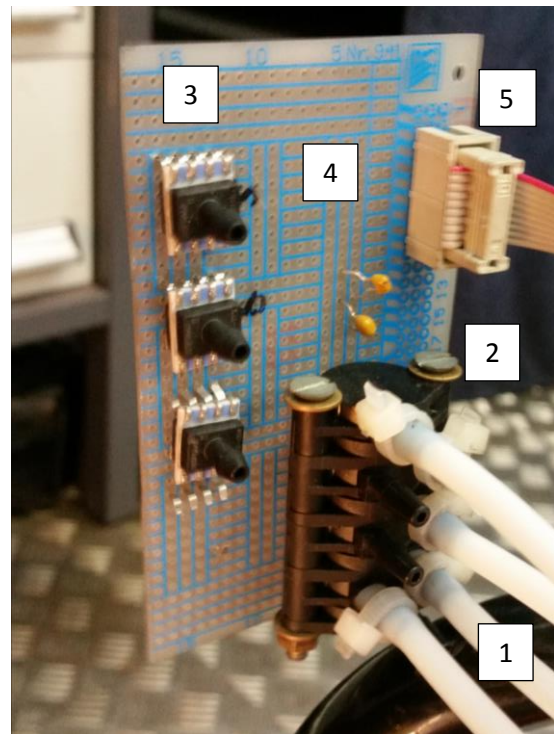


Abbildung 71: Drucksensoren

9.1.7 Digitale Auswertung und Messwertspeicherung

Für die Auswertung der aufgenommenen Daten kommt ein handelsüblicher PC in Form eines Laptops zum Einsatz. Dieser empfängt die seriellen Daten des Arduino Controllers mittels der Freeware Software *CoolTerm*³⁷ und schreibt sie in eine .txt Datei. Die Daten dieser Textdatei können im Anschluss in einer Excel Tabelle eingelesen und ausgewertet werden.

Die Daten des HH520 müssen lediglich mittels des beiliegenden Mini-USB-Kabels und der mitgelieferten Software *SE520* auf den Laptop übertragen werden und stehen nach dem Abspeichern ebenfalls als .txt Datei zur Verfügung.

Da für das Abgasmesssystem keine Datenlog-Funktion zur Verfügung stand, wurden hier die angezeigten Messwerte mittels einer Digitalkamera abfotografiert und im Nachhinein in einer Excel Tabelle digitalisiert. Die vollständigen Tabellen sowie alle fotografierten Messwerte sind im Anhang, sortiert nach dem jeweiligen Versuchstag, zu finden.

Die noch verbleibenden Werte der optischen Temperaturmessung sowie die Laufzeiten und Verbräuche wurden klassisch handschriftlich notiert und später in die Excel Tabellen der Schadstoffmessungen mit eingepflegt.

³⁷ <http://freeware.the-meiers.org>

9.2 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel soll kurz auf die Durchführung der Versuche und den Umfang der einzelnen Versuche eingegangen werden. Da auch die Messsysteme, allen voran das Universalsteuergerät, einer Entwicklung unterlagen, sind nicht alle Messsysteme bei allen Versuchen zum Einsatz gekommen. Einen kompakten Überblick über die verwendeten Methoden bietet die folgende Tabelle:

Tabelle 4: Versuchsdurchführung Überblick

Methode	Vergaser	Ogle Vergaser	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Abgasmessung	x	x	x	x	x	x
Verbrauchsabschätzung	x	x	x	x	x	x
Optische Temperatur Messung <i>MiniSight</i>	x	x	x	x	x	x
Direkte Temperatur Messung <i>HH520</i>	-	-	-	-	x	x
Druckmessung	-	-	-	-	x	x

9.2.1 Originaler Vergaser

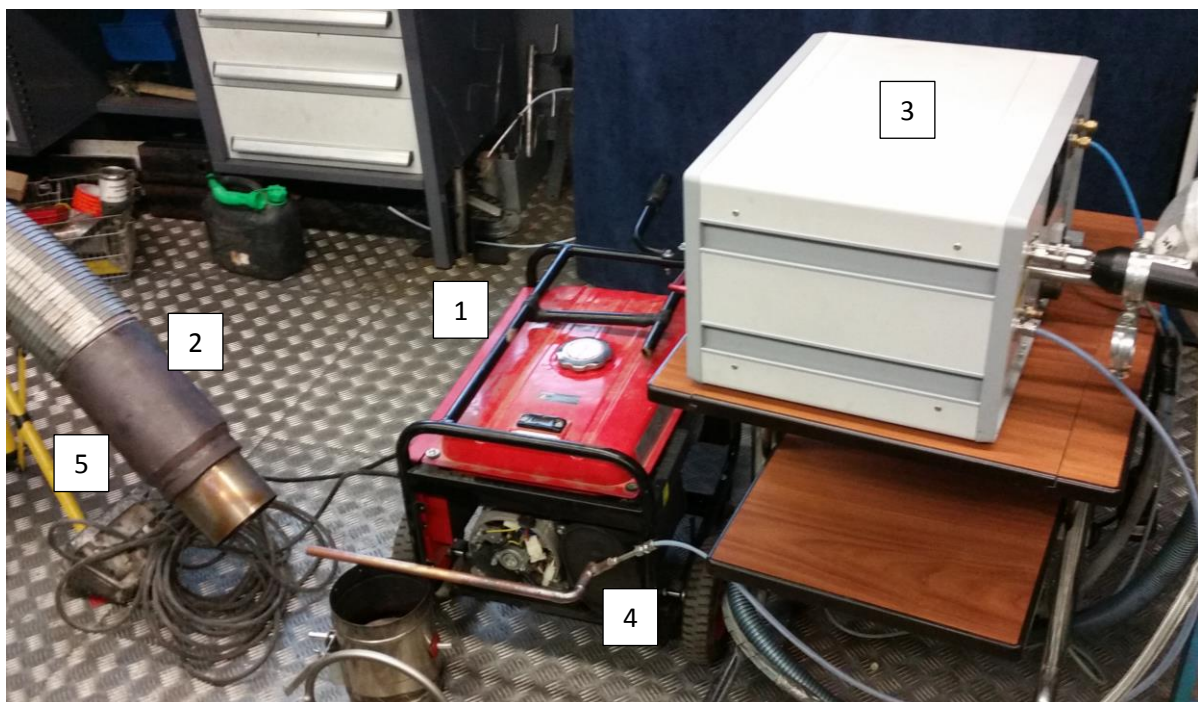


Abbildung 72: Versuchsdurchführung Originalvergaser

Für die Messung des Notstromaggregats im Originalzustand mit Vergaser (1) wurde dieses auf dem Prüfstand aufgebaut und die Abgasabsaugung (2) sowie die Abgasmessanlage (3) mittels passendem Schlauchanschluss (4) angeschlossen. Zur Belastung des Aggregats wurden zwei 500W Scheinwerfer (5) bereitgestellt und einzeln oder zusammen angeschlossen.

9.2.2 Pantone V1

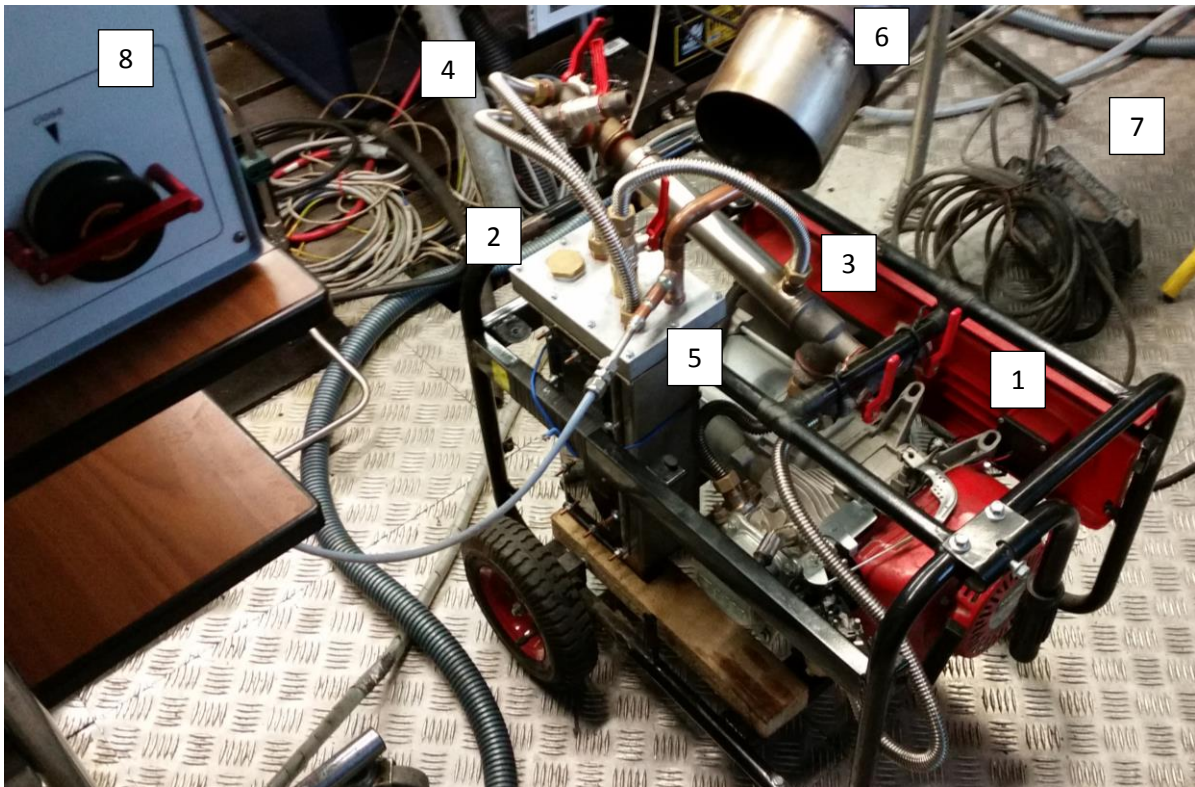


Abbildung 73: Versuchsdurchführung Pantone Variante 1

Für die Messung der ersten Variante des Pantone Reaktors wurde dieser auf dem Prüfstand aufgebaut. Auf dem Bild ist das Notstromaggregat (1) mit verbautem Vergasertank (2) und Pantone Reaktor (3) zu sehen. Bei dieser Variante wird das Abgas zuerst durch den Reaktor und anschließend durch den Vergasertank geleitet. Die Komponenten sind mit Edelstahlwellschläuchen (4) verbunden. Nachdem das Abgas seine Restwärme an den Kraftstoff im Tank abgegeben hat, folgt danach die Messanschlusstelle für die Abgasmessung (5) und letztendlich die Abgasabsaugung (6).

Auch hier kamen die Scheinwerfer (7) zur Belastung des Aggregats und das Abgasmesssystem von Horiba (8) zum Einsatz.

9.2.3 Oglevergaser

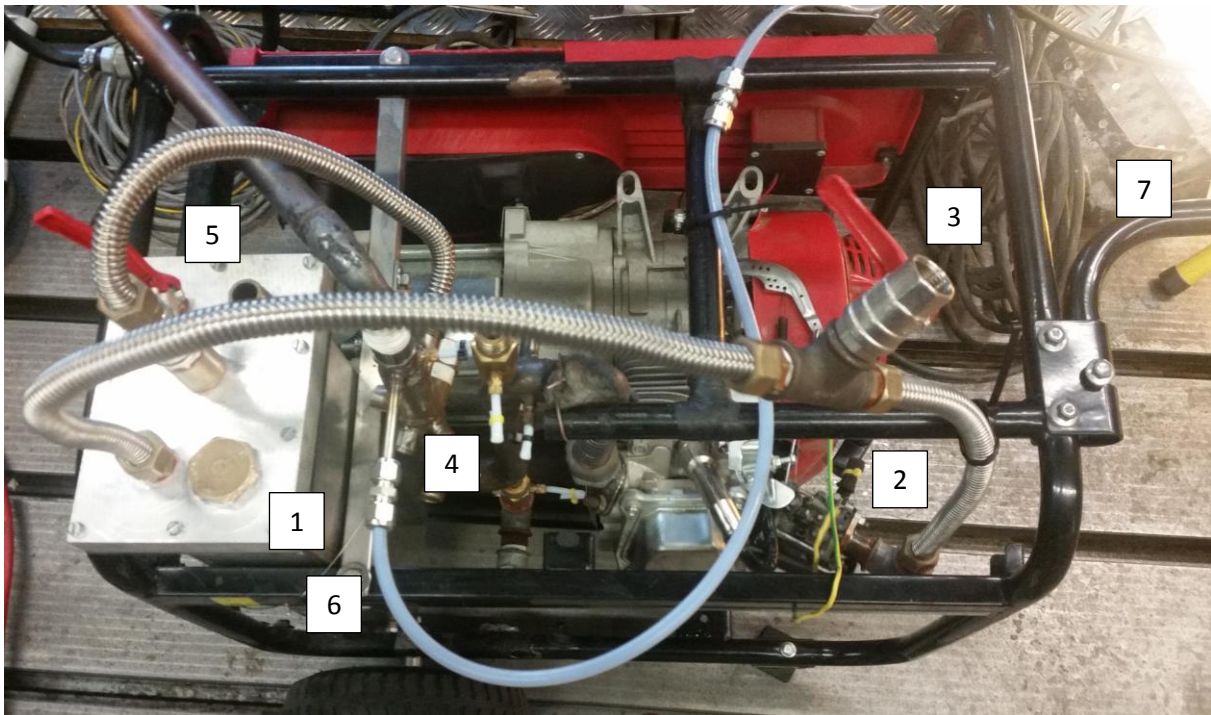


Abbildung 74: Versuchsdurchführung Oglevergaser

Um den Oglevergaser ähnlichen Tank (1) alleinstehend, sprich ohne zwischengeschalteten Reaktor, zu testen wurde dieser direkt an den Einlass des Motors (2) angeschlossen. Zwischen Tank und Einlass ist ein T-Stück mit Kugelhahn (3) montiert. An dieser Stelle kann dem Kraftstoffgas die nötige Frischluft, mittels des Hahns geregelt, zugeführt werden um so ein stöchiometrisches Gemisch zu erzielen. Die Luft, welche durch den Unterdruck des Motors in den Tank gesaugt wird, wird vor dem Zuführen in den Tank durch die Vorheizkammer (4) geleitet und so vorgewärmt. Die vorgewärmte Luft kann nun mittels eines zweiten Kugelhahns (5) gedrosselt werden, um so den Unterdruck im Tank zu erhöhen. Sinkt der Druck im Tank können die Kraftstoffe auf Grund der Dampfkurve besser in die Gasphase wechseln. Durch das Sinken des Druckes im Behälter, sinkt auch die Verdampfungstemperatur der Flüssigkeiten. Die Verdampfungswärme, welche für den Verdampfungsprozess dauerhaft zugeführt werden muss, wird über die vorgewärmte Luft zugeführt. Für die Abgasmessung ist eine angeschweißte Messanschlussstelle (6) vorhanden, an die der Schlauch, welcher die Abgase in das Messsystem leitet, angeschlossen wird. Zusätzlich ist im Bild oben rechts einer der 500W Scheinwerfer (7) zur Belastung des Motors zu sehen.

9.2.4 Pantone V2

Bei der zweiten Variante wird das Benzingas aus dem Kraftstoffvergaser (1) in das innere Rohr des Reaktors (2) geleitet und im Anschluss mittels eines Kugelhahns (3) mit Frischluft vermischt. Das Gasgemisch kann danach über einen zweiten Kugelhahn (4) gedrosselt werden und so die Drehzahl des Motors reguliert werden. Die dem Tank zugeführte Luft wird mittels der Vorheizkammer (5) vorgewärmt, auch hier kann über einen weiteren Kugelhahn (6) am Tank der Druck im inneren des Tanks während des Betriebs eingestellt werden.

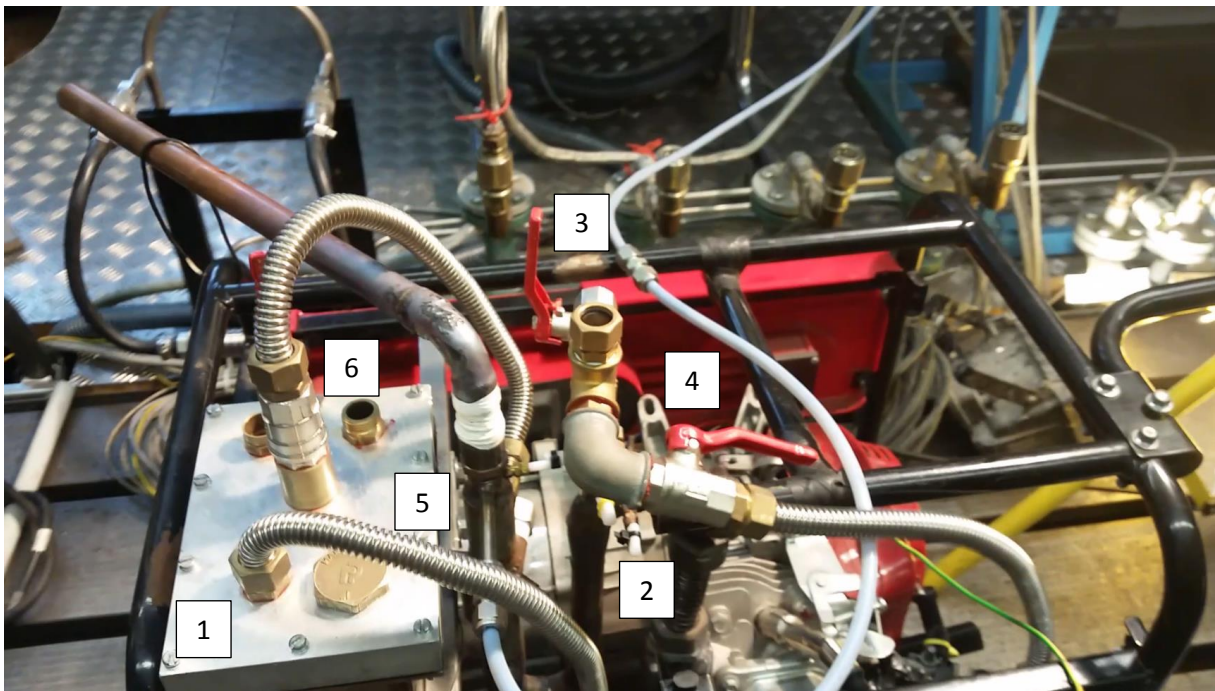


Abbildung 75: Versuchsdurchführung Pantone Variante 2

9.2.5 Pantone V3

Da in der dritten Variante des Pantone Reaktors Einspritzdüsen mit dem Kraftstoffversorgungssystem und die Universalsteuerung zum Einsatz kamen, stieg hier der Versuchsaufwand deutlich. Die Einspritzdüsen wurden direkt in die Vorheizkammer eingebaut, was diese zur Einspritzkammer macht. Die Frischluft welche in die Kammer gezogen werden kann, kann mittels eines Kugelhahns reguliert werden. Auch hier dient dies der Drucksenkung in der Einspritzkammer, was eine bessere Kraftstoffvergasung bei niedrigen Temperaturen zur Folge hat. Die Kraftstoffe werden nun in die Kammer eingespritzt und dort vergast. Das Kraftstoffgas wird anschließend in den Reaktor geleitet. Die Gemischeinstellung und Drosselung ist gleich der der Variante 2. Zur Versorgung der Einspritzdüsen mit Kraftstoff kommt das Kraftstoffversorgungssystem zum Einsatz. Des Weiteren wurden in diesem Versuch die Temperaturen und Drücke mittels der Elektronik aufgenommen.

Die folgende Abbildung und die Tabelle sollen einen möglichst unkomplizierten und schnellen Überblick über diesen Versuchsaufbau geben:

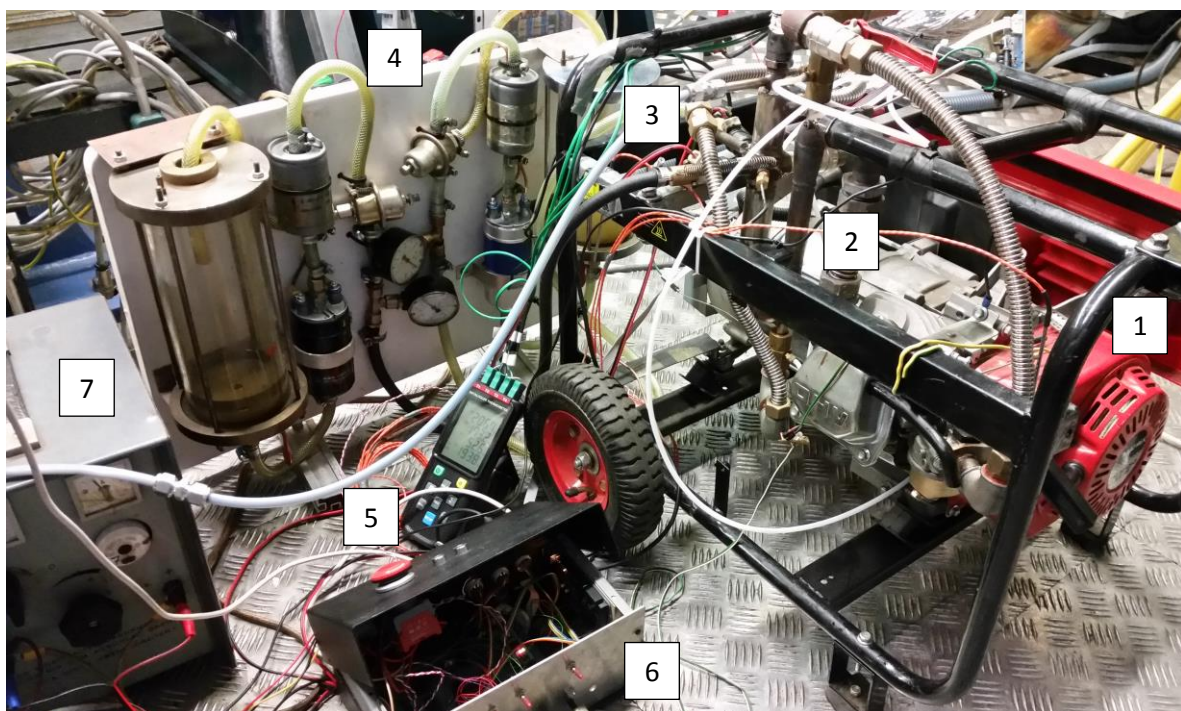


Abbildung 76: Versuchsdurchführung Pantone V3

Tabelle 5: Versuchsdurchführung Pantone V3

1	Notstromaggregat	5	HH520
2	Reaktor	6	Universalsteuergerät
3	Einspritzdüsen in der Einspritzkammer	7	Spannungsversorgung
4	Kraftstoffversorgungssystem		

9.2.6 Pantone V4

Wie auf der Abbildung unten zu erkennen ist, liegt der Versuchsaufwand für die vierte Variante etwa zwischen dem der Zweiten und Dritten. Einen schnellen Überblick sollen erneut die Abbildung und die darunter liegende Tabelle geben:

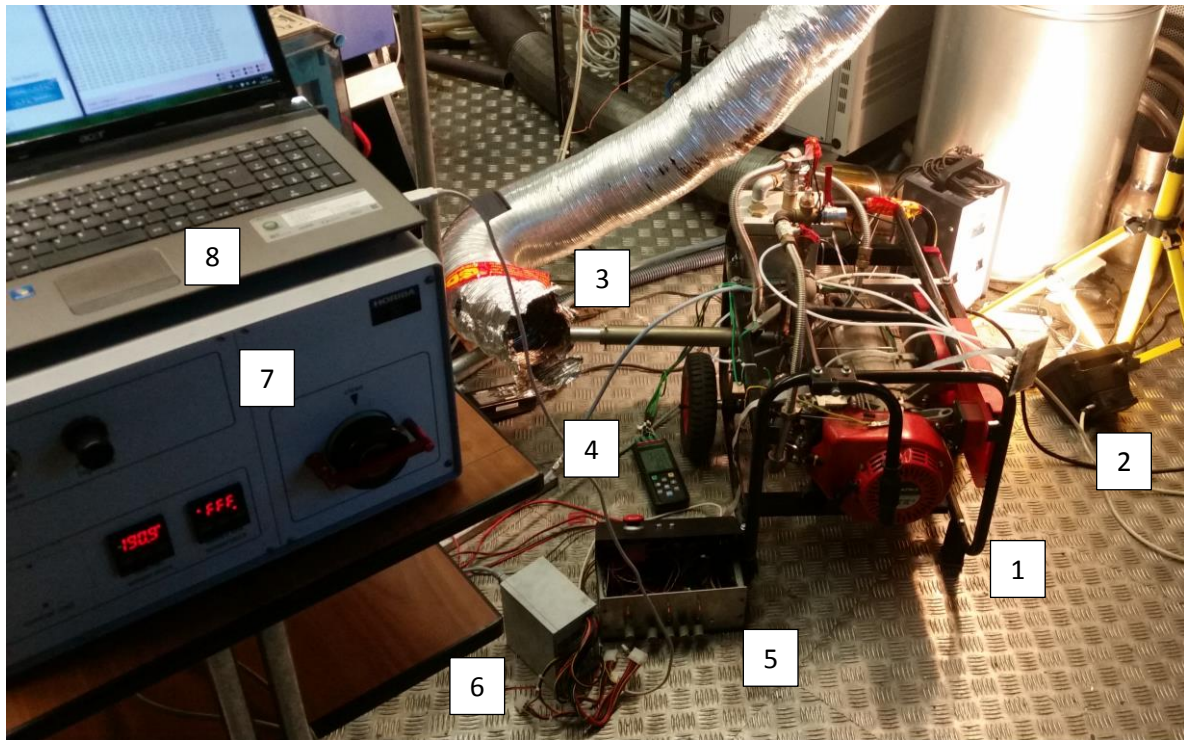


Abbildung 77: Versuchsdurchführung Pantone V4

Tabelle 6: Versuchsdurchführung Pantone V4

1	Notstromaggregat, Umbau V4	5	Universalsteuergerät
2	500W Scheinwerfer	6	PC-Netzteil
3	Abgasabsaugung	7	Abgasmesssystem
4	HH520	8	Laptop

10 Messergebnisse

Im Folgenden sollen die Messergebnisse der Versuche beispielhaft dargestellt und zusammengefasst werden. Dabei wurden die ermittelten Werte mittels Excel-Tabellen festgehalten und ausgewertet. Eine vollständige Sammlung der ermittelten Einzelwerte und Tabellen für die unterschiedlichen Messsysteme und Versuche ist im Anhang zu finden.

10.1 Temperaturen

Da bei der Aufnahme der Temperaturen zwei unterschiedliche Systeme eingesetzt wurden, mussten auch zwei verschiedene Methoden zum Auswerten der Daten angewandt werden.

Die durch das Handthermometer *HH520* aufgenommenen Temperaturen wurden in getrennte Excel Tabellen eingelesen und anschließend mittels Diagrammen visualisiert. Ein Beispiel für ein solches Diagramm ist unten stehend abgebildet, es handelt sich dabei um Daten aus der Messung vom 11.12.2018 eines Pantone V3 Aufbaus (500W, Kraftstoff Ethanol) zwischen 13:47 Uhr und 14:01 Uhr:

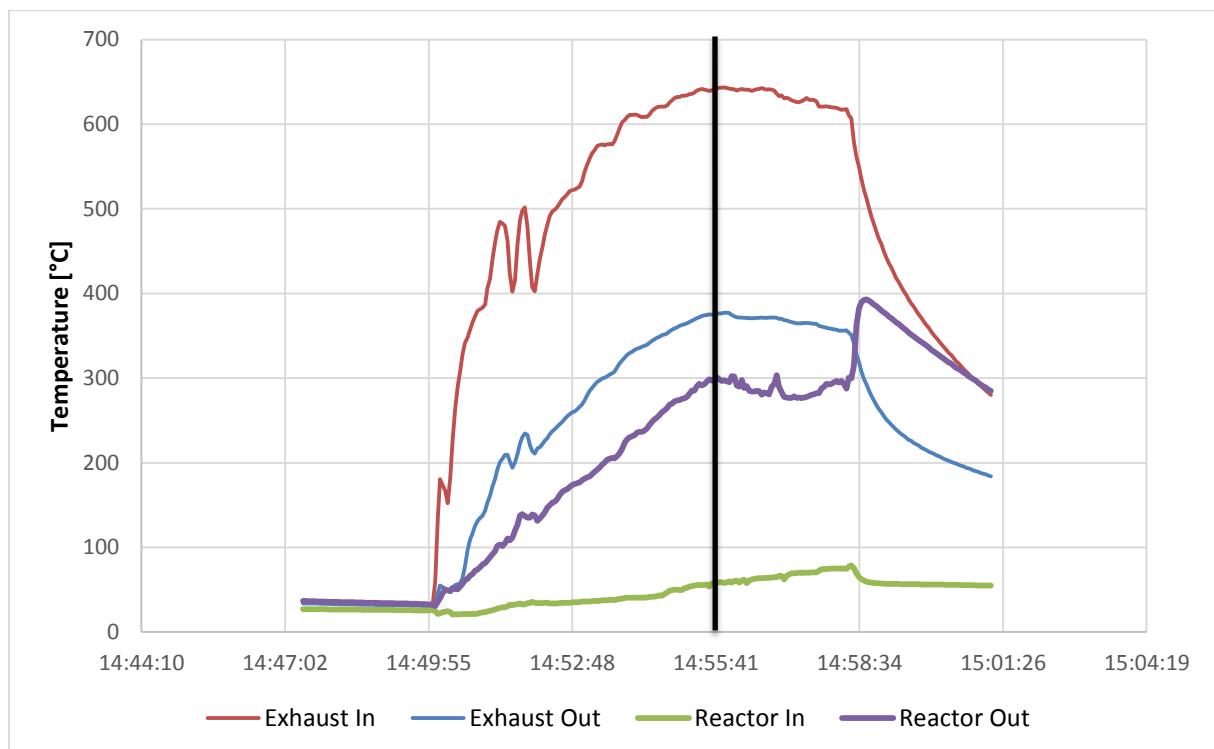


Abbildung 78: Temperaturswertung HH520³⁸

³⁸ Aus ‚20180112_Temperaturen.xlsx‘ zu finden in den Anhängen unter /_Messergebnisse/_HH520 Temperaturen/...

In diesen Temperaturverläufen über die Dauer der Versuchsdurchführung wurden anschließend Punkte gesucht, an dem das System seine Betriebstemperatur erreicht hatte und es so zu einem quasi statischen Temperaturverhalten kam. Dieser Messpunkt wurde mittels einer senkrechten Linie markiert und die vier zugehörigen Zahlenwerte getrennt vermerkt. So war es möglich die ungefähren Betriebstemperaturen der einzelnen Systeme und Versuche quantitativ miteinander zu vergleichen. Da keine Möglichkeit bestand den Kennwert λ über die Versuchsdauer kontinuierlich mitzuschreiben, ist es leider auch nicht möglich gewesen die zu erwartenden Temperaturänderungen durch die Änderung von λ in ähnlichen Diagrammen darzustellen.

Da das optische Messsystem *Optris MiniSight* nicht über eine Datenlog-Funktion verfügt, mussten die einzelnen Messwerte hier klassisch handschriftlich notiert werden. Im Anschluss wurden diese dann in die Tabellen der einzelnen Versuche mit eingepflegt. Um die Temperaturen aller Versuche miteinander vergleichen zu können, wurde zusätzlich eine Tabelle erstellt, in der die Temperaturen eingetragen und ihrer Höhe entsprechend farbig markiert wurden (grün = niedrige Temperatur, rot = hohe Temperatur):

Tabelle 7: Messergebnisse, Temperaturen, Gesamtübersicht

		Exhaust In	Exhaust Out	Reactor In	Reactor Out	Krümmer	OHV	Vergaser	Reaktor	Auspuff Außen	Auspuff Innen	Zylinder	Vergasertank	Einlassrohr
Vergaser Original Benzin	0W					460	80	50		130	290	70	-	
	500W					450	50	42		151	294	93		
						460	65	45		150	300	85		
	1000W					455	52	55		155	303	75		
						463	50	55		138	305	84		
Ogle Vergaser Benzin	0W					311	37	27	249	32	55	55	27	
	500W					409	42	30	218	44	93	72	31	
						365	40	34	252	43	70	68	29	
	1000W					359	39	29	184	48	70	70	29	
					300	41	32	215	40	74	70	26		
Pantone V2 Benzin	0W					330	36	34	210	30	38	66	23	45
						376	42	34	240	40	60	80	31	45
	500W					336	38	38	234	31	53	75	30	42
						366	39	33	206	39	71	61	30	42
						372	40	37	207	34	55	81	27	56
	1000W	mit Kern				390	41	34	221	32	73	70	23	47
	ohne Kern				408	38	38	275	27	38	80	26	54	
Pantone V2 Benzin und Wasser	1000W	ohne Kern				372	38	33	210	40	67	74	28	
Pantone V3 Benzin	0W	539,5	286,5	47,4	245,8	301	31	27	189	24	45	60		
	500W	449,4	228,2	44,6	185,4	257	35	32	152	24	37	61		
	1000W	659,6	394,3	62,8	276,4	402	36	40	225	28	56	68		
Pantone V3 Benzin und Wasser	0W	637,1	346,2	50,6	195,3	300	28	25	167	25	30	47		
						375	36	40	207	26	52	59		
	500W	648,2	376,7	54	268,7	366	38	40	236	29	55	68		
	1000W	664,6	410,3	59,1	299,7	394	37	38	235	24	29	70		
Pantone V3 Ethanol	0W	537	271,9	56	240,4	324	40	35	185	26	45	63		
	500W	641,2	375,2	58,3	298,2	383	36	37	225	36	65	65		
	1000W	540	306,6	45,4	240,4									
Pantone V3 Ethanol und Wasser	0W	507,7	246,4	52,7	181,2	306	33	32	176	25	36	60		
	500W	502,8	226,6	43,6	159,8	317	33	34	201	23	37	65		
	1000W	462,6	199,4	39,6	150,1									
Pantone V4 Benzin	0W	358,2	211,9	33,3	140,5	315	36	41	215	37	75	71		
	500W	399,7	241	34,2	159,5	324	35	30	226	28	67	60		
	1000W	421	254,8	35,9	162,3	370	39	32	247	30	81	69		
Pantone V4 Ethanol	0W	351,8	213,4	34,8	148,6	338	35	33	228	30	58	60		

Im Vergleich der unterschiedlichen Systeme und Versuche ließ sich schnell erkennen, dass besonders bei der originalen Vergaser Variante hohe Temperaturen an den optischen Messpunkten auftreten. Dies hat in Folge dessen auch eine hohe Wärmeabstrahlung in diesen Bereichen zu bedeuten und zeigt einen hohen Anteil von ungenutzter Restwärme an. Im Bereich des Zylinders wurden beispielsweise im Vergaserbetrieb bei 1000W Last zwischen 75°C und 85°C Oberflächentemperatur gemessen, für alle anderen Gemischbildungssysteme traten in diesem Bereich lediglich Temperaturen von 60°C bis 70°C auf. Diese reduzierte Oberflächentemperatur zeigte sich, wie zu erkennen ist, bei nahezu allen gemessenen Oberflächen am Aggregat.

Zur besseren Verdeutlichung wurden die gemessenen Temperaturen beispielhaft für den Versuch *Pantone V3 500W* in das zugehörige Schema des Systems eingetragen. Dabei wurden Gastemperaturen farbig und Oberflächentemperaturen schwarz dargestellt:

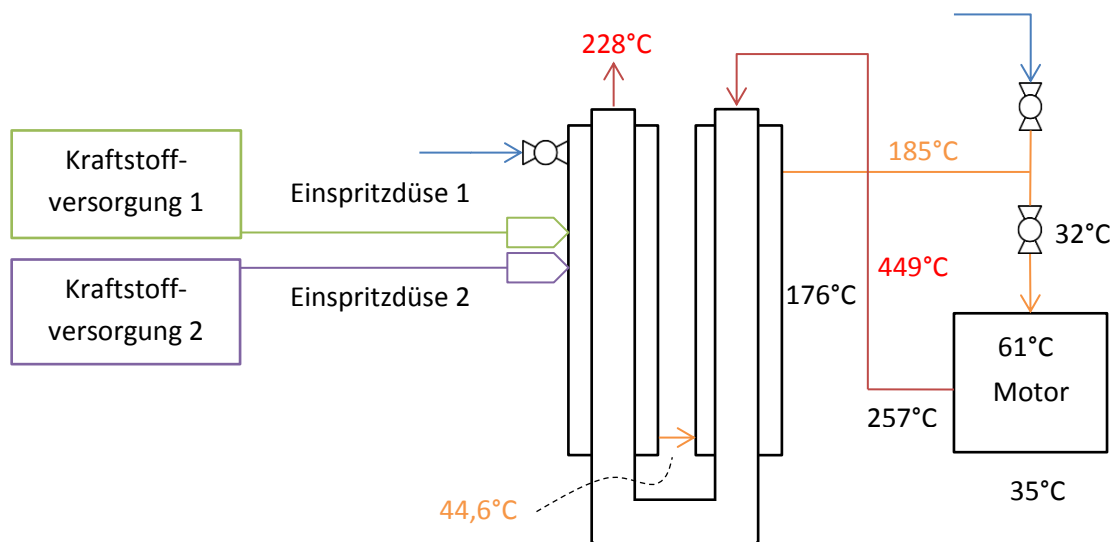


Abbildung 79: Pantone V3, schematisch

10.2 Abgaskonzentrationen

Für die Auswertung und den Vergleich der Abgaskonzentrationen wurden die Ergebnisse der einzelnen Versuche mittels Excel-Tabellen dokumentiert. In diesen wurden die Ergebnisse zuerst nach Versuchsreihenfolge und anschließend nach den gemessenen Lambdawerten sortiert, beispielhaft dargestellt in der folgenden Tabelle:

Tabelle 8: Abgaskonzentrationen, Einzelmessungen Pantone V2

Pantone V2		28.07.2017	15:17:22 - 15:26:40						
Versuch Nr	CO (H)	CO ₂	CO (L)	O ₂	THC	NO _x	λ	λ Bretts.	
12	5,6	10,8		0,79	3253	135	0,83	0,78	
13	5,51	10,88		0,75	3205	135	0,84	0,78	
14	4,99	11,27		0,71	2990	149	0,85	0,80	
15	4,67	11,47		0,71	2965	158	0,86	0,81	
1	3,52	11,99		0,71	2361	173	0,89	0,85	
2	3,41	12,05		0,72	2347	180	0,90	0,86	
3	2,52	12,62		0,72	2178	221	0,92	0,88	
4	2,15	12,85		0,7	2124	251	0,93	0,89	
5	1,96	12,99		0,69	1994	263	0,94	0,90	
6	1,6	13,23		0,68	1682	304	0,94	0,92	
16	1,38	13,59		0,62	1786	317	0,96	0,92	
7	1,43	13,34		0,66	1764	304	0,95	0,92	
8	1,2	13,46		0,67	1553	311	0,96	0,94	
17	0,88	13,88		0,65	1630	356	0,97	0,94	
9	0,96	13,63		0,69	1238	330	0,97	0,96	
18	0,81	13,93		0,67	1295	372	0,98	0,96	
19	0,76	13,99		0,65	1285	368	0,98	0,96	
10	0,63	13,78		0,75	1111	349	0,98	0,97	
11	0,54	13,81		0,75	780	350	0,99	0,99	
20	0,48	14,11		0,71	777	408	0,99	0,99	
21	0,47	14,12		0,73	785	411	0,99	0,99	
22	0,32	14,13		0,79	704	406	0,99	1,00	
23	0,41	14,16		0,78	500	400	1,00	1,00	
24	0,25	14,1	2379	0,94	383	414	1,00	1,02	
25	0,2	14,03	1917	1,09	396	424	1,00	1,03	
32	0,15	14,13	1490	1,26	336	462	1,01	1,04	
31	0,15	14,01	1557	1,3	377	429	1,01	1,04	
26	0,15	13,81	1551	1,44	361	383	1,01	1,05	
27	0,16	13,88	1494	1,43	336	385	1,01	1,05	
33	0,13	14,02	1297	1,44	323	442	1,01	1,05	
34	0,12	13,9	1151	1,68	359	436	1,01	1,06	
35	0,11	13,55	1051	2,35	381	374	1,01	1,10	
28	0,12	12,99	1157	2,85	471	274	1,01	1,12	
36	0,11	13,08	1110	3,08	550	301	1,01	1,13	
29	0,12	12,79	1164	2,99	494	262	1,01	1,13	
30	0,12	12,81	1179	3,04	498	265	1,01	1,13	

Wie zu erkennen ist, wurden die jeweiligen Spalten farblich hinterlegt. Dabei zeigt erneut eine grüne Hintergrundfarbe kleine Werte und eine rote große Werte an. Nur für die Spalten der CO₂- und O₂-Konzentrationen wurden hohe Werte mit Grün und niedrige mit Rot hinterlegt. Dies wurde so gewählt, da ein niedrigerer CO-Ausstoß auf Grund der Verbrennungsreaktionen einen höheren CO₂-Ausstoß zur Folge hat, wie bereits im Kapitel 2.2.4 *Verbrennung und Flammenfront* erläutert wurde. Ein hoher O₂-Ausstoß ist darüber hinaus als nicht bedenkenswert einzuschätzen.

Für die Lambdawerte wurde eine ähnliche Methode zur Darstellung der Farben gewählt, hier sind Werte mit 1,00 Grün hinterlegt, davon positiv oder negativ abweichende Werte kontinuierlich rötlicher. Allgemein lassen sich so optimale Betriebspunkte anhand der Farben schnell identifizieren.

Zur weiteren Beurteilung der Ergebnisse wurden die Abgaskonzentrationen über λ in Diagrammen dargestellt, so ist es zum Beispiel möglich die Abgaskonzentrationen der Pantone V2 Variante mit der Originalvergaser Variante optisch zu vergleichen:

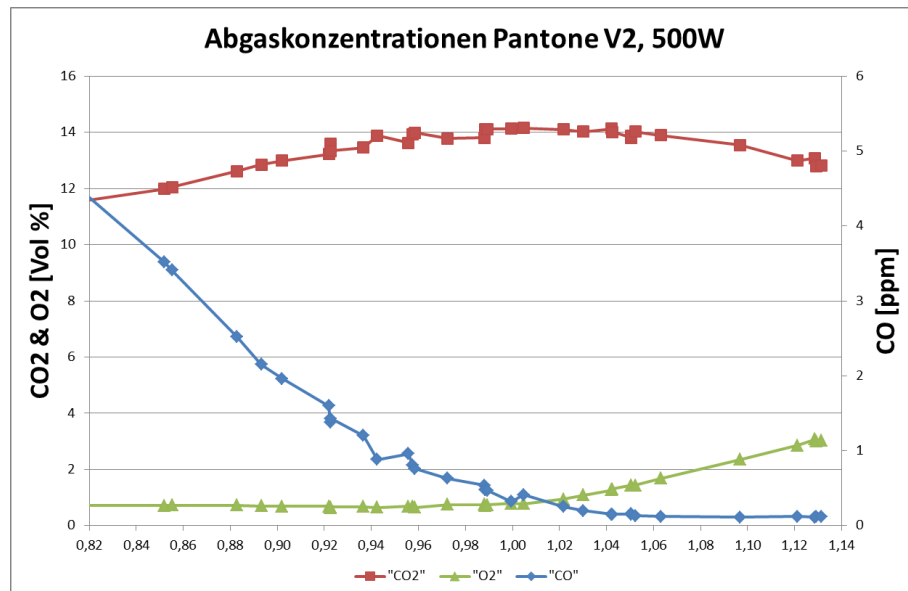


Abbildung 80: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Pantone V2 500W, I

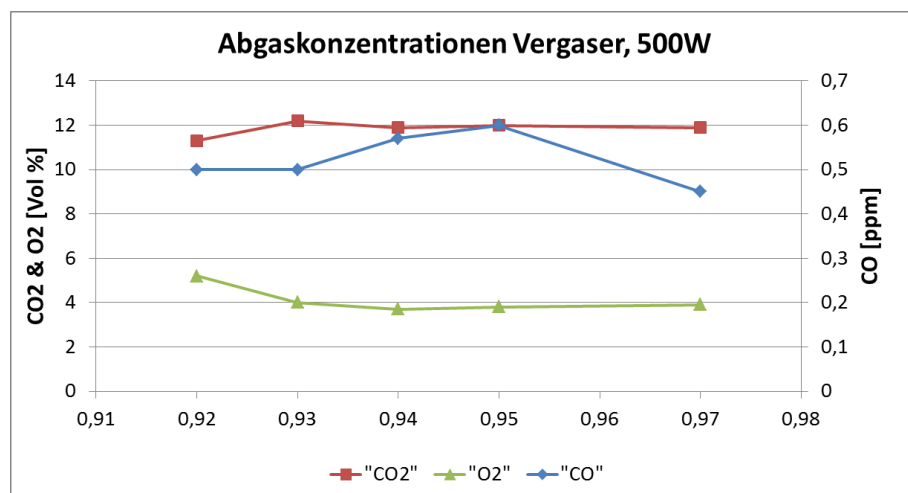


Abbildung 81: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Vergaser 500W, I

Im so dargestellten Vergleich lassen sich die unterschiedlichen Abgascharakteristika der beiden Systeme leicht erkennen. Wie zu sehen ist, zeigt das Pantone V2 System (sowie auch die anderen alternativen Gemischaufbereitungssysteme) gut die typischen λ -abhängigen Kurvenverläufe, wie sie bereits im Kapitel 2.2.1 *Stöchiometrie oder Verbrennungsluftverhältnis* gezeigt wurden. Das originale Vergaser Setup weist jedoch im Gegensatz dazu eher geradlinige Kurvenverläufe mit durchgehend erhöhten Abgaswerten auf. Dies ist auf die deutlich schlechtere Gemischaufbereitung zurückzuführen.

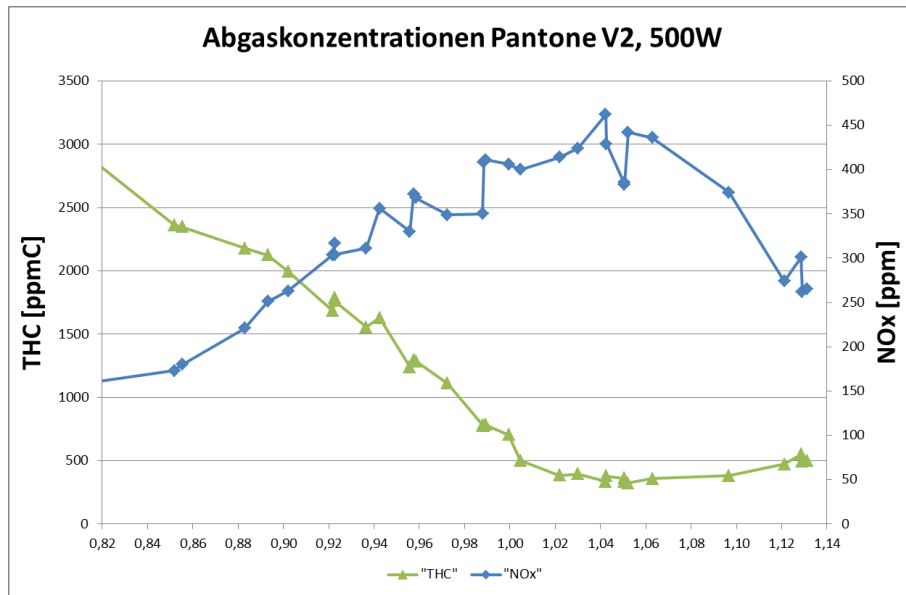


Abbildung 82: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Pantone V2 500W, II

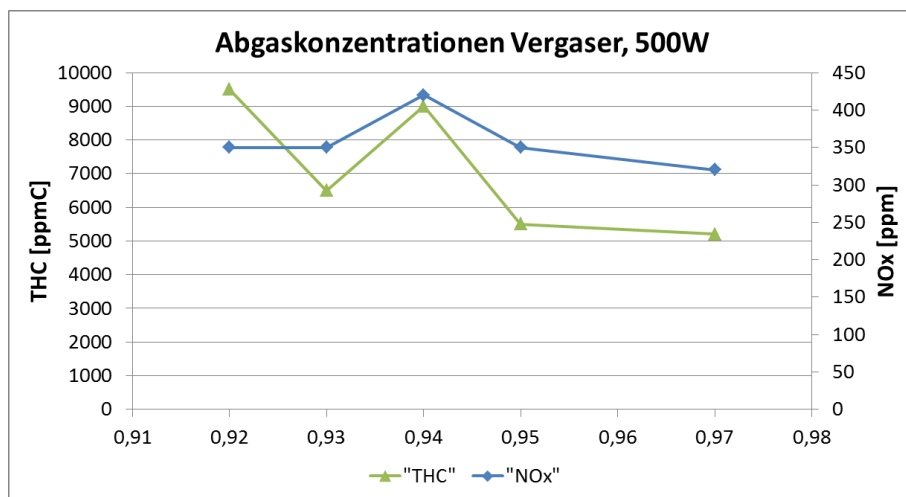


Abbildung 83: Abbildung 84: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Vergaser 500W, II

Zum übersichtlichen Vergleich aller untersuchten Systeme wurde eine Tabelle erstellt, in welcher typische Abgaskonzentrationen eingetragen wurden. Auch hier wurden die Spalten wie zuvor nach der Höhe der Messwerte farbig hinterlegt. In der Tabelle lassen sich die zum Teil deutlich verbesserten Abgaskonzentrationen erkennen. Um die untersuchten Systeme mit den in Großserie eingesetzten Systemen beispielhaft zu vergleichen, wurden die Abgaskonzentrationen eines 4-Zylinder Ottomotors mit Saugrohreinspritzung hinzugefügt. Es handelt sich dabei um einen 1.4l Volkswagen Motor mit 55kW Nennleistung und Saugrohreinspritzung. Dieser Vergleichsmotor wurde an einem stationären Betriebspunkt mit 10,51kW Abgabeleistung betrieben, der so gewählt wurde, dass der 4-Zylinder Motor eine ähnlich starke Belastung erfährt wie das Notstromaggregat bei 500W angeschlossener Ausgangslast. Die Abgasmessanlage wurde vor dem vorhandenen Katalysator angeschlossen.

Tabelle 9: Messergebnisse, Abgaskonzentrationen, Gesamtübersicht

			CO (H)	CO2	CO (L)	O2	THC	NOx	Lambda	λ Bretts.	
Original Vergaser	500W		0,45	11,9	Max	3,9	5200	320	0,97	0,96	
	1000W		0,55	12,4	Max	3,1	4000	650	0,98	0,97	
4-Zyl. Motor, 55kW	10,51kW		0,56	14,26	Max	0,78	2567	3204	0,93	0,93	
Ogle Vergaser Benzin	0W		0,15	12,06	1396	4,82	582	99,1	1,00	1,23	
			0,08	11,33	860	5,22	202	101,8	1,01	1,30	
	500W		0,19	13,02	1817	3,67	324	188	1,00	1,17	
			0,15	11,41	1686	4,23	456	132,8	1,00	1,22	
	1000W		0,14	12,28	1374	4,07	367	244,9	1,01	1,20	
			0,11	11,93	1103	3,99	733	416,3	1,00	1,18	
			0,15	12,26	1426	3,47	677	371,5	1,00	1,15	
Pantone V2 Benzin	0W		0,16	12,9	1300	2,8	530	130	1,00	1,11	
			0,12	12,9	1140	2,9	420	370	1,01	1,13	
	500W		0,12	13,19	1185	2,98	396	359	1,00	1,13	
			0,12	11,92	1090	3,8	314	168	1,01	1,19	
			0,11	12,79	1051	3,08	323	274	1,01	1,14	
			0,13	12,82	1249	2,77	692	483	1,00	1,11	
	1000W	mit Kern		0,12	11,89	1140	4,14	650	382	1,00	1,19
		ohne Kern		0,14	12,45	1322	3,31	995	497	1,00	1,12
Pantone V2 Benzin und Wasser ohne Kern	1000W		0,14	12,2	1349	3,52	866	381	1,00		
			0,13	11,8	1260	4,13	840	393	1,00		
			0,14	12,16	1305	3,76	812	401	1,00		
Pantone V3 Benzin	0W		0,12	12,76	1303	3,29	248	148	1,01	1,16	
	500W		0,13	12,11	1286	4,24	549	271	1,00	1,20	
	1000W		0,17	13,96	1514	1,62	877	838	1,00	1,04	
Pantone V3 Benzin und Wasser	0W		0,15	12,94	1502	3,38	316	112	1,00		
			0,25	13,28	Max	2,26	1327		0,99		
	500W		0,16	12,22	1413	3,96	563		1,00		
	1000W		0,16	12,93	1438	2,87	694		1,00		
Pantone V3 Ethanol	0W		0,21	13,97	1770	1,38	1046	99	1,00	1,02	
	500W		0,2	14,11	1781	1,05	551	147	1,00	1,02	
	1000W		0,16	12,2	1438	4,02	654	201	1,00	1,18	
Pantone V3 Ethanol und Wasser	0W		0,14	12,41	1227	3,34	262	49	1,01		
	500W		0,14	11,94	1268	4,28	443	75	1,01		
	1000W		0,12	10,85	1044	5,48	1206	155	0,99		
Pantone V4 Benzin	0W		0,14	12,76	1366	3,33	311	136	1,01	1,16	
	500W		0,14	12,08	1375	3,56	865	245	1,00	1,15	
	1000W		0,16	12,63	1554	2,8	734	362	1,00	1,11	
Pantone V4 Ethanol	0W		0,12	11,26	1224	5,15	210	47	1,01		

Um die Verbesserungen der einzelnen Systeme gegenüber dem Ausgangszustand noch besser beurteilen zu können, wurden die einzelnen prozentualen Änderungen in der Schadstoffkonzentration ausgerechnet und ebenfalls in einer Tabelle dargestellt. Wie in dieser zu erkennen ist, wurden auch hier die Ergebnisse den Spalten entsprechend farbig hinterlegt. So lassen sich die einzelnen Systeme schnell und übersichtlich nach der Verbesserung ihrer jeweiligen

Schadstoffkonzentrationen vergleichen. Es zeigte sich, dass vor allem die Konzentrationen an CO (H), CO (L) und THC durch die untersuchten Gemischaufbereitungssysteme gesenkt werden konnten. Für die Werte der THC Konzentrationen konnten prozentuale Abweichungen zwischen -69,85% bis -93,96% nachgewiesen werden. Diese Werte sind folglich ein Beweis dafür, dass deutlich weniger flüssige Kraftstofftröpfchen während der Verbrennung im Gemisch enthalten waren, es konnte ein deutlich höherer Kraftstoffanteil vollständig verbrannt werden. Die durchweg gesunkenen Konzentrationen an CO zeigen, dass für eine saubere Verbrennung ausreichend Sauerstoff zur Verfügung stand. Dies wird weiter durch die dabei oft gestiegenen Anteile an O₂ im Abgas bestätigt. Da ausreichend Sauerstoff zur Bindung mit Kohlenstoff zur Verfügung stand, zeigte sich auch häufig ein gesteigener CO₂ Anteil im Abgas. Eine deutliche Ausnahme stellt hier der Pantone V2 im Benzinbetrieb dar, welcher sowohl die CO als auch die CO₂ Konzentrationen um mehr als die Hälfte reduzieren konnte.

Tabelle 10: Abgaskonzentrationen, prozentuale Abweichung

	CO (H)		CO ₂		CO (L)	
	500W	1000W	500W	1000W	500W	1000W
Vergaser	0,45	0,55	11,9	12,4	2500	2500
Ogle Vergaser	0,11	0,11	11,41	10,85	1051	1044
	-75,56%	-80,00%	-4,12%	-12,50%	-57,96%	-58,24%
Pantone V2 Benzin	0,11	0,12	11,92	1,89	1051	1140
	-75,56%	-78,18%	0,17%	-84,76%	-57,96%	-54,40%
Pantone V2 Benzin und Wasser		0,13		11,8		1260
		-76,36%		-4,84%		-49,60%
Pantone V3 Benzin	0,13	0,17	12,11	13,96	1286	1514
	-71,11%	-69,09%	1,76%	12,58%	-48,56%	-39,44%
Pantone V3 Benzin und Wasser	0,16	0,16	12,22	12,93	1413	1438
	-64,44%	-70,91%	2,69%	4,27%	-43,48%	-42,48%
Pantone V3 Ethanol	0,2	0,16	14,11	12,2	1718	1438
	-55,56%	-70,91%	18,57%	-1,61%	-31,28%	-42,48%
Pantone V3 Ethanol und Wasser	0,14	0,12	11,94	10,85	1268	1044
	-68,89%	-78,18%	0,34%	-12,50%	-49,28%	-58,24%
Pantone V4 Benzin	0,14	0,16	12,08	12,63	1375	1554
	-68,89%	-70,91%	1,51%	1,85%	-45,00%	-37,84%
	O ₂		THC		NO _x	
	500W	1000W	500W	1000W	500W	1000W
Vergaser	3,9	3,1	5200	4000	320	650
Ogle Vergaser	4,28	5,48	314	733	75	155
	9,74%	76,77%	-93,96%	-81,68%	-76,56%	-76,15%
Pantone V2 Benzin	3,08	4,14	314	650	168	382
	-21,03%	33,55%	-93,96%	-83,75%	-47,50%	-41,23%
Pantone V2 Benzin und Wasser		4,13		812		393
		33,23%		-79,70%		-39,54%
Pantone V3 Benzin	4,24	1,62	549	877	271	838
	8,72%	-47,74%	-89,44%	-78,08%	-15,31%	28,92%
Pantone V3 Benzin und Wasser	3,96	2,87	563	694		
	1,54%	-7,42%	-89,17%	-82,65%		
Pantone V3 Ethanol	1,05	4,02	551	654	147	201
	-73,08%	29,68%	-89,40%	-83,65%	-54,06%	-69,08%
Pantone V3 Ethanol und Wasser	4,28	5,48	443	1206	75	155
	9,74%	76,77%	-91,48%	-69,85%	-76,56%	-76,15%
Pantone V4 Benzin	3,56	2,8	865	734	245	362
	-8,72%	-9,68%	-83,37%	-81,65%	-23,44%	-44,31%

Zuletzt gilt es noch die NO_x Konzentrationen zu beurteilen. Auch hier konnte eine deutliche Verbesserung nachgewiesen werden. Nur für den Versuch des Pantone V3 mit Benzin ist die Konzentration über die des Vergaserbetriebes gestiegen. Dies deutet auf eine eigentlich ungewollt erhöhte Verbrennungstemperatur hin. Tatsächlich lässt sich diese Vermutung schnell beweisen, mit einem Blick in Tabelle 7 *Messergebnisse, Temperaturen, Gesamtübersicht* zeigt sich sofort eine nachgewiesen erhöhte Abgastemperatur von $659,6^\circ\text{C}$. Im Gegensatz dazu konnte der NO_x – Wert zum Beispiel mit der vierten Variante um bis zu $-44,31\%$ gesenkt werden, wobei hier auch deutlich niedrigere Abgastemperaturen vor dem Reaktor von $360^\circ\text{C} - 420^\circ\text{C}$ gemessen wurden.

10.3 Druckmessungen

Bei der nachträglichen Auswertung der aufgenommenen Druckwerte wurde, wie bereits im Kapitel 9.1.7 *Digitale Auswertung und Messwertspeicherung* erläutert, ebenfalls die Diagrammerstellung aus Textdaten genutzt. Leider hat sich jedoch herausgestellt, dass die Rechengeschwindigkeit und damit die Abtastrate des Arduino Controllers offensichtlich zu gering für die gegebenen Umstände ist. Als Grund hierfür sind die stark wechselnden Druckbedingungen sowohl im Ansaug- als auch im Abgastrakt des Motors anzunehmen. Da über die gesamte Zeit eines Arbeitsspiels, also während zwei Umdrehungen, die Ventile jeweils nur eine halbe Umdrehung geöffnet sind, werden die Gasströme in der Abgas- wie auch in der Einlassseite ebenfalls nur $\frac{1}{4}$ der Zeit eines Arbeitsspiels ‚bewegt‘ oder ‚angetrieben‘. Dies führt zu stark schwankenden lokalen Druckänderungen. Die aufgenommenen Daten, sowie zwei ausgewertete Messreihen mit Diagrammen können im Anhang eingesehen werden.

10.4 Verbrauchsabschätzung

Wie bereits in Kap. 9.1.2 *Verbrauchsabschätzung* beschrieben wurde, eignen sich die gewählten Methoden nicht für eine statistisch korrekte Auswertung der Verbräuche der einzelnen Systeme, dies liegt allem voran an den Unterschieden zwischen den Systemen und den Messmethoden selbst. Deshalb sind die ermittelten Verbräuche als nicht aussagekräftig und, noch wichtiger, **nicht vergleichbar** anzusehen. Trotzdem wurden die Verbräuche wie beschrieben abgeschätzt und sollen folglich nun auch in der Tabelle rechts dargestellt werden.

Als gutes Beispiel für die anzunehmende Nichtigkeit der Messungen zeigen unter anderem die Ergebnisse des Oglevergasers. Hier wurden in zwei Messreihen bei gleicher Belastung zwischen den Messreihen Abweichungen von 100% Prozent ermittelt. Dies ist natürlich nicht zu erwarten. Ebenso wurde bei einer halbierten Belastung von 500W ein doppelt so hoher Verbrauch festgestellt, wie bei voller Belastung mit 1000W. Auch dies ist als höchst untypisch und somit als Fehlmessung einzuschätzen.

Ebenso weisen die deutlich reduzierten Abgaskonzentrationen auf eine bessere und effizientere Verbrennung hin, welche sich jedoch nicht durch die Verbrauchsabschätzung bestätigen lässt.

Tabelle 11: Verbrauchsabschätzung, Ergebnisse

		Verbrauch
Original Vergaser	500W	0,77
	1000W	0,9
Oglevergaser Benzin	500W	2,18
	1000W	1,14
Pantone V2 Benzin	500W	0,92
		0,86
		0,89
	1000W	1,6
		1,26
Pantone V3 Benzin	0W	0,66
	500W	0,72
	1000W	0,84
Pantone V3 Benzin und Wasser	0W	0,65
		0,83
	1000W	1,09
Pantone V3 Ethanol	500W	1,17
	1000W	1,37
Pantone V3 Ethanol und Wasser	0W	1,17
	500W	1,09
	1000W	1,32
Pantone V4 Benzin	0W	1
	500W	1,2
	1000W	0,91
Pantone V4 Ethanol	0W	0,56

10.5 Allgemeines Betriebsverhalten

Abschließend gilt es noch das allgemeine Betriebsverhalten der Systeme qualitativ zu beschreiben, da die bisher gezeigten Zahlenwerte keine direkte Aussage über Faktoren wie Laufverhalten oder Startwilligkeit treffen können. Zu diesem Zweck soll nun auf die spezifischen Besonderheiten einzelner Gemischaufbereitungssysteme eingegangen werden.

Vergaser:

Im originalen Aufbau ist das Aggregat, wie für Vergaser üblich, mit einem ‚Choke‘-Hebel zu starten. Dieser drosselt die Frischluftzufuhr und erhöht somit den Kraftstoffanteil im Gemisch. Erreicht der Motor danach annähernd Betriebstemperaturen, wird dieser wieder umgelegt und der Vergaser arbeitet mit einem weniger fetten Gemisch. Allgemein ist das Laufverhalten des Motors mit Vergaser als unzureichend einzuschätzen. Die Drehzahl bleibt oft nicht stabil, was zu erhöhter Lärmemission und entsprechend schlechten Abgaswerten führt. Darüber hinaus erreichte das Luftverhältnis während des Betriebes nur selten den Optimalwert um $\lambda = 1,00$. In der Regel lag er (wie auch die Messwerte zeigen) deutlich darunter. Wie zu erwarten war, steht diesen Nachteilen jedoch eine sehr einfache, allgemeine Bedienung gegenüber. Ist das Gerät gestartet und warmgelaufen, läuft es dank der automatischen Vergaserdrossel im Normalfall quasi von allein. Auch bei Änderungen der angeschlossenen Last wird die Drosselklappenstellung selbstständig geregelt.

Oglevergaser und/oder Pantone Reaktoren:

Allgemein lassen sich die Bedienung und das Betriebsverhalten der neben dem Vergaser untersuchten Gemischaufbereitungssysteme als sehr ähnlich beschreiben.

Um das Aggregat mit einem Oglevergaser (alleinstehend oder in Verbindung mit einem Pantone Reaktor) starten zu können, kann keine ‚Choke‘-ähnliche Vorrichtung genutzt werden. Um den Kraftstoffanteil für den Startvorgang im zugeführten Gasgemisch zu erhöhen, wird die Frischluftzufuhr mittels des Kugelhahns reduziert oder gegebenenfalls ganz beschränkt. Sollte dies jedoch nicht ausreichen und die Verdampfungsrate des Kraftstoffes, zum Beispiel durch niedrige Umgebungstemperaturen, für einen Startvorgang nicht ausreichen, kann zusätzlich die Luftzufuhr in den Tank selbst gedrosselt werden. Gegebenenfalls ist es sogar möglich auch diese Drossel komplett zu schließen. Durch den Ansaugvorgang des Motors während des Startens wird unter diesen Bedingungen der Druck im Tank sinken und das Verdampfen des Kraftstoffes erleichtert. Zum eigentlichen Starten wird nun die Drossel am Tank wieder leicht geöffnet und der verdampfte Kraftstoff kann so zusammen mit der Luft in den Motor gesaugt werden. Auch wenn diese Startprozedur aufwändiger klingen mag als die des Originalvergasers, ist dies nach kurzer Eingewöhnungszeit in der Praxis nicht zu bestätigen. Im Gegenteil. Hat man das System einige Male gestartet, bekommt man sehr schnell ein Gefühl dafür, welche Hebelstellungen zum Starten nötig sind. Sind die Stellungen einmal bekannt, kann das Gerät schnell gestartet werden. Im Vergleich zum Vergaser geht der Startvorgang mit dem Oglevergaser leichter *von der Hand*. Durch die Art der Gemischaufbereitung kann mit dem Oglevergaser relativ schnell ein zündfähiges Gemisch hergestellt werden. Da bei dem originalen Vergaser nicht in die Gemischaufbereitung an sich eingegriffen werden kann, kann der Startvorgang viel Zeit abverlangen, vor allem dann, wenn das Aggregat lange

nicht betrieben wurde. Diese Probleme wurden während des Betriebes mit einem Oglevergaser nicht festgestellt.

Ist das Aggregat gestartet, muss jedoch bis zum Erreichen der Betriebstemperatur häufiger eingegriffen und nachgeregelt werden. Wie in den Temperaturmessungen zu erkennen ist, stellen sich für die Temperaturen am Reaktor, nach einer gewissen Betriebszeit, nahezu statische Werte ein. Da die Verdampfungsrate und weitere Faktoren druck- und temperaturabhängig sind, müssen das Luftverhältnis und die Zuluft-Drossel am Tank bis zum Erreichen der quasistatischen Betriebstemperaturen hin und wieder angepasst werden. Allgemein lässt sich dieser Vorgang wie folgt einfach beschreiben: Sind Motor und Kraftstoff kalt, muss wenig Frischluft zugeführt werden und der Druck im Tank niedrig gehalten werden. Sind Motor und Kraftstoff auf Betriebstemperatur, kann der Frischluftanteil erhöht werden, da auch die höhere Verdampfungsrate zu einer größeren Menge Kraftstoffgas führt. Der Druck im warmen Tank kann im Regelfall auf Umgebungsdruck fallen, eine Drosselung ist folglich im warmen Betriebszustand nicht oder nur in geringem Maße nötig.

Da für keine der Umbauten der originale Vergaser ausgebaut werden musste, konnte die integrierte, automatische Gasdrosselklappe auch in den anderen Varianten genutzt werden. So war es möglich, die Drehzahl des Systems auf dem gleichen Wert zu halten wie im Vergaserbetrieb. In jedem Falle wurde jedoch nur die Drosselklappe an sich genutzt, die Benzinleitung und der originale Tank waren für die alternativen Gemischaufbereitungssysteme selbstverständlich demontiert. Wurde die Betriebstemperatur erreicht, ist in der Regel auch keine Nacheinstellung, bzw. Anpassung der Hebelstellungen erforderlich gewesen. Das Aggregat kann dank der automatischen Drossel ähnlich alleinstehend betrieben werden wie mit originalem Vergaser. Nur im Falle eines Lastwechsels musste das Luftverhältnis mittels Einstellung am Kugelhahn entsprechend angepasst werden.

Das Laufverhalten ist im Vergleich zum original Vergaser bei Varianten mit Oglevergaser und/oder Pantone Reaktor deutlich besser. Sie zeigten alle ein ruhigeres Laufverhalten, was eine geringere Lärmemission zur Folge hatte. Darüber hinaus konnten mit einem betriebswarmen System dieser Art erstaunlich niedrige Drehzahlen, ohne übermäßige Vibration des Motors, gefahren werden. Man würde umgangssprachlich auch von einem *sauberen und ruhigen* Standgas sprechen. Ein vergleichbar ruhiges Laufverhalten konnte im Originalsetup nicht erreicht werden.

Pantone Reaktor mit Einspritzung:

Da in der dritten Variante eine Kraftstoffeinspritzung zum Einsatz kam, musste die Startprozedur hier entsprechend angepasst werden. Mittels des *Choke-Tasters* wurde zum Starten zuerst etwas Kraftstoff in die Kammer eingespritzt und anschließend mittels der Reißleine gestartet. Je nach Kraftstoff und Umgebungsbedingungen war es, ähnlich dem Vorgehen beim Oglevergaser, notwendig die Luftzufuhr in die Kammer zu drosseln umso den Druck in dieser zu reduzieren.

Die eingespritzte Kraftstoffmenge ist drehzahlabhängig und kann mittels des Universalsteuergeräts geregelt werden. Auch bei diesem Gemischaufbereitungssystem war es notwendig das Luftverhältnis, aber auch die eingespritzte Kraftstoffmenge, während der Warmlaufphase hin und wieder anzupassen. Wurde die Betriebstemperatur erreicht, konnte aber auch dieses System mit Hilfe der automatischen Drosselklappe nachregelungsfrei betrieben werden, nur für den Fall des Lastwechsels war ein Eingreifen ähnlich dem Vorgehen beim Oglevergaser notwendig.

Benzin-Wasser Einspritzung:

Mit dem Universalsteuergerät konnten der Benzin- und Wasseranteil für die Einspritzung getrennt geregelt werden. So war es möglich die eingespritzte Wassermenge schrittweise zu erhöhen. Ein hoher Wasseranteil konnte jedoch nicht realisiert werden. Die eingestellten Anteile lagen bei etwa 10% – 20%. Die genauen Einspritzmengen zu definieren war mit der einfachen Versuchsschaltung jedoch nicht möglich, da die Übertragung der Einstellungen über die serielle Schnittstelle die Ausgangssignale der Steuerung gestört haben.

Des Weiteren ließen sich auch keine gravierenden Einflüsse der Wassereinspritzung auf die Abgaskonzentrationen feststellen.

Ethanol-Wasser Einspritzung:

Im Gegensatz zum getesteten Benzin-Wasser-Mix konnte der Wasseranteil bei einem Ethanol-Wasser-Gemisch deutlich erhöht werden. Hier konnten Gemische mit einem ungefähren Verhältnis von 50% Ethanol 50% Wasser zugeführt werden, ohne dass das Aggregat nennenswert an Leistung verloren hätte. Ebenso konnten die Abgaskonzentrationen durch das Beimischen von Wasseranteilen im Vergleich zu einem reinen Ethanolbetrieb nochmals gesenkt werden.

Ethanol und Oglevergaser:

Da Ethanol deutlich mehr Verdampfungswärme zugeführt werden muss als Benzin, eignete sich der verwendete Oglevergaser schlecht bis überhaupt nicht für den Betrieb mit Ethanol. Zum einen war es äußerst schwer das Aggregat überhaupt zu starten, zum anderen konnte während des Betriebes schnell festgestellt werden, dass die Gastemperatur der Ethanolgase vor dem Reaktor nicht über etwa 28°C stieg, trotz längerer Warmlaufphase. Dies deutet darauf hin, dass dem Ethanol für eine hohe Verdampfungsrate schlichtweg zu wenig Wärme zugeführt wurde. Ein Betrieb war nur ohne Last möglich und auch in diesem Falle stellte sich kein akzeptables Laufverhalten ein. Für den Betrieb mit Benzin stiegen die Kraftstoffgastemperaturen nach der Warmlaufphase an dieser Stelle auf über 34°C und stagnierten während des stationären Betriebes stets zwischen 35°C und 45°C

Selbstständige Bildung des Luftverhältnisses:

Wie bereits erwähnt, spielt die Wärmezufuhr eine entscheidende Rolle für die Verdampfungsrate der Kraftstoffe. Interessanterweise ließ sich für die warmgelaufenen Systeme mit Oglevergaser und Pantone Reaktor oft eine Art selbstregulierendes Luftverhältnis feststellen. Hatten die vorgeheizte Frischluft, der Kraftstoff selbst und der Oglevergaser ihre Betriebstemperaturen erreicht, war es häufig möglich die Frischluft ganz zu schließen und die Tankdrossel ganz zu öffnen. Während eines solchen Betriebs musste folglich keine Nachregelung des Kraftstoff-Luft-Gemisches stattfinden. Dieses Verhalten konnte sogar bei einem Lastwechsel genutzt werden. Auch hier musste nicht in die Gemischaufbereitung eingegriffen werden wenn die Last erhöht oder gesenkt wurde. Auch das Drosseln der Drehzahl erforderte keine Veränderung der Kugelhahnstellungen für Frischluft und Tank.

11 Kritische Betrachtung

Zur kritischen Beurteilung der untersuchten Systeme soll zuerst auf die Behauptungen, welche über die Funktionsweise des GEET-Reaktors gemacht wurden, eingegangen werden. In einem als optimal beschriebenen Zustand soll es im Inneren des Reaktors zwischen Kern und innerem Rohr zu einer Plasmabildung kommen, durch welche wiederum die Kraftstoffketten zu einem wasserstoffhaltigen Gas aufgespalten werden sollen. Die Möglichkeit einer solchen Kraftstoffvorbehandlung wurde bereits durch das MIT mit der Erfindung des ‚*Plasmatron*‘³⁹ nachgewiesen. In den durchgeführten Untersuchungen konnte jedoch kein Plasma im Inneren nachgewiesen werden. Zu diesem Zwecke wurde ein Sichtglas am Ende des Reaktors angebracht. Auch, dass es während des Betriebes zu einer solchen Magnetisierung des Reaktors kommt, dass der Kern im Inneren des Reaktors frei ‚*schwebend*‘ rotieren kann, konnte nicht nachgewiesen werden, in Versuchen ohne Kernhalter wurde dieser bei ausreichendem Unterdruck bis in das T-Stück am oberen Ende des Reaktors gezogen. Mit Hilfe eines GEET-Reaktors sollte es auch möglich sein, einen sehr hohen Wasseranteil von über 90% zu realisieren. Wie bereits im Kapitel 10.5 *Allgemeines Betriebsverhalten* erläutert wurde, konnte dies ebenfalls nicht nachgewiesen werden.

Darüber hinaus wären noch die zum Teil lückenhaften Messwertreihen für einige der durchgeführten Versuche zu erwähnen. Diese sind dadurch zu erklären, dass der Bau der Messsysteme selbst sowie der Umfang der angewandten Messmethoden während des Gesamtzeitraums einer eigenen Entwicklung unterlagen. So wurden beispielsweise zum späteren Zeitpunkt mehr Messsysteme eingesetzt als in den früheren Versuchen. Während der unterschiedlichen Versuche kam es, bedingt durch Murphy's law, hin und wieder zu Ausfällen einzelner Komponenten oder Fehlern bei der genauen Messwernerstellung. So wurden beispielsweise die korrekt aufgenommenen Abgaskonzentrationen eines Versuches für die Auswertung verwendet, während es parallel zu einer Fehlmessung bei der Verbrauchsabschätzung kam, welche folglich nicht mit aufgenommen werden konnte. Die vollständige Wiederholung solcher nur teilweise ungültigen Versuche war unter den gegebenen Umständen zeitlich jedoch nicht realisierbar.

Auch während der Entwicklung und Optimierung der Versuchsschaltung ist es zu Fehlern gekommen, welche im gegebenen Zeit- und Finanzrahmen nicht lösbar waren. So konnten, wie bereits erwähnt, keine korrekten Druckwerte aufgenommen oder eine stabile serielle Verbindung zur Übertragung von System- und Betriebsdaten realisiert werden. Auch die vorgesehene variable Zündung konnte, allen voran durch starke EMV Störungen durch die Zündspule, nicht vollständig entstört werden. Ein Betrieb dieser war nur eingeschränkt möglich, da es regelmäßig zu Zündaussetzern oder Fehlern bei den Einspritzsignalen kam.

Zu guter Letzt wäre die Einstellung des originalen Vergasers zu erwähnen. Wie sich während den Messungen herausgestellt hat, konnte nur selten ein optimales Luftverhältnis mit diesem erreicht werden. Dies bedeutet jedoch einen Nachteil im Bereich der Vergleichbarkeit der gemessenen Abgaskonzentrationen. Für einen optimalen Vergleich sind stets Werte bei gleichem λ zu favorisieren.

³⁹ Bericht im Anhang zu finden

12 Fazit

Mit den untersuchten Systemen konnte nachgewiesen werden, dass eine möglichst optimale Kraftstoffvergasung einen positiven Einfluss auf die Verbrennung und somit alle Abgaskonzentrationen hat. Die gezeigten Systeme stellen dabei eine tatsächliche Alternative zu den aktuell eingesetzten Systemen dar, vor allem im Bereich des stationären Einsatzes von Verbrennungsmotoren. Der verwendete Versuchsmotor konnte mit den alternativen Gemischaufbereitungssystemen bei gleicher Last und deutlich reduziertem Schadstoffausstoß erfolgreich betrieben werden, darüber hinaus ließ sich qualitativ ein verbessertes Laufverhalten feststellen. Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen der alternativen Gemischaufbereitungssysteme liegen im Vergleich sogar unter denen eines in Großserie eingesetzten Saugrohreinspritzsystems.

Durch die Nutzung der Restwärme des Abgases konnte den Kraftstoffen erfolgreich die nötige Verdampfungswärme zugeführt werden ohne, dass die Verdampfungsrate unter einen kritischen Punkt gefallen wäre. Trotz der sehr hohen Temperaturen im Reaktor kam es während keiner Zeit zu einer Selbstentzündung der zündfähigen Gemische im System. Darüber hinaus konnten die am Reaktor und am Motor gemessenen Temperaturen sowie die Endtemperatur des Abgases gesenkt werden. Dies deutet auf eine bessere Gesamteffizienz hin und bedeutet auch weniger abgegebene Restwärme, es kommt so zu einer besseren Ausnutzung der im Kraftstoff vorhandenen Energie.

Abschließend wäre noch, die im Vergleich zu modernen Systemen, geringe Komplexität der Systeme positiv zu erwähnen. In Bezug auf Materialkosten und Fertigungsaufwand ist ein Vergasertank wie er hier gezeigt wurde bereits einem normalen Vergaser vorzuziehen, vor allem unter dem Aspekt, dass ein solcher Tank konstruktiv noch vereinfacht und verkleinert werden kann. Kommen Komponenten wie Einspritzdüsen, Hochdruckpumpen und -Leitungen oder komplexe elektronische Schaltungen hinzu, liegen die Vorteile eines Ogle oder Pantone ähnlichen Systems klar auf der Hand.

13 Ausblick

Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass sich die Restwärme des Abgases effektiv zur Aufbereitung von stöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Gemischen eignet. Folglich kann eine Entwicklung und Anpassung der Systeme an **alle** denkbaren Motorgrößen und Kraftstoffarten durchgeführt werden!

Darüber hinaus sollte untersucht werden welchen Einfluss getrennte Vergasertanks und Reaktoren für unterschiedliche Kraftstoffe haben. In einem solchen System wäre es möglich, die benötigten Wärmemengen für die Kraftstoffvergasung den Kraftstoffen entsprechend getrennt zuzuführen. So wäre es für den Betrieb möglich die unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen der Kraftstoffe zu berücksichtigen und eine optimale Verdampfungsrate der jeweiligen zu garantieren.

14 Literaturverzeichnis

- (2017). Abgerufen am 2017 von <http://www.cbccity.de>: <http://www.cbccity.de/wp-content/uploads/2011/05/Sankey-Diagramm-Wirkungsgrad-Verbrennungsmotor.png>
- (2017). Abgerufen am 2017 von <https://www.greengear.de>: <https://www.greengear.de/wp-content/uploads/2010/03/Verbrennungsmotor-Energienutzung.jpg>
- (2017). Abgerufen am 2017 von <https://upload.wikimedia.org>: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0c/Ideal-stoichiometry.svg/langde-437px-Ideal-stoichiometry.svg.png>
- Aeviate*. (2017). Abgerufen am 2017 von <http://aeviate.de>: <http://aeviate.de/wp-content/uploads/2015/04/Schwimmervargaser-Venturi-Rohr-Prinzip-1024x439.jpg>
- Audi Technology Portal*. (2017). Abgerufen am 2017 von https://www.audi-technology-portal.de/files/images/517/bild_2.151_brennraum__large.jpg: https://www.audi-technology-portal.de/files/images/517/bild_2.151_brennraum__large.jpg
- blomenkemper*. (2018). Abgerufen am 2018 von <http://www.blomenkemper.com>: http://www.blomenkemper.com/schema_sq_lpg.jpg
- Pantone, P. (1995). *Patentnr. WO 96/14501*. USA / Utah.
- Reiner. (07. November 2016). *Reiner@rollerreiner.org*. Abgerufen am 07. November 2016 von Reiner@rollerreiner.org: http://images.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Frollerreiner.org%2FCommon-%2520Rail-%2520System-Dateien%2Fimage004.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Frollerreiner.org%2FCommon-%2520Rail-%2520System.htm&h=404&w=548&tbnid=zIO_k_TDNsGwEM%3A&vet=1&docid=fKdYMCgzsm
- Science-Explorer*. (2018). Abgerufen am 2018 von <http://www.science-explorer.de>: http://www.science-explorer.de/GEET-Motor_l.jpg
- Slimlife*. (2018). Abgerufen am 2018 von <http://www.slimlife.eu>: <http://www.slimlife.eu/wordpress/2017/11/geet-plasma-reaktor-nach-paul-pantone/>
- Uni-Flensburg*. (2017). Abgerufen am 2017 von <http://www.biat.uni-flensburg.de>: <http://www.biat.uni-flensburg.de/msc/system/images/Abgas/Abgkurve1.gif>
- Wikimedia*. (2017). Abgerufen am 2017 von <https://upload.wikimedia.org>: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0c/Helsinki_h%C3%A4k%C3%A4p%C3%B6ntt%C3%B6_2.4.2010_003.jpg/1280px-Helsinki_h%C3%A4k%C3%A4p%C3%B6ntt%C3%B6_2.4.2010_003.jpg

Wikipedia. (2017). Abgerufen am 2017 von https://de.wikipedia.org:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0c/1928_Model_A_Ford.jpg/1280px-1928_Model_A_Ford.jpg

Wikipedia. (2017). Abgerufen am 2017 von <https://de.wikipedia.org:https://de.wikipedia.org/wiki/Verbrennungsluftverh%C3%A4ltnis>

Wikipedia. (2017). Abgerufen am 2017 von <https://de.wikipedia.org:https://de.wikipedia.org/wiki/Luft>

Wikipedia. (2017). Abgerufen am 2017 von <https://de.wikipedia.org:https://de.wikipedia.org/wiki/Benzineinspritzung>

Wikipedia. (2017). Abgerufen am 2017 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Direkteinspritzung:https://de.wikipedia.org/wiki/Direkteinspritzung>

Wikipedia. (2018). Abgerufen am 2018 von <https://de.wikipedia.org:https://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad>

Wikipedia. (2018). Abgerufen am 2018 von <https://de.wikipedia.org:https://de.wikipedia.org/wiki/Blockheizkraftwerk>

Wikipedia. (01 2018). Abgerufen am 01 2018 von https://en.wikipedia.org:https://en.wikipedia.org/wiki/Tom_Ogle

Wikipedia. (01 2018). Abgerufen am 01 2018 von https://lh3.googleusercontent.com/-lf3SH4II3Tc/VnNzCKRsTwi/AAAAAAAAIyY/wLK0fp7L-qs/s1152-1c42/paul_pantone.jpg