



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Mehdi Ajideh

**Ertüchtigung und Erprobung eines fremdgezündeten
Sonderottomotors für die Zylinderdruckindizierung
beim Betrieb mit alternativen Kraftstoffen**

Mehdi Ajideh

**Ertüchtigung und Erprobung eines
fremdgezündeten Sonderottomotors
für die Zylinderdruckindizierung beim Betrieb mit
alternativen Kraftstoffen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Jan Piatek
Zweitprüfer: Prof. Dr. Sven Jerzembeck

Abgabedatum: 12.05.2021

Zusammenfassung

Mehdi Ajideh

Thema der Bachelorthesis

Ertüchtigung und Erprobung eines fremdgezündeten Sonderottomotors für die Zylinderdruckindizierung beim Betrieb mit alternativen Kraftstoffen

Stichworte

Ottomotor, Ottomotor-Prozess, Bio- und synthetische Kraftstoffe, Emissionen, ASTM-CFR-Motor D2699/D2700, Zylinderdruckindizierung, dSPACE und Matlab/Simulink Programm, Thermodynamik und Heizverlauf

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Optimierung und Erweiterung der messtechnischen Instrumente und der Inbetriebnahme eines Sonderottomotors. Im Motor sollen die Zylinderdruckverläufe und Volumenänderungsverläufe über Kurbelwinkel für verschiedene alternative Kraftstoffe untersucht werden. Zuerst werden ein Drucksensor und ein Kurbelwinkelmarker am Prüfmotor angepasst und montiert. Danach wird mithilfe des dSpace-Hard- und Software-Systems und des MATLAB/Simulink-Programms ein Programm für die Messung von Druckverläufen erstellt, erweitert und optimiert. Mit dem Benutzeroberflächen-Programm „Control Desk“ werden im Motor die Messungen in Echtzeit erfasst, beobachtet und gespeichert. In der nächsten Phase werden mit dem MATLAB-Programm die Druckverläufe und die auf Druck basierten Heizverläufe sowie ein p-V-Diagramm grafisch dargestellt und analysiert.

Mehdi Ajideh

Title of the paper

Upgrading and testing of a spark-ignited special Otto engine for cylinder pressure indexing during operation with alternative fuels

Keywords

Otto engine, Otto engine process, biofuels and synthetic fuels, emissions, ASTM-CFR-Motor D2699/D2700, Cylinder pressure indexing, dSPACE and Matlab/Simulink program, thermodynamics and heat course

Abstract

This work deals with the optimization and extension of the metrological instruments and the commissioning of a special Otto motor. In the engine, the cylinder pressure curves and volume change curves over crank angles for different alternative fuels will be investigated. First, a pressure sensor and a crank angle marker are adapted and mounted on the test engine. Then, using the dSpace hardware and software system and the MATLAB/Simulink program, a program for measuring pressure curves is created, expanded and optimized. With the user interface program "Control Desk", the measurements are recorded, observed and stored in real time in the engine. In the next phase, the MATLAB program is used to graph and analyze the pressure curves and the heat course based on pressure, as well as a p-V diagram.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Department Maschinenbau und Produktion

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn Mehdi Ajideh



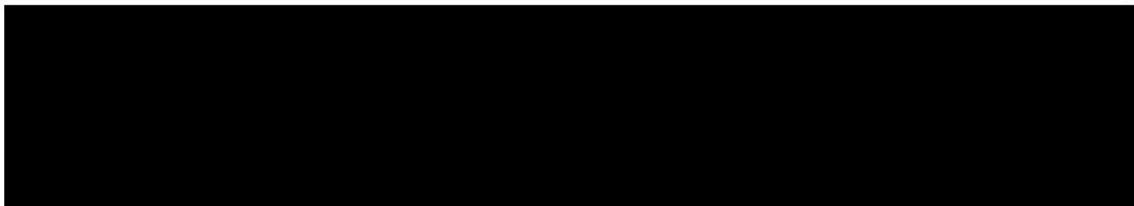
Thema:

Ertüchtigung und Erprobung eines fremdgezündeten Sondermotors für die Zylinderdruckindizierung beim Betrieb mit alternativen Kraftstoffen

Alternative und zum Teil synthetische hergestellte Kraftstoffe haben ein hohes Potential zur Reduktion der CO₂- und der Schadstoffemissionen von Verbrennungsmotoren schon in der Bestandsflotte von Fahrzeugen und Anlagen. Ein Klopfmotor, der üblicherweise zur Oktanzahlermittlung genutzt wird, soll zur Untersuchung der Verbrennung alternativer Kraftstoffe messtechnisch erweitert werden. Dazu soll der Motor mit Zylinderdruckmesstechnik ausgestattet werden, so dass die Druckverläufe bei verschiedenen Kraftstoffen und Randbedingungen bewertet werden können.

Schwerpunkte:

- Anpassung und Einrichtung eines Messsystems für Zylinderdruck und Kurbelwinkel auf Basis von dSPACE Hard- und Software sowie einem vorhandenen Winkelmarkengeber und einer Messzündkerze
- Entwicklung einer Motorprozessrechnung in Matlab basierend auf gemessenen Druckverläufen im Zylinder und ggf. im Ansaugsystem
- Durchführen von Zylinderdruckmessungen mit verschiedenen Kraftstoffen und Bewertung der Ergebnisse



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1. Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	2
1.2 Methodik	2
2. Grundlagen	3
2.1 Der Ottomotor-Prozess	3
2.2 Geometrische Größen.....	4
2.3 Randbedingungen.....	5
2.4 Definition des Ottomotor-Prozesses.....	5
2.5 Thermischer Wirkungsgrad η_{th} Ottomotor-Prozess	5
2.6 Effektiver Mitteldruck.....	6
3. Ottokraftstoffe.....	9
3.1 Kraftstoffsorten und deren Zusammensetzung.....	9
3.2 Herstellung von Kraftstoffen.....	10
3.3 Herstellung von Biokraftstoffen	10
3.4 Herstellung von synthetischen Kraftstoffen	10
3.5 Alkoholkraftstoffe	11
3.6 Gemischbildung	12
3.6.1 Äußere Gemischbildung durch Vergaser	12
3.6.2 Äußere Gemischbildung durch Einspritzung	13
3.6.3 Innere Gemischbildung durch Einspritzung.....	14
4. Emissionen.....	15
5. ASTM-CFR Sonderottomotor	16
5.1 Prüfmotor	16
5.2 Spezifikationen des Motors	17
5.3 Eigenschaften des Motors.....	18
5.4 RON - ASTM D2699	20
5.5 MON - ASTM D2700.....	20
5.6 Einstellung der Grundzylinderhöhe (RON)	20

5.7 Berechnung des Verdichtungsverhältnisses.....	22
5.8 Einstellung des Kraftstoff-Luft-Verhältnis	22
5.9 Zündung des Motors	23
5.10 Starten / Abschalten des Motors	24
6. Messtechnik und Addaption.....	25
6.1 Winkelmarkergeber AVL 360C/600	25
6.2 Zylinderdrucksensor Kistler 6117A17.....	26
6.3 Indiziersystem	27
7. MATLAB/Simulink und dSPACE.....	28
7.1 Inbetriebnahme der dSPACE-AutoBox	28
7.1.1 DS1103 PPC Controller Board	28
7.1.2 Eigenschaften von DS1103	29
7.1.3 Umfassende Schnittstellen	29
7.1.4 Aufzeichnung und Ausgabe von E/A-Werten	29
7.1.5 Analog/Digital-Umsetzer	29
7.1.6 Frequenz Messung.....	30
7.1.7 Trigger Messung.....	31
7.2 MATLAB/Simulink-Modell und dSPACE.....	31
7.2.1 Erzeugung von RTI.....	32
7.2.2 ControlDesk.....	36
7.2.3 Durchführung von Exprimenten mit RTI.....	36
8. Versuchsauswertung	45
8.1 1.Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz)	45
8.2 Thermodynamik und Heizverlauf.....	45
8.3 Auswertung des (p - φ) -, (p - V)- und (QH - φ)-Diagramms	47
9. Zusammenfassung und Ausblick.....	49
10. Literaturverzeichnis	51
11. Softwareverzeichnis	52
A.1 Information zur Grundeinstellung der Zylinderhöhe	53
A.2 dSPACE DS 1103 Board mit Zubehör.....	54
A.3 Technischendaten DS1103 PPC Controller Board	55
A.4 Simulink-Modell.....	65
A.5 Matlab-Programm	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Funktionsweise des Viertakt-Ottomotors	3
Abbildung 2.2: Geometrische Größen	4
Abbildung 2.3: p-V Diagramm des realen Ottomotor-Prozesses	5
Abbildung 2.4: Thermischer Wirkungsgrad η_{th} über Verdichtungsverhältnis ϵ	6
Abbildung 2.5: p-V Diagramm vom Arbeitsprozess im Zylinder	7
Abbildung 2.6: vorgestellte Rechteckfläche P_{mi}	7
Abbildung 3.1: Molekülstrukturen von Kraftstoffkomponenten.....	9
Abbildung 3.2: Herstellpfade fossiler und regenerativer Kraftstoffe	10
Abbildung 3.3: Prinzipbild eines Vergasers	13
Abbildung 4.1: Abgaszusammensetzung eines Ottomotors bei $\lambda = 1$	15
Abbildung 4.2: Schadstoffkomponenten beim Ottomotor	15
Abbildung 5.1: ASTM-CFR Sonderottomotor	16
Abbildung 5.2: Querschnitt Zylindergruppe	21
Abbildung 5.3: Schnittbilder des Vergasers.....	23
Abbildung 6.1: Winkelmarkergeber AVL 360C/600	25
Abbildung 6.2: CDM- und Triggersignal	26
Abbildung 6.3: Funktion von piezoelektrischen Sensor	26
Abbildung 6.4: Drucksensor Kistler 6117A17	27
Abbildung 6.5: Drehzahl über Arbeitsspielzeit	27
Abbildung 7.1: Blockdiagramm DS1103.....	28
Abbildung 7.2: DS1103 PPC Controller Board	29
Abbildung 7.3: DS1103ADC_Cx - Block.....	30
Abbildung 7.4: Pin 22/23 Connector P1B	30
Abbildung 7.5: DS1103SL_DSP_F2D - Block	30
Abbildung 7.6: Pin 1/30 Connector P2B.....	31
Abbildung 7.7: DS1103MASTER_HWINT_Ix - Block	31
Abbildung 7.8: Pin 16/32 Connector P2B	31
Abbildung 7.9: Plattform RTI1103	32
Abbildung 7.10: „rti1103“ Befehl im Command window	33
Abbildung 7.11: Model in Simulink	34
Abbildung 7.12: konfiguration des Modells.....	34
Abbildung 7.13: Build Model konfigurieren	35
Abbildung 7.14: Modell als sdf-Datei.....	35
Abbildung 7.15: ControlDesk Programm	36

Abbildung 7.16: DS1103 Board registrieren	37
Abbildung 7.17: New Experiment Dialog	37
Abbildung 7.18: New Experiment in Navigator	38
Abbildung 7.19: New Layout	38
Abbildung 7.20: Instrumente auswählen & einfügen.....	39
Abbildung 7.21: Signal auswählen und im Gerät ablegen	39
Abbildung 7.22: Auswahl und Load sdf-Datei.....	40
Abbildung 7.23: Programm Start/Stop & Animation.....	40
Abbildung 7.24: Instrument "CaptureSettings" auswählen & einfügen.....	41
Abbildung 7.25: Name von Projekt auf "PPC - HostService"	41
Abbildung 7.26: Settings auf "Acquisition" und "Stream of Disk"	42
Abbildung 7.27: „.idf“-Datei wählen und Datei speichern	42
Abbildung 7.28: Fehlermeldung „Data Access“	42
Abbildung 7.29: ".idf-Datei" in ".mat-Datei" konvertieren	43
Abbildung 7.30: Darstellung von Rohdaten mit Matlab Programm	43
Abbildung 7.31: Matlab Code erstellen.....	44
Abbildung 7.32: (p - φ)- und (p - V)-Diagramm.....	44
Abbildung 8.1: Thermodynamisches System Brennraum für innere Gemischbildung	45
Abbildung 8.2: Brenn- und Heizverlauf in Ottomotor (n = 1000 1/min ; p =11 Bar)	47
Abbildung 8.3: (p - φ) -, (V - φ)-, (p - V)- und (QH - φ)-Diagramm aus dem Versuch Klopfmotor.....	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Geometrische Größen	4
Tabelle 3.1: Eigenschaften von Methanolkraftstoffen	12
Tabelle 5.1: Spezifikationen des Motors.....	17
Tabelle 5.2: Eigenschaft des Motors	18
Tabelle 5.3: Basis-Toluol-Einstellkraftstoffe	19
Tabelle 5.4: RON - ASTM D2699	20
Tabelle 5.5: MON - ASTM D2700	20

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Beschreibung</u>
φ	[°KW]	Kurbelwinkel
η	[%]	Wirkungsgrad
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ω	[rad/min]	Winkelgeschwindigkeit
α	[°]	Winkel
ε	[-]	Verdichtungsverhältnis
κ	[-]	Isentropenexponent Kappa
λ	[-]	Verbrennungsluftverhältnis
A	[m ²]	Fläche
c	[J/(kg*K)]	spezifische Wärmekapazität
c _v	[J/(kg*K)]	isochore spez. Wärmekapazität
c _m	[m/s]	mittlere Kolbengeschwindigkeit
D	[mm]	Bohrung
h	[J/kg]	spezifische Enthalpie
H	[J]	Enthalpie
l	[mm]	Länge
L-pl	[mm]	Pleuellänge
m	[kg]	Masse
M	[Nm]	Drehmoment
n	[U/min]	Drehzahl
p	[N/m ² = Bar]	Druck
Pe	[kW]	effektive Leistung
q _B	[kJ/kg]	spezifische Wärmemenge
Q _B	[kJ]	Wärmemenge Brennstoff
Q _H	[kJ]	Wärmemenge Heizverlauf
Q _W	[kJ]	Wandwärme
r	[mm]	Kurbelradius
R	[J/(kg*K)]	spezifische Gaskonstante
s	[mm]	Hub
S	[J/K]	Entropie
T	[K]	Temperatur
u	[J/kg]	spezifische innere Energie
U	[J]	innere Energie
V	[m ³]	Volumen
V _c	[m ³]	Kompressionsvolumen
V _h	[m ³]	Hubvolumen eines Zylinders
W	[J]	Arbeit

Abkürzungsverzeichnis

<u>Abkürzung</u>	<u>Beschreibung</u>
A/D-Kanal	Analog/Digital-Kanal
A/F	Air/Fuel ratio
AS	Arbeitsspiel
ASTM	American Society for Testing Materials
CAN	Controller Area Network
CCR	Critical compression ratio
CDM	Crank Degree Marks
CFR	Cooperative Fuel Research
CR	Compression ratio
E/A-Kanal	Eingang/Ausgang-Kanal
ETBE	Ethyltertiärbutylether
FRQ	Frequenz
GND	Masse
GUI	Graphical User Interface
HiL	Hardware-in-the-Loop
I/O-Kanal	Input-/Output-Kanal
KR	Kompressionsrate
KW	Kurbelwelle
°KW	Grad Kurbelwellenwinkel
MOZ	Motor-Oktanzahl
MTBE	Methyltertiärbutylether
OT	oberer Totpunkt
PLL	Phasenregelschleife
PVA	Photovoltaikanlagen
PWM	Pulsweitenmodulation
RTI	Real Time Interface
RTW	Real Time Workshop
ROZ	Research-Oktanzahl
TRG	Trigger Signal
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UT	unterer Totpunkt

1. Einleitung

Der derzeitige Klimawandel durch den Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre sowie die zunehmende Ressourcenverknappung fossiler Brennstoffe vergrößern die Sorge um das Klima und die Energieversorgung der Zukunft. Daher haben alternative Kraftstoffe neben der energietechnischen Optimierung des Ottomotors ein hohes Potenzial zur Reduktion der CO₂- und Schadstoffemissionen von Verbrennungsmotoren und -anlagen. Ziel der deutschen Klimapolitik ist es daher, bis zum Jahr 2030 die Emissionen von Treibhausgasen um mindestens 55 Prozent gegenüber dem Stand von 1990 zu senken und bis zum Jahr 2050 eine weitestgehend Treibhausgas-neutrale Gesellschaft zu erreichen [1].

Alternative Kraftstoffe sind entweder „biogen“ oder „synthetisch“. Biokraftstoffe können aus unterschiedlichen Rohstoffen gewonnen werden: aus nachwachsenden Rohstoffen (Anbaubiomasse) wie Gerste, Mais, Raps, Zuckerrohr, Palm- und Sojaöl, aber auch aus Rest- und Abfallstoffen wie Stroh, Gülle oder Altspeiseölen. Diese Rohstoffe werden häufig zu Bioethanol bzw. Biodiesel verarbeitet. Synthetische Kraftstoffe können aus unterschiedlichen Quellen stammen. Sie werden aus mehreren Ausgangsstoffen chemisch hergestellt bzw. synthetisiert. Für ihre Herstellung wird derzeit viel Energie benötigt [2].

Im Zentrum für Energietechnik (ZET) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW) ist ein Sonderottomotor (Klopfmotor) des Fabrikats „Waukesha“ vorhanden. Der Motor ist Untersuchungsobjekt eines Versuchstandes und wird im Kolbenmaschinen-Labor zur Durchführung des Versuchs „Oktanahlermittlung bei verschiedenen Kraftstoffen“ verwendet.

Ein Klopfmotor des Modells ASTM-CFR-Motor D2699/D2700 ist ein Forschungsmotor, der zum Standardprüfverfahren für die Erforschung der Oktanzahl des Kraftstoffs des Ottomotors genutzt wird [3]. Als „klopfen“ wird eine unkontrollierte Verbrennung des Kraftstoffs bei Ottomotoren bezeichnet, also eine vorzeitige Selbstzündung des Luft-Kraftstoff-Gemisches, die nicht durch die Zündfunken ausgelöst wird [4].

1.1 Zielsetzung

Die vorliegende Bachelorarbeit widmet sich der Inbetriebnahme eines Sonderottomotors des Modells ASTM-CFR-Motor D2699/D2700, der neben der Oktanzahlermittlung technisch bzw. messtechnisch optimiert, angepasst und erweitert werden soll, um eine experimentelle Untersuchung der Verbrennung alternativer Kraftstoffe zu ermöglichen.

Dazu soll der Motor mit Zylinderdruckmesstechnik und einem Kurbelwinkelmarker ausgestattet werden, sodass die Daten von Druckverläufen bei verschiedenen Kraftstoffen und Bedingungen mithilfe des dSpace-Hard- und Software-Systems und des MATLAB/Simulink-Programms erfasst, bewertet und gespeichert werden können. Im nächsten Schritt wird mit dem MATLAB-Programm eine Motorprozessrechnung entwickelt, damit die Druckverläufe analysiert und grafisch dargestellt werden können. Im letzten Schritt werden die Zylinderdruckverläufe mit verschiedenen Kraftstoffen und auf Druck basierten Heizverläufen bewertet und analysiert.

1.2 Methodik

In dieser Arbeit sollen die Zylinderdruckverläufe mit der Kurbelwinkeleinstellung in Echtzeit mit dem dSpace-Programm erfasst, verarbeitet und mit dem MATLAB-Programm grafisch dargestellt und analysiert werden. Hier werden die Druckverläufe von verschiedenen Kraftstoffen erstellt, bewertet und analysiert. In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen des Ottomotor-Prozesses erläutert und vorgestellt. Kapitel 3 befasst sich mit den Kraftstoffen, insbesondere alternativen Kraftstoffen wie „biogen“ und „synthetisch“. In Kapitel 4 werden die Emissionen und die vollständige Verbrennung behandelt. In Kapitel 5 werden detailliert die Eigenschaften und technischen Daten des ASTM-CFR-Sonderottomotors erklärt. In Kapitel 6 werden die Eigenschaften und technischen Daten des Drucksensors und Kurbelwinkelmarkers diskutiert und die Druckindizierung im Sonderottomotor erläutert. Kapitel 7 befasst sich mit den dSpace- und MATLAB-Programmen und deren Eigenschaften. Kapitel 8 erörtert die Thermodynamik und den Heizverlauf des Versuchs. Abschließend sollen in einem Fazit (Kapitel 9) Erkenntnisse aus der technischen Analyse des Versuches zusammengefasst, der heutige Stand der Technik von Ottomotoren und alternativer Kraftstoffe beurteilt sowie ein Ausblick auf zu erwartende zukünftige Entwicklungen in der Forschung gegeben werden.

2.Grundlagen

2.1 Der Ottomotor-Prozess

Die gebräuchlichste Form des Ottomotors funktioniert nach dem Viertakt-Prinzip, welches im Folgenden kurz erklärt wird:

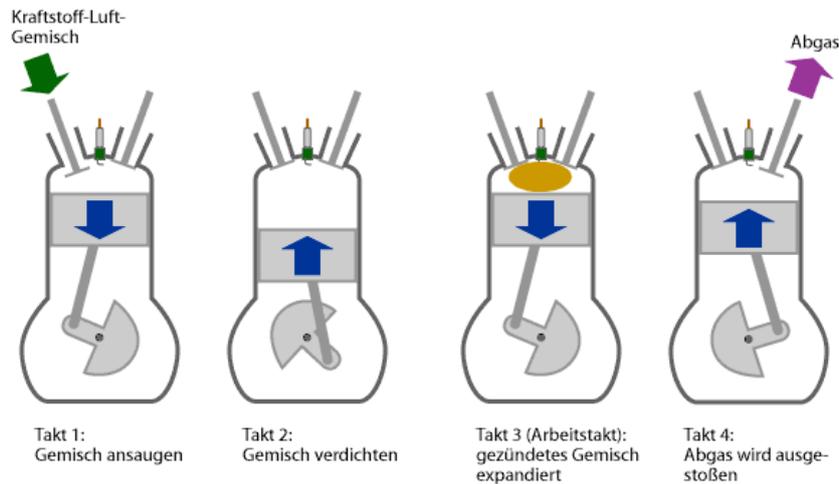


Abbildung 2.1: Funktionsweise des Viertakt-Ottomotors [5]

Vier Takte wiederholen sich nach jeweils zwei Umdrehungen der Pleuellager:

1.Takt: Im ersten Takt bewegt sich der Pleuellager nach unten, während das Einlassventil geöffnet ist. Durch dieses Ventil wird Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Zylinder gesaugt; es entsteht ein Unterdruck von z. B. 0,1 oder 0,2 bar. Im Teillastbetrieb wird die Zufuhr von Gemisch mit einer Drosselklappe vermindert. Das Ventil wird geschlossen, wenn der Pleuellager in etwa den unteren Totpunkt erreicht hat oder eventuell ein wenig später.

2.Takt: Im zweiten Takt bewegt sich der Pleuellager wieder nach oben, während die Ventile geschlossen bleiben. Dadurch wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch komprimiert, wodurch es sich auf einige Hundert Grad Celsius (z. B. 500 °C) erhitzt, aber nicht selbst entzündet.

3.Takt: Wenn der Pleuellager in etwa den oberen Totpunkt erreicht hat (eventuell auch ein wenig früher), wird die Zündkerze betätigt. Dadurch verbrennt der Kraftstoff, und die Temperatur steigt innerhalb weniger Millisekunden auf über 2000 °C an. Dadurch steigt auch der Druck im Zylinder massiv an, bei hoher Last z. B. auf 70 bar. Im nun folgenden dritten Takt, dem Arbeitstakt, bewegt sich der Pleuellager nach unten, wobei er durch das heiße Gas darüber angetrieben wird. Das Gas wird in etwa adiabatisch expandiert, wobei es sich z. B. auf 900 °C abkühlt.

2.3 Randbedingungen

Bei einem idealen Prozess (reversibel) handelt es sich um ein geschlossenes System, da Gas im Zylinder eingeschlossen bleibt und der Arbeitsaufwand für den Ladungswechsel (untere Fläche) entfällt. Das Luft-Brennstoff-Gemisch lässt sich als ideales Gas betrachten. Die Verdichtung und Expansion werden als adiabate Prozesse angenommen und die Zustandsänderung verläuft isentrop. Die Verbrennung wird als eine isochore Zustandsänderung mit Wärmezufuhr betrachtet, die Expansion der Verbrennungsgase mit anschließendem Ausströmen als eine isochore Wärmeabfuhr.

2.4 Definition des Ottomotor-Prozesses

Das p-V-Diagramm in Abbildung 2.3 zeigt den realen Ottomotor-Prozess mit zusätzlichen Wegen für den Ladungswechsel (0-1 und 1-0), der beim idealisierten Gleichraumprozess nicht existiert.

- 0 - 1: Kraftstoff-Luftansaugen
(Real Prozess)
- 1 - 2: Isentrope Kompression
- 2 - 3: Isochore Wärmezufuhr
- 3 - 4: Isentrope Expansion
- 4 - 1: Isochore Wärmeabfuhr
- 1 - 0: Abgasausschieben
(Real Prozess)

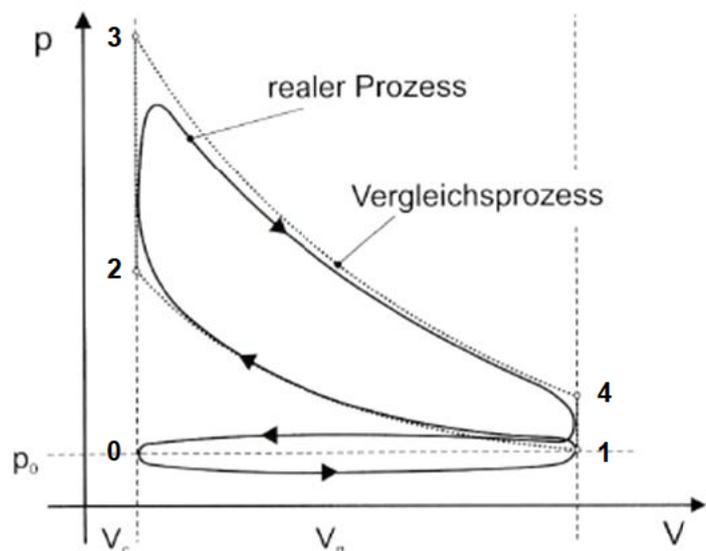


Abbildung 2.3: p-V Diagramm des realen Ottomotor-Prozesses [7a]

2.5 Thermischer Wirkungsgrad η_{th} Ottomotor-Prozess

$$\eta_{th} = 1 - \frac{|q_{ab}|}{q_{zu}} = 1 - \frac{c_{v41} \cdot (T_4 - T_1)}{c_{v23} \cdot (T_3 - T_2)} \quad (2.1)$$

Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \quad (2.2)$$

Verdichtungsverhältnis ε hat einen entscheidenden Einfluss auf den idealen thermischen Wirkungsgrad η_{th} . Das wiederum hat Einfluss auf das maximale Drehmoment, die maximale Leistung, die Klopfneigung und die Schadstoffemissionen [8].

Bedingungen

Verdichtungsendtemperatur T_2 steigt mit

- zunehmender Verdichtung
- unkontrollierte Verbrennung (Selbstzündung)
- Druckspitzen (Klopfen)

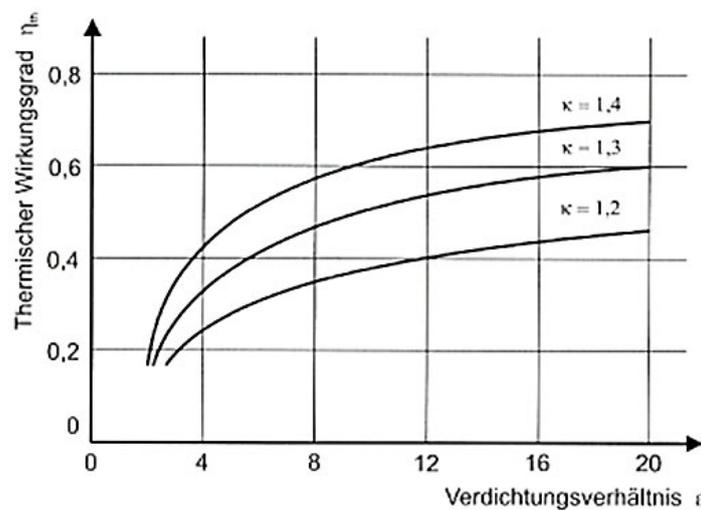


Abbildung 2.4: Thermischer Wirkungsgrad η_{th} über Verdichtungsverhältnis ε [7b]

2.6 Effektiver Mitteldruck

Das p-V-Diagramm beschreibt den Arbeitsprozess der Ladung im Zylinder. Aus der Thermodynamik ist bekannt, dass die Fläche im Inneren der p-V-Schleifen die innere Arbeit W_i (bzw. indizierte Arbeit) des Kreisprozesses darstellt [6b].

$$W_i = \oint p dV \quad (2.3)$$

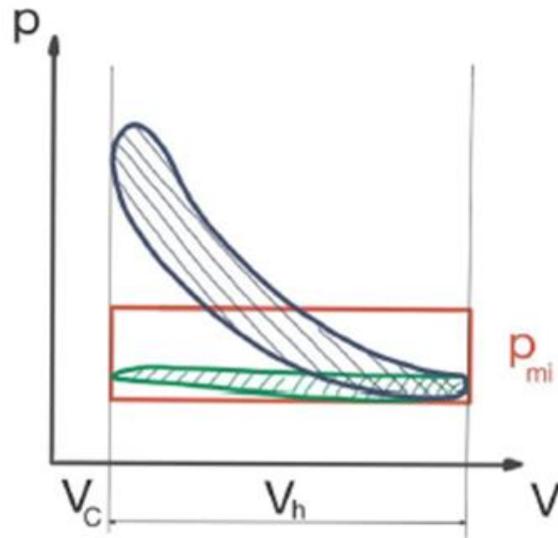


Abbildung 2.5: p-V Diagramm vom Arbeitsprozess im Zylinder [6b]

Für einen Viertaktmotor ergeben sich ein Hochdruck und eine Niederdruckfläche. Für beide zusammen kann man sich den Innenmitteldruck p_{mi} vorstellen als Rechteckfläche W_i mit einem Druck p_{mi} und dem Hubvolumen V_h als Seitenlängen, d.h.

$$W_i = p_{mi} \cdot V_h \quad (2.4)$$

Der Innenmitteldruck p_{mi} ist eine Vergleichsgröße für die spezifische Leistung eines Motors unabhängig vom Hubvolumen.



Abbildung 2.6: vorgestellte Rechteckfläche P_{mi} [6c]

Mit dem Innenmitteldruck eng verbunden ist die innere Leistung P_i

$$P_i = p_{mi} \cdot V_h \cdot i \cdot \frac{\omega}{2\pi} = p_{mi} \cdot V_h \cdot i \cdot n \quad (2.5)$$

Die Größe i ist die sogenannte Taktzahl, die die Anzahl der Arbeitsspiele pro Kurbelwellenumdrehung angibt. Beim Viertaktmotor ist die Taktzahl $i = 0,5$, da nur jede zweite Umdrehung ein Arbeitstakt ist. Beim Zweitaktmotor ist die Taktzahl $i = 1$ [6c].

Der Betriebspunkt eines Motors ist festgelegt durch die Motordrehzahl n und das Drehmoment M an der Kurbelwelle. Die Nutzleistung oder effektive Leistung P_e des Motors ergibt sich zu $P_e = M \cdot \omega = M \cdot 2\pi \cdot n$ (2.6)

Analog zum Innenmitteldruck kann man die Größe Nutzmitteldruck oder auch effektiven

Mitteldruck p_{me} einführen: $P_e = p_{me} \cdot V_H \cdot i \cdot n$ (2.7)

Der Nutzmitteldruck ist demnach ein Maß für das hubraumspezifische Drehmoment. Der Nutzmitteldruck kann nicht direkt gemessen werden [6d].

$$p_{me} = \frac{2\pi}{i} \cdot \frac{M}{V_H} \quad (2.8)$$

3. Ottokraftstoffe

3.1 Kraftstoffsorten und deren Zusammensetzung

Ottokraftstoffe bestehen zum Großteil aus Paraffinen und Aromaten (Abbildung 3.1). Paraffine mit einem rein kettenförmigen Aufbau (n-Paraffine) zeigen zwar eine sehr gute Zündwilligkeit, allerdings auch eine geringe Klopfestigkeit. Iso-Paraffine und Aromaten sind Kraftstoffkomponenten mit hoher Klopfestigkeit [9a].

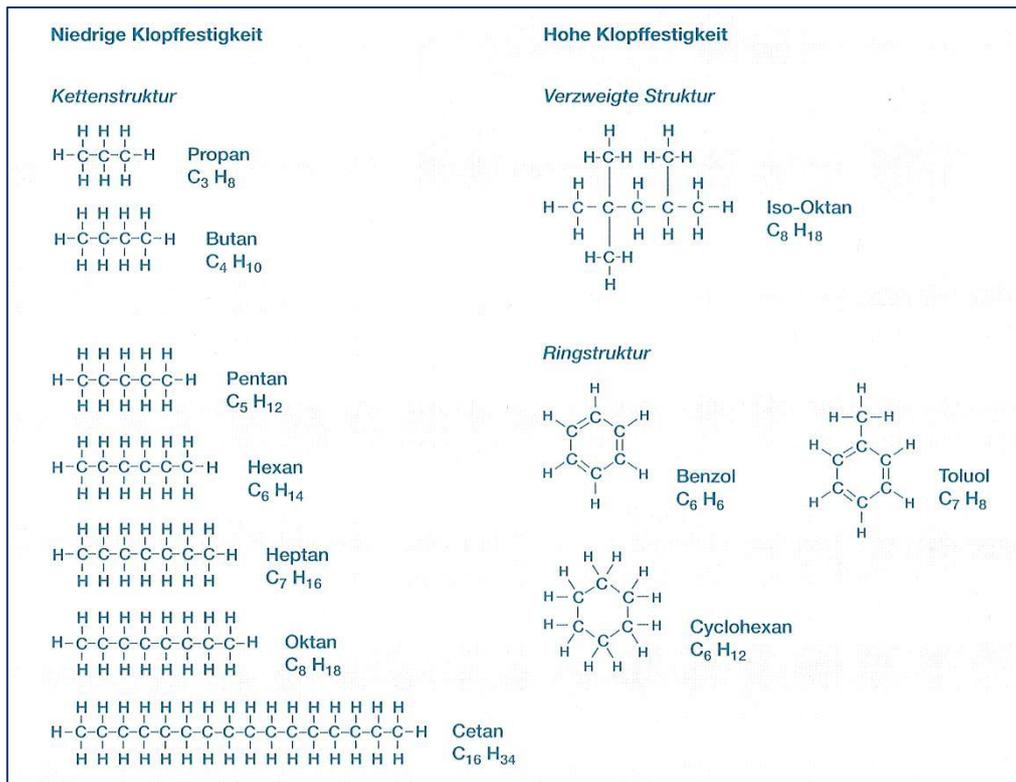


Abbildung 3.1: Molekülstrukturen von Kraftstoffkomponenten [9b]

Das Maß für die Klopfestigkeit eines Ottokraftstoffes ist die Oktanzahl. Der Zahlenwert ROZ (Research-Oktanzahl) gibt an, wie viel %-Volumenanteil Isooktan C_8H_{18} (ROZ = 100) sich in einer Mischung mit n-Heptan C_7H_{16} (ROZ = 0) befinden muss, damit er die gleiche Klopfestigkeit hat wie der zu prüfende Kraftstoff. So bedeutet z. B. die Oktanzahl ROZ = 98 eines Benzins, dass seine Klopfestigkeit einem Gemisch aus 98 Vol.-% Isooktan und 2 Vol.-% n-Heptan entspricht [6e].

→ Ottomotor: verbesserte Klopfestigkeit →

Paraffine ISO-Paraffine Olefine Naphthene ISO-Okatan Aromate

← Dieselmotor: verbesserte Zündwilligkeit ←

3.2 Herstellung von Kraftstoffen

Bei der Produktion von Kraftstoffen wird zwischen fossilen und regenerativen Verfahren unterschieden (siehe Abbildung 3.2). Kraftstoffe werden überwiegend aus fossilem Erdöl hergestellt. Erdgas als zweiter fossiler Energieträger spielt eine untergeordnete Rolle sowohl in der Direktnutzung als gasförmiger Kraftstoff, als auch als Ausgangsprodukt für die Herstellung von synthetischen paraffinischen Kraftstoffen [9c].

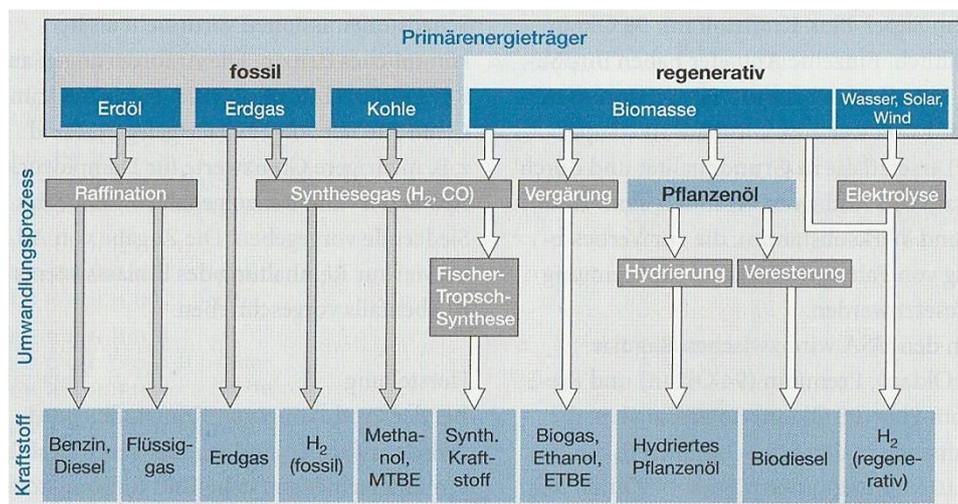


Abbildung 3.2: Herstellpfade fossiler und regenerativer Kraftstoffe [9d]

3.3 Herstellung von Biokraftstoffen

Bioethanol kann aus allen zucker- und stärkehaltigen Produkten gewonnen werden und ist der weltweit am meisten produzierte Biokraftstoff. Zuckerhaltige Pflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrüben) werden mit Hefe fermentiert, der Zucker wird dabei zu Ethanol vergoren. Bei der Bioethanolvergewinnung aus Stärke werden Getreide wie Mais, Weizen, oder Roggen mit Enzymen vorbehandelt, um die langkettigen Stärkemoleküle teilzuspalten. Bei der anschließenden Verzuckerung erfolgt eine Spaltung in Dextrose-moleküle mithilfe von Glucoamylase. Durch Fermentation mit Hefe wird in einem weiteren Prozessschritt Bioethanol erzeugt [9e].

3.4 Herstellung von synthetischen Kraftstoffen

Synthetische Kraftstoffe, die in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden können, lassen sich aus kohlenstoffhaltigen Rohstoffen synthetisieren. Als Rohstoffquelle eignet sich daher grundsätzlich auch CO₂, z.B. aus Industrieabgasen, aber auch Biomassen mit einem Kohlenstoffanteil. Im Falle der direkten Nutzung von CO₂, wird Wasserstoff als Reaktionspartner benötigt, um daraus z.B. Methanol zu synthetisieren. Um Wasserstoff aus regenerativen Quellen zu erzeugen, wird regenerative Energie benötigt, z.B. Strom aus

Wind- oder PV-Anlagen. Man spricht in diesem Zusammenhang deshalb auch von E-Fuels (eFuels). Bei der Herstellung von Kraftstoffen aus Biomasse können u. a. Vergärungs-, Vergasungs- oder Pyrolyseverfahren eingesetzt werden [10].

3.5 Alkoholkraftstoffe

In mobilen Verbrennungsmotoren kommen die beiden Alkoholkraftstoffe Methanol - CH_3OH und Ethanol - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ zur Anwendung. Oft werden Mischungen der Alkohole mit konventionellem Ottokraftstoff in verschiedenen Massenverhältnissen angeboten. Die Bezeichnung des Kraftstoffes ist dann z.B. M30 oder E30 für eine Mischung von 30% Methanol/Ethanol mit Ottokraftstoff.

Es gibt mehrere Gründe für den Einsatz von Methanol im Fahrzeug. Methanol wird aus Gas hergestellt. Es verursacht im Vergleich zu Benzin einen geringeren Schadstoffausstoß und bildet aufgrund des Sauerstoffgehalts weniger Ruß. Methanolgaskomponenten verursachen unter Sonneneinwirkung aufgrund des verminderten Reaktivitätspotenzials auch geringere Mengen an Ozon.

Die Nachteile sind eine unsichtbare Flamme, ein hoher Gefrierpunkt (-5°C) und sehr aggressive chemische Eigenschaften. Methanol hat im Vergleich mit Benzin einen geringeren volumenbezogenen Heizwert (ca. 50 Prozent weniger Reichweite).

Im motorischen Betrieb ergeben sich mit Methanol folgende Gesichtspunkte:

- Methanol ist für einen Magerbetrieb geeignet. Die Zündgrenzen liegen bei $0,34 < \lambda < 2,0$. Damit kann eine Stickoxidreduzierung mit zunehmenden λ erfolgen.
- Methanol ist mit einer ROZ / MOZ von 114,4 / 94,6 sehr klopfest. Der Motor kann mit hoher Verdichtung und ggf. in Kombination mit Aufladung ausgelegt werden.
- Die Verdampfungswärme ist dreimal so hoch wie bei Benzin. Hieraus resultieren Kaltstartprobleme bei äußerer Gemischbildung (Abhilfe: Direkteinspritzung oder Beimischung von Benzin (15%))
- Die laminare Brenngeschwindigkeit ist ca. 25-30% höher als bei Benzin. Dadurch ergibt sich eine leichte Prozesswirkungsgraderhöhung (Annäherung an isochore Verbrennung).
- Die Zündtemperatur liegt bei niedrigen Temperaturen. Daraus ergibt sich eine hohe Glühzündungsneigung [11a].

	Einheit	Benzin bleifrei super	Methanol	M30	M50	M85
Dichte	kg/m ³	750	795	760	771	791
Heizwert	MJ/kg	43,5	19,7	36,5	29,8	20,7
Stöchiometrischer Luftbedarf	kgLuft/kgBr	14,7	6,46	12,66	10,14	7,26
Gemischheizwert	MJ/m ³	3,75	3,44	3,69	3,58	3,49
Klopffestigkeit	ROZ	98	115	101	107	>110
Siedetemperatur	°C	30...180	65	30...160	30...140	30...120
Verdampfungswärme	kJ/kg	420	1119	560	770	1014
C:H-Verhältnis	-	6,87	3,0	6,09	5,09	3,7

Tabelle 3.1: Eigenschaften von Methanolkraftstoffen [11a]

3.6 Gemischbildung

Gemischbildungssysteme haben die Aufgabe, ein zündfähiges Gemisch bereitzustellen, das möglichst vollständig verbrannt wird. Bei der Gemischbildung ist Folgendes zu erfüllen:

- Bildung eines gasförmigen Luft-Kraftstoff-Gemisches
- genaue Dosierung des Kraftstoffes für das gewünschte Luft-Kraftstoffverhältnis
- Zumessung der Gemischmenge durch Drosselorgane zur Einstellung der Leistung (nur bei äußerer Gemischbildung)
- Führung von Gemisch, Luft und Abgas in der Weise, dass sich die Verbrennung nur in einem Teil des Brennraumes abspielt (nur Direkteinspritzung im Schichtladebetrieb)

Drei wichtige Hauptvorgänge bei der Bildung eines gasförmigen Luft-Kraftstoff-Gemisches:

- Gemischaufbereitung (Zerstäubung, Verdampfung, Vermischung)
- Gemischdosierung (Einstellung der gewünschten Gemischqualität)
- Gemischtransport [11b]

3.6.1 Äußere Gemischbildung durch Vergaser

Als System der Gemischaufbereitung wurden früher fast ausschließlich Vergaser benutzt. Dies war bis Anfang der 1980er-Jahre am üblichsten. Der Prüfmotor ASTM-CFR D2699/D2700 wurde in dieser Zeit gebaut. In diesem Motor wird ein Vergaser als Gemischbilder genutzt (siehe Kapitel 5).

Der Vergaser hat die Aufgabe, der Verbrennungsluft den Kraftstoff in einem bestimmten Verhältnis mit möglichst großer Oberfläche (in Form möglichst feiner Tropfen oder als Dampf) beizumischen.

Damit eine gute Gemischaufbereitung als Grundlage für eine vollständige schnelle Verbrennung gewährleistet ist, muss

- eine feine Zerstäubung erfolgen

- das richtige Luftverhältnis für jede Last und Drehzahl zur richtigen Zeit eingestellt sein
- die richtige Gemischmenge für jede Last und Drehzahl bereitgestellt werden

Der Vergaser verwendet als Regelgröße den Unterdruck an einer bestimmten Stelle des Saugrohres. Die Kraftstoffzuteilung erfolgt mithilfe einer Venturi-Düse, in der eine mengenabhängige Druckabsenkung erzeugt wird. Durch diesen im Lufttrichter erzeugte Unterdruck wird der Kraftstoff aus dem Schwimmergehäuse angesaugt und in der vorbeiströmenden Luft zerstäubt. Die Menge ergibt sich aus dem Unterdruck und aus dem Durchmesser der Brennstoffdüse [12a].

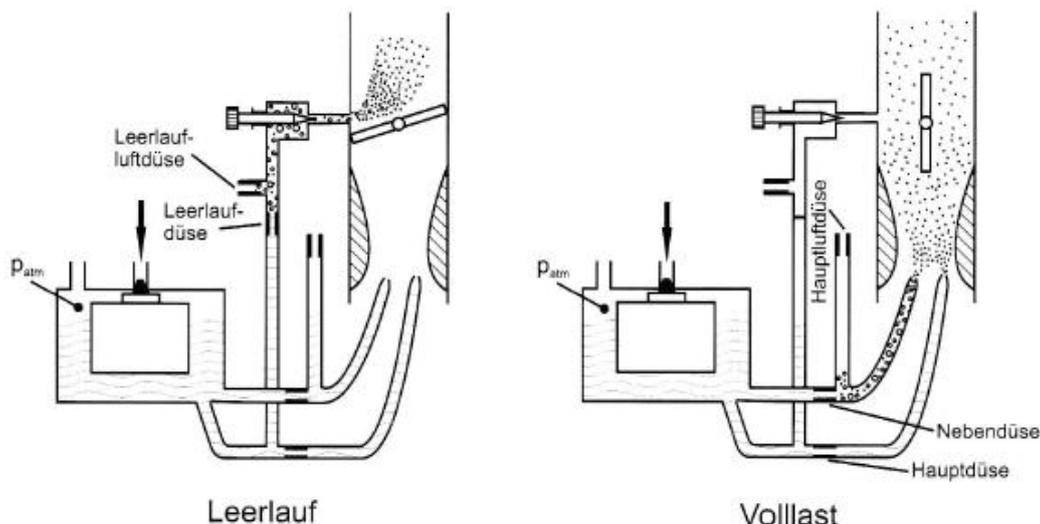


Abbildung 3.3: Prinzipbild eines Vergasers [12a]

3.6.2 Äußere Gemischbildung durch Einspritzung

Die Saugrohreinspritzung erfolgt in das Ausgangrohr oder in den Einlasskanal außerhalb des Zylinders. Es gibt zwei Arten von Einspritzung als Ersatz für den Vergaser: Die erste ist das zentrale Einspritzungsventil (SPI - single point injection), und die zweite ist das Einspritzventil, das bei jedem Zylinder zugeordnet ist (MPI - multi point injection).

Vorteil gegenüber einem Vergaser:

- höhere Leistung, da die Drosselung entfällt,
- bessere Abgasqualität,
- besseres Warmlauf- und Übergangsverhalten.

Das Arbeitsprinzip der Einspritzanlage: In jedem Betriebspunkt muss der Massenstrom der Ansaugluft ermittelt und darauf der Massenstrom des Kraftstoffes angepasst werden [12a].

3.6.3 Innere Gemischbildung durch Einspritzung

Im Gegensatz zur konventionellen Saugrohreinspritzung, die in fast allen Betriebsbereichen mit homogenen stöchiometrischen Gemisch betrieben wird (Ausnahmen: Vollast, Kaltstart), wird der Ottomotor mit Direkteinspritzung je nach Last mit unterschiedlichen Gemischstrategien betrieben. Das Ziel der Schichtladung ist die Konzentration von gut aufbereitetem Luft-Kraftstoff-Gemisch im Bereich der Zündkerze zum Zündzeitpunkt mit sehr viel geringer, sodass bei einem über den gesamten Brennraum ermittelten mageren Gemisch gute Bedingungen für die Verbrennung bestehen.

Vorteil gegenüber einem Vergaser:

- die Drosselklappe bleibt vollständig geöffnet,
- die Strömungsverluste sinken,
- der Wirkungsgrad steigt.

Die Gemischbildungsverfahren lassen sich wie folgt klassifizieren:

- strahlgeführt
- wandgeführt
- luftgeführt [12b].

4. Emissionen

Ein Kraftstoff, der nur aus Kohlenstoff und Wasserstoff besteht, wird vollständig verbrennt, so entstehen lediglich die unschädlichen Komponenten CO_2 und H_2O . Bei der unvollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen im Motor entstehen weitere Komponenten wie CO , HC , NO_x . Die Zusammensetzung des Abgases eines Ottomotors, der bei $\lambda = 1$ betrieben wird, wird in Abbildung 4.1 gezeigt, um einen Einblick über die Anteile der einzelnen Komponenten zu geben [12c].

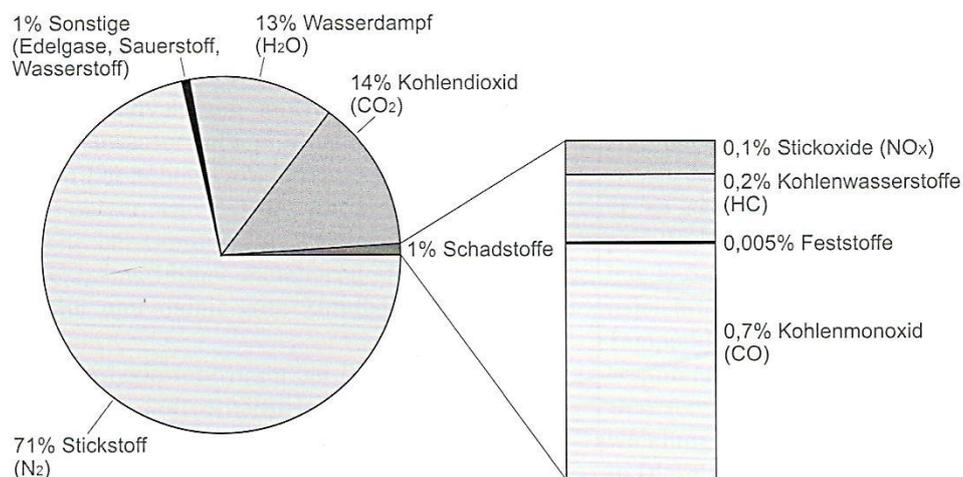


Abbildung 4.1: Abgaszusammensetzung eines Ottomotors bei $\lambda = 1$ [12c]

Die Zusammensetzung des Abgases ist in erster Linie vom Luftverhältnis λ abhängig. Abbildung 4.2 zeigt die λ -Abhängigkeit der Mengenanteile der Schadstoffkomponenten für einen Ottomotor. Der CO -Anteil ist bei magerem Gemisch ($\lambda > 1$) sehr niedrig und steigt mit fetter werdendem Gemisch ($\lambda < 1$) stark an. Der HC -Anteil besitzt im Bereich von $\lambda = 1,15 \dots 1,25$ ein Minimum, der NO_x -Anteil zeigt bei $\lambda \approx 1,1$ ein ausgeprägtes Maximum, fällt aber bei fettem und magerem Gemisch stark ab [12c].

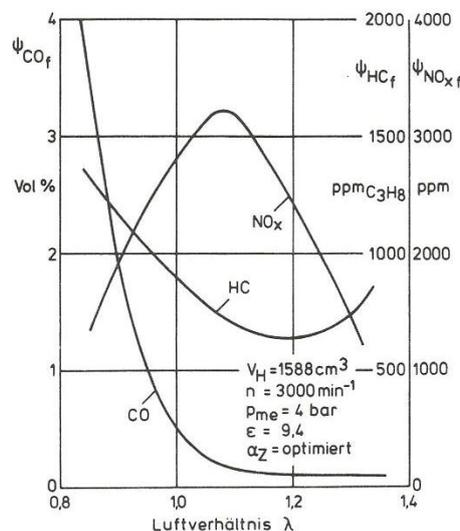


Abbildung 4.2: Schadstoffkomponenten beim Ottomotor [12c]

5. ASTM-CFR Sonderottomotor

5.1 Prüfmotor



Abbildung 5.1: ASTM-CFR Sonderottomotor

Das CFR-Komitee (Cooperative Fuel Research) wurde in den 1920er-Jahren gegründet, als die zunehmende Beliebtheit des personalisierten Transports dazu führte, dass Motorenhersteller und Kraftstoffhersteller die Klopfbeständigkeit von Kraftstoffen quantifizieren mussten. 1970 wurde ein von der Waukesha Motor Company entworfener Einzylinder-Forschungsmotor als standardisierte Plattform für die Klopf- und Oktanforschung ausgewählt. Der CFR-Motor wird bis heute als Industriestandard eingesetzt [13].

Der CFR-Forschungsmotor ist ein standardisierter Einzylinder-Viertakt-Ottomotor mit Zweiventiltechnik und seitlicher Zündkerzenlage. Er zeichnet sich vor allem durch das im Betrieb veränderliche Verdichtungsverhältnis aus. Das Klopfen des Motors wird durch Einstellen des Verdichtungsverhältnisses im Bereich von 4:1 bis 18:1 unter Verwendung einer Kurbelwelle und eines Schneckenradantriebs in der Zylinderklemmhülse ausgelöst [14a].

Der Motor ist mit einem Vergaser mit einem einzigen vertikalen Strahl und einer Kraftstoffdurchflussregelung ausgerüstet, um die Einstellung des A/F-Verhältnisses zu ermöglichen. Der Versuchsaufbau ist mit einem Mehrfachkraftstofftanksystem mit Auswahlventilen ausgestattet, um Kraftstoff durch einen einzelnen Strahlkanal und ein Vergaser-Venturi zu fördern. Das Luftansaugsystem ist mit einer Steuerung für Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Luftvorwärmung) ausgestattet. Zur Kühlung des Motors wird ein Verdampfungskühlsystem verwendet, das mit einer biegsamen Rückleitung für das Kühlmittel und einer wassergekühlten Kondensatorschlange oberhalb des Kühlmittelniveaus ausgerüstet ist [14b].

Zur Beurteilung des Ottokraftstoffes sind zwei Prüfmethode gebräuchlich. Die Research-Oktanzahl (ROZ) soll das Kraftstoffverhalten bei Beschleunigung des Motors aus niedrigen Drehzahlen charakterisieren, die Motor-Oktanzahl (MOZ) das Verhalten bei höheren Drehzahlen und Vollast. Wegen der höheren thermischen Kraftstoffbeanspruchung bei der Prüfung liegen die MOZ-Werte beim gleichen Kraftstoff etwas niedriger als die ROZ-Werte [15]. In Tabelle 5.1 und 5.2 sind die grundlegenden Spezifikationen bzw. Eigenschaften eines CFR-Motors aufgeführt.

5.2 Spezifikationen des Motors

Kurbelgehäuse	CFR - 48
Verdichtungsverhältnis ε	4 - 18
Normalbohrung D_z	82,55 mm
Hub s	114,3 mm
Hubvolumen V_H	611,74 cm ³
Ventilsitzring $D_{i,min}$	30,15 mm
Pleuellager	
• Durchmesser $D_{pl.lager}$	63,5 mm
• Länge $l_{pl.lager}$	36,1 mm
Vorderes Hauptlager	
• Durchmesser $D_{V.H.lager}$	76,2 mm
• Länge $l_{V.H.lager}$	49,35 mm
Hinteres Hauptlager	

• Durchmesser $D_{H.H.lager}$	76,2 mm
• Länge $l_{H.H.lager}$	81,76 mm
Kolbenbolzen, Schwimmend D_{kb}	31,75 mm
Pleuelstange	
• Länge zwischen den Bohrungen Pl_L	254 mm
• Breite Pl_B	41,15 mm
Steuergetriebe, Zahnradbreite Z_{breite}	25,4 mm
Zahl der Kolbenringe	5
Ventilkanäle $D_{i,min}$	31,75 mm
Gewichts des Motors m_{Motor}	399,20 Kg
Gewichts des gesamten Gerätes m_{ges}	1247,40 Kg

Tabelle 5.1: Spezifikationen des Motors [14a]

5.3 Eigenschaften des Motors

Zylindertyp	Gusseisen mit flacher Verbrennungsfläche und integriertem Kühlmittelmantel
Kolben	Gusseisen, mit flacher Verbrennungsfläche
Kolbenringe	oberer Ring Chromplattiert / unplattiert andere Ringe unplattiert Ölabstreifring Typ: WS-85
Ventilfunktion	Öffnen Sie die Kipphebelbaugruppe mit Gestänge für ein konstantes Ventilspiel, wenn sich der KR ändert
Einlass / Auslass Ventil	mit Stellitauflagen $D_{Ventilschaft} = 9,5mm$, $\alpha_{ventil} = 45^\circ$
Nockenwellenüberlappung	5°
Kraftstoffsystem	Einzelner vertikaler Strahlvergaser mit Kraftstoffdurchflussregelung zur Einstellung des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses
Lufttrichter Durchmesser	19,05 mm (9/16 inch)

Zündung	Elektronisch ausgelöste Kondensatorentladung durch Spulenzündkerze
Zündkerze	Typ: Champion D16 / UD16
Ansaugluftfeuchtigkeit	Kontrolliert innerhalb des angegebenen Grenzbereichs

Tabelle 5.2: Eigenschaft des Motors [14b]

Die die Klopfestigkeit charakterisierenden Kenngrößen (Oktanzahlen) werden gemäß den Normen ASTM D2699 (Research-Oktanzahl: ROZ) und D2700 (Motor-Oktanzahl: MOZ) an einem genormten ASTM-CFR-Prüfmotor durch sogenannte Eingabelung mit Gemischen aus Isooktan und n-Heptan bestimmt.

Zusammenfassung der Methode: Die ASTM-IP-Research / Motor-Octanzahl eines Kraftstoffs wird durch Vergleich seines Klopfverhaltens mit dem von Mischungen aus ASTM-Bezugskraftstoffen bekannter Octanzahl unter genormten Betriebsbedingungen bestimmt. Dieses wird durch Veränderung des Verdichtungsverhältnisses erreicht, um für die Probe die Standardklopfstärke zu erhalten, die mit einem elektronischen Klopfmessgerät gemessen wird. Wenn die Klopfmesseranzeige für die Probe zwischen den Klopfmesseranzeigen zweier Bezugsmischungen eingabelt wird, wird das Ergebnis der Probe durch Interpolation errechnet [16a/b].

Kalibrierte Octanzahl	Bewertungstoleranz	Zusammensetzung (Vol.-%)		
		Toluol	i-Octan	n-Heptan
85.0	± 0.3	66	0	34
93.4	± 0.3	74	0	26
96.7	± 0.2	74	5	21
99.6	± 0.3	74	10	16
103.3	± 0.4	74	15	11
108.0	± 0.8	74	20	6
113.7	± 0.9	74	26	0

Tabelle 5.3: Basis-Toluol-Einstellkraftstoffe [16c]

In Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 sind die grundlegenden Einstellungen des CFR-Motors D2699 (RON) und D2700 (MON) vorhanden.

5.4 RON - ASTM D2699

Motordrehzahl (U / min)	600 ± 6
Öldruck bei Betriebstemperatur (kPa)	172 bis 207
Luftfeuchtigkeit (kg wasser/ kg tr.Luft)	0.00356 bis 0.00712
Ansauglufttemperatur	52 ± 1°C (mit Ansaugluftvorwärmung)
Mischtemperatur	52°C
Öltemperatur	57 ± 8,5°C
Kühlmitteltemperatur	100 ± 1,5°C
A / F-Verhältnis	Auf maximales Klopfen eingestellt
Gemischbildung	Vergaser
Zündzeitpunkt	13° (v.OT)

Tabelle 5.4: RON - ASTM D2699 [16a]

5.5 MON - ASTM D2700

Motordrehzahl (U / min)	900 ± 9
Öldruck bei Betriebstemperatur (kPa)	172 bis 207
Luftfeuchtigkeit (kg wasser/ kg tr.Luft)	0.00356 bis 0.00712
Ansauglufttemperatur	38 ± 2,8°C
Mischtemperatur	149 ± 1,1°C (mit Gemischheizung)
Öltemperatur	57 ± 8,5°C
Kühlmitteltemperatur	100 ± 1,5°C
A / F-Verhältnis	Auf maximales Klopfen eingestellt
Gemischbildung	Vergaser
Zündzeitpunkt	14° - 26° (v.OT) (Mit Kompressionsverhältnis eingestellt)

Tabelle 5.5: MON - ASTM D2700 [16b]

5.6 Einstellung der Grundzylinderhöhe (RON)

Um das richtige Verhältnis zwischen Messuhr oder Zahlenwerkeinstellung und Verdichtungsverhältnis herzustellen, ist eine sorgfältige Kalibrierung des

Brennraumvolumens notwendig. Der Verdichtungsdruck und die 5/8 Zoll Innenlehre [17a] werden benutzt, um das Zylindergrundvolumen einzustellen und zu überprüfen.

1. Der Motor arbeitet bei normaler Betriebstemperatur (Tabelle 2/3/4 [17b]), dann muss ein CFR Kompressionsmessgerät installiert werden, das mit einem mit PTFE Flachdichtungen versehenen Rückschlagventil ausgestattet ist.

2. Der Motor arbeitet ohne Kraftstoff oder Zündung, dann muss die Zylinderhöhe so eingestellt werden, dass ein tatsächlicher Kompressionsdruck erzielt wird, wie er in Bild 21a [A.1] für den zur Zeit der Prüfung herrschenden Luftdruck vorgeschrieben ist. Wenn das Prüfgerät mit einem Luftdruckkompensator (Zählwerk) ausgerüstet ist, es wird die Zylinderhöhe für einen Luftdruck von 29,92 Zoll (101,3 kPa) unabhängig von dem herrschenden Luftdruck eingestellt.

3. Es wird die Einstellung der Zylinderhöhe geändert ohne nach 2 beschriebenen Einstellung, dann wird die Anzeige auf die folgenden Werte eingestellt [17a]:

Messuhr: 0,352

Zählwerk: 930

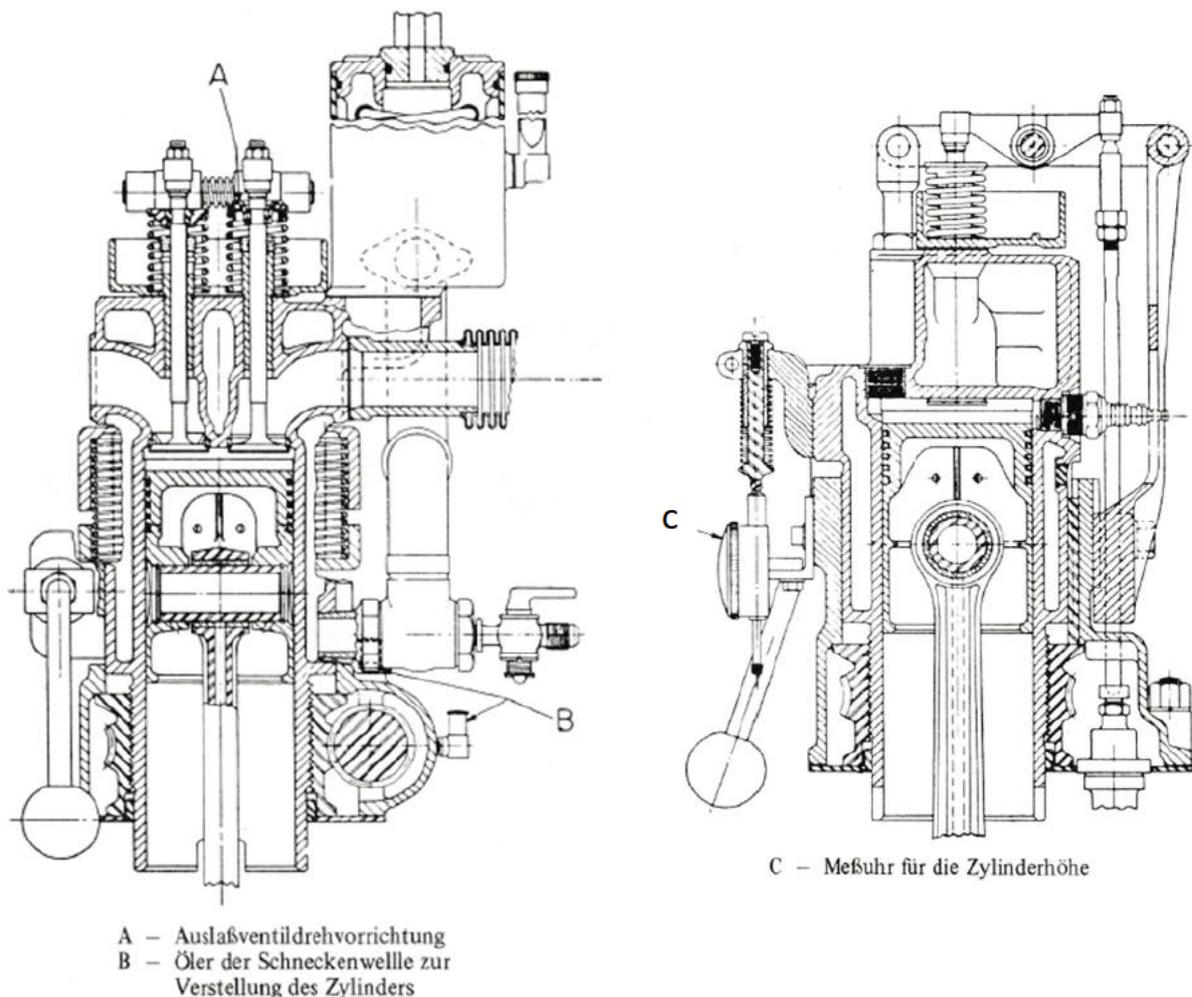


Abbildung 5.2: Querschnitt Zylindergruppe [17e]

5.7 Berechnung des Verdichtungsverhältnisses

Verdichtungsverhältnis ε hat einen entscheidenden Einfluss auf den idealen thermischen Wirkungsgrad η_{th} . Das wiederum hat Einfluss auf die Klopfneigung, das maximale Drehmoment, die maximale Leistung und die Schadstoffemissionen [8].

Wenn das Brennraumvolumen sorgfältig ermittelt worden ist und die Messuhr oder das Zählwerk, wie in den Schritten 1,2,3 beschrieben, genau eingestellt worden ist, kann das Verdichtungsverhältnis mit Hilfe der folgenden Gleichung errechnet werden:

$$\varepsilon = \frac{4,50}{0,30+m} + 1 \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{6345}{1850-d} + 1 \quad (5.2)$$

ε = Verdichtungsverhältnis

m = Messuhrablesung

d = Zählwerkablesung

Werte für die Umrechnung von Messuhr- oder Zählwerkablesungen in Verdichtungsverhältnisse sind in den Tabellen 51 oder 52 [17c] enthalten. Werte für die Umrechnungen von Zählwerk- in Messuhrablesungen sind in Tabelle 53 [17c] enthalten [17a].

5.8 Einstellung des Kraftstoff-Luft-Verhältnis

Vergaser: Der Motor ist mit einem Vergaser mit vier Kraftstoffbehältern und einstellbarem Kraftstoffniveau ausgerüstet. Für jedes Schwimmergehäuse ist eine Hauptdüse vorhanden. Im Luftstrom befindet sich eine horizontal angeordnete Zerstäuberdüse. Um das Kraftstoff-Luft-Verhältnis zu verändern, kann das Kraftstoffniveau für jedes Schwimmergehäuse getrennt eingestellt werden, wobei das Kraftstoffniveau für ein gegebenes Kraftstoff-Luft-Verhältnis von der Größe der Hauptdüse abhängt [17d].

Alle Messungen werden bei dem Kraftstoff-Luft-Verhältnis durchgeführt, das die maximale Klopfmesseranzeige ergibt. Dieses gilt für die Probe und die beiden Bezugskraftstoffmischungen, die zur Eingabelung der Probe verwendet werden. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Kraftstoffzerstäubung wird bei den Prüfmethode gefordert, dass sich das Kraftstoffniveau für maximales Klopfen zwischen 0,7 und 1,7 am Schauglas befindet. Das maximale Klopfen wird nach der Methode bestimmt, die in Abschnitt 11.2 der Research, Motor und Motor (LP) Methoden beschrieben ist [17a]. In diesem

Versuch werden die Kraftstoffe mit hohen Klopfestigkeiten – wie Benzin mit Methanol oder Benzin mit Ethanol – untersucht.

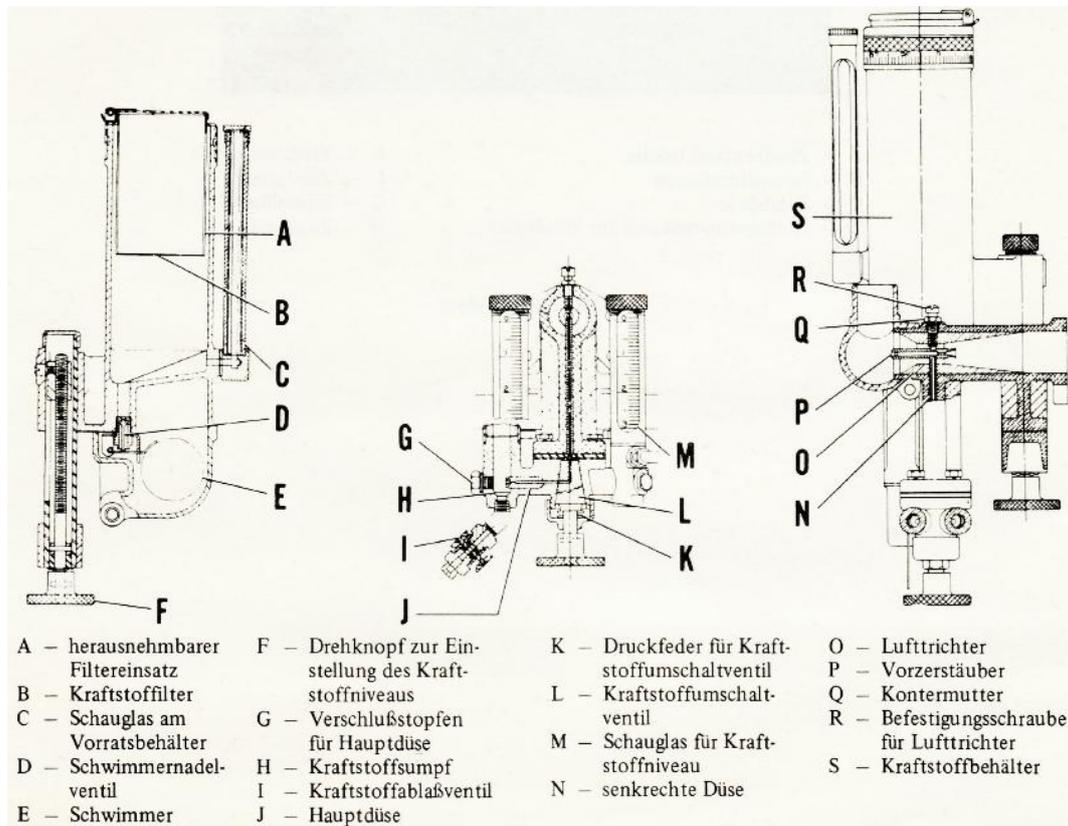


Abbildung 5.3: Schnittbilder des Vergasers [17f]

5.9 Zündung des Motors

Das Hauptsteuererelement der Verbrennung ist das Zündsignal. Es wird hier mechanisch in Abhängigkeit vom Betriebspunkt über Zündzeitpunktgeber gesteuert. Bei der Fremdzündung sind homogene Brennverfahren mit oder ohne Variabilitäten im Ventiltrieb (von Phase und Hub) möglich. Mit variablem Ventiltrieb wird eine Reduktion von Ladungswechselverlusten und Vorteile im Verdichtung- und Arbeitstakt erzielt [18].

Im Zündsystem wird die Kondensatorentladung mit Zündspule und Verteiler angewendet. Zwei Typen von Zündsystem sind im Gebrauch: das unterbrechlose System und das System mit Unterbrecher. Der Primärstrom wird von dem Zündgerät oder dem Netzgerät mit 4 μF -Kondensator geliefert. Eine Champion-D16 Zündkerze wird verwendet. Ein Zündfunkindikator mit Neonglimmlampe zeigt den Zündzeitpunkt an. Hier wird ein vereinheitlichtes Zündgerät zusammen mit einer speziellen Zündspule und einem Zündzeitpunktgeber verwendet. Der Zündzeitpunktgeber wird von dem vorderen Ende der Nockenwelle angetrieben und besitzt einen Metallflügel, der am Geber vorbeidreht und das Signal gibt, mit dem die Zündkerze durch das Zündgerät gezündet wird. Hier die einzige

notwendige Wartung besteht darin, die Lager der Zündzeitpunktgeberwelle zu schmieren und auf einwandfreie elektrische Kontakte zu achten [17d].

5.10 Starten / Abschalten des Motors

Starten: Durch Druck auf den Startknopf am Schaltpult wird der Prüfmotor gestartet. Wenn der Motor seine Drehzahl ungefähr erreicht hat, wird die Zündung eingeschaltet. Dann wird das Kraftstoffumschaltventil auf den Kraftstofftank mit dem zuvor eingefüllten Warmlaufkraftstoff gedreht. Falls der Motor nicht innerhalb 30 Sekunden zündet oder falls der Öldruck niedriger als 24 psi (1,7 bar) ist, wird das Kraftstoffumschaltventil in eine Aus-Stellung gedreht und der Motor wird abgeschaltet.

Abschalten: Zur Stillsetzung des Motors in einer Notsituation wird entweder die Notausschalter betätigt oder werden die Zündschalter und die Stoppschalter am Schaltpult betätigt. Für ein normales Stillsetzen wird das Kraftstoffumschaltventil am Vergaser in eine geschlossene Stellung gedreht, um die Kraftstoffzufuhr zum Motor abzusperren. Dann wird die Stoppschalter betätigt [17a].

6. Messtechnik und Addaption

In diesem Kapitel wird erläutert, wie der Motor mit Zylinderdruckmesstechnik und Kurbelwinkelmarker ausgestattet werden soll. Die Messzündkerze Kistler 6117A17 mit dem integrierten Zylinderdrucksensor und der Zündkerzenadapter wurden in der Zündstelle eingebaut. Der Winkelmarkergeber AVL 360C/600 wurde an der Abtriebswelle des CFR-Motors und mithilfe einer einstellbaren und vollständigen Halterung (Aluminiumblock) montiert. Die Konstruktionsteile des Winkelmarkergebers (Adapter und Alublock) wurden maßgenau gedreht, gebohrt und montiert. Das Netzteil des Kurbelwinkelmarkers wurde zusammengebaut, geprüft und in Betrieb genommen.

6.1 Winkelmarkergeber AVL 360C/600

Die Erfassung der Winkelmarker und einer Triggermarke erfolgt optisch nach dem Lichtschrankenprinzip. Im Geber befinden sich zwei Infrarotsender mit gegenüberliegend angeordneten Empfängern; dazwischen dreht sich die Geberscheibe. Die verwendete Scheibe besitzt zwei Spuren, wobei auf der äußeren Spur 600 Hell-Dunkel-Marken vorhanden sind, auf der inneren Spur jedoch nur 1 Hell-Dunkel-Marke, die zur Triggermarkierung dient.

Vor den Infrarot-Empfängern ist eine Blende zur Erzielung eines größeren Kontrastverhältnisses angebracht. Die Lichtimpulse werden über geregelte Verstärker und Komparatoren in elektrische Impulse mit TTL-Pegel umgesetzt. Der Geber ist bei einem normal entstörten Motor gegen Zündstörungen unempfindlich. Als Schutz gegen Vibrationen sind die elektrischen Bauteile des Gebers in Kunststoff eingegossen.

Um die erwünschte Auflösung von $0,1^\circ$ zu erreichen, wird eine elektronische Vervielfachung benötigt. Aus 600 Impulsen pro Umdrehung werden mittels eines Phasenregelkreises 1800 symmetrische Ausgangsimpulse gewonnen. Dies entspricht 3600 Nulldurchgängen. Die Vervielfachung kann mittels Kodierstecker auf der Leiterplatte abgeschaltet werden. Die elektronischen Komponenten sind über eine 2m lange Glasfaserleitung vom Sensor (Kurbelwelle) getrennt, um Einflüsse wie elektrische Einstreuungen, hohe Temperatur und starke Vibration fernzuhalten [19].



Abbildung 6.1: Winkelmarkergeber AVL 360C/600 [19]

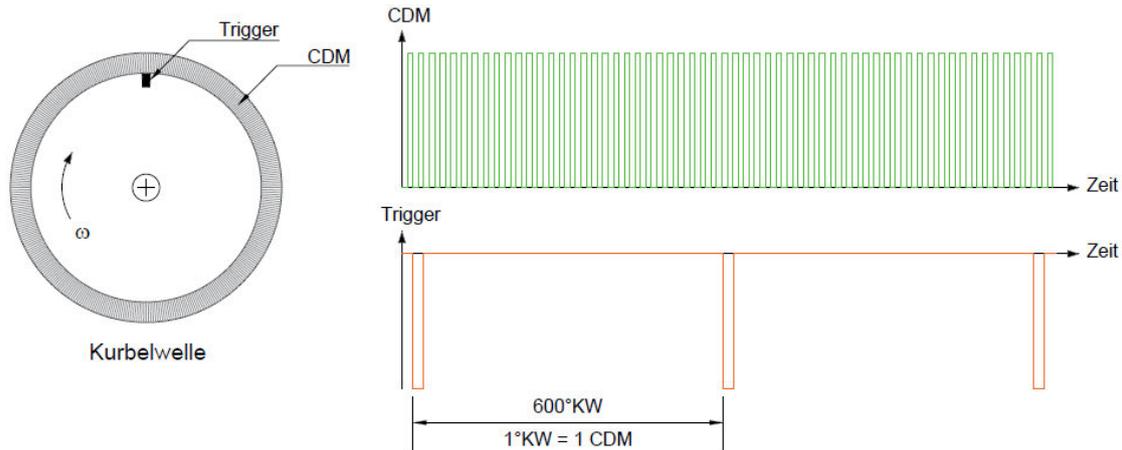


Abbildung 6.2: CDM- und Triggersignal

6.2 Zylinderdrucksensor Kistler 6117A17

Wegen der hohen geforderten Dynamik arbeiten Zylinderdrucksensoren i.d.R. auf Basis des piezoelektrischen Effektes. Bei einem piezoelektrischen Sensor wird mittels Druck durch Ladungstrennung eine elektrische Spannung in einem Kristall erzeugt. Dies nennt man den piezoelektrischen Effekt. Durch Druck verschieben sich im Inneren des Kristalls Ionen, wodurch sich an der Oberfläche elektrische Ladung proportional zur Kraft bildet. Die Ladung wird durch einen Ladungsverstärker in eine proportionale elektrische Spannung umgeformt. Die unmittelbare Messung der Spannung ist nicht möglich, da die geringe erzeugte Ladung sehr gut isoliert sein muss und keine elektrische Kapazitätsänderung erfahren darf. Jeder beliebige Druck kann durch Ableitung (Kurzschluss) der Ladung als Nullpunkt des Ladungsverstärkers eingestellt werden, dadurch werden Druckänderungen direkt messbar [20].

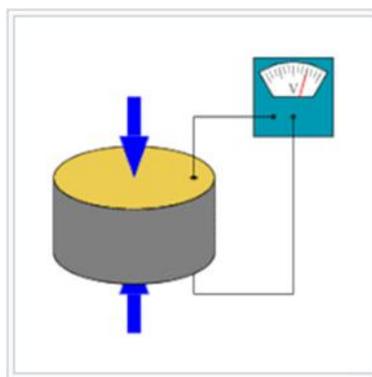


Abbildung 6.3: Funktion von piezoelektrischen Sensor [20]

Der Drucksensor Kistler 6117A17 wurde in den Zündkerzenadapter eingebaut. Das Signal des Drucksensors war sehr schwach und lag im Millivolt-Bereich (mV-Bereich). Es wurde mit einem Ladungsverstärker (Kistler Typ 5001) verstärkt und für die weitere Bearbeitung an den Eingang ADC_C17 von dSpace angeschlossen.



Abbildung 6.4: Drucksensor Kistler 6117A17

6.3 Indiziersystem

„Indizierung“ ist die Bezeichnung für die Messung und Darstellung des Zylinderdruckverlaufs über die Zeit oder der Kurbelwinkelstellung. Wegen der großen Bedeutung des Zylinderdrucks für das thermodynamische Verständnis der motorischen Verbrennung hat die Druckindizierung einen zentralen Stellenwert in der Verbrennungsentwicklung und wird weit über die reine Druckverlaufanalyse hinaus eingesetzt [21].

Die Vorgänge im Brennraum laufen sehr schnell ab. Schnelllaufende Viertaktmotoren im Pkw-Bereich haben maximale Drehzahlen von 6000 1/min und mehr [22]. Die Zeit kann relativ für Einspritzung, Gemischbildung und Verbrennung abgeschätzt werden:

$$t_{ASP} = \frac{1}{i * n}$$

$$n = 600 \frac{1}{min} ; i = \frac{1}{2}$$

$$t_{ASP} = \frac{2 * 60s}{600} = 0,2 s = 200 ms$$

Ein Grad Kurbelwinkel entspricht dann 0,28 ms. Mit wenigstens dieser Auflösung muss ein Indiziersystem messen können.

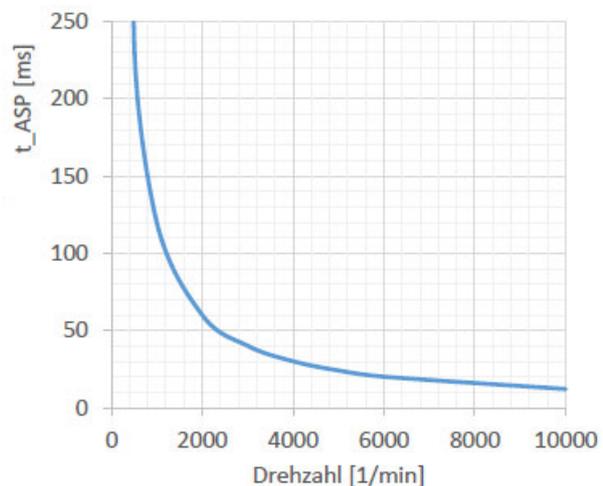


Abbildung 6.5: Drehzahl über Arbeitsspielzeit [22]

7. MATLAB/Simulink und dSPACE

Um die Druckverläufe über der Kurbelwinkeleinstellung in Echtzeit grafisch darzustellen und zu analysieren, benötigen wir das dSpace-Hard- und Software-System und das MATLAB/Simulink-Programm. Hier werden Drucksensor, CDM-Signal und Triggersignal an der jeweiligen Stelle am dSpace-System angeschlossen.

7.1 Inbetriebnahme der dSPACE-AutoBox

Um die AutoBox DS1103 in Betrieb zu nehmen, sind neben dem Gerät selbst eine Express-Card (DS821 Link Board) als Schnittstelle zum PC, die jeweiligen Software-Lizenzen mit Lizenz-Dongle sowie eine kompatible MATLAB/Simulink-Version und die dSpace-Installationssoftware notwendig (siehe Anhang [A.2]). Bei der Wahl der MATLAB/Simulink-Version muss darauf geachtet werden, dass diese mit der Version der dSpace-Software kompatibel ist. Um dies zu überprüfen, soll auf die Website des Herstellers verwiesen werden. Die Installation der dSpace-Software beinhaltet u. a. das Programmpaket „RCP and HIL Software“ sowie „Control Desk Next Generation“.

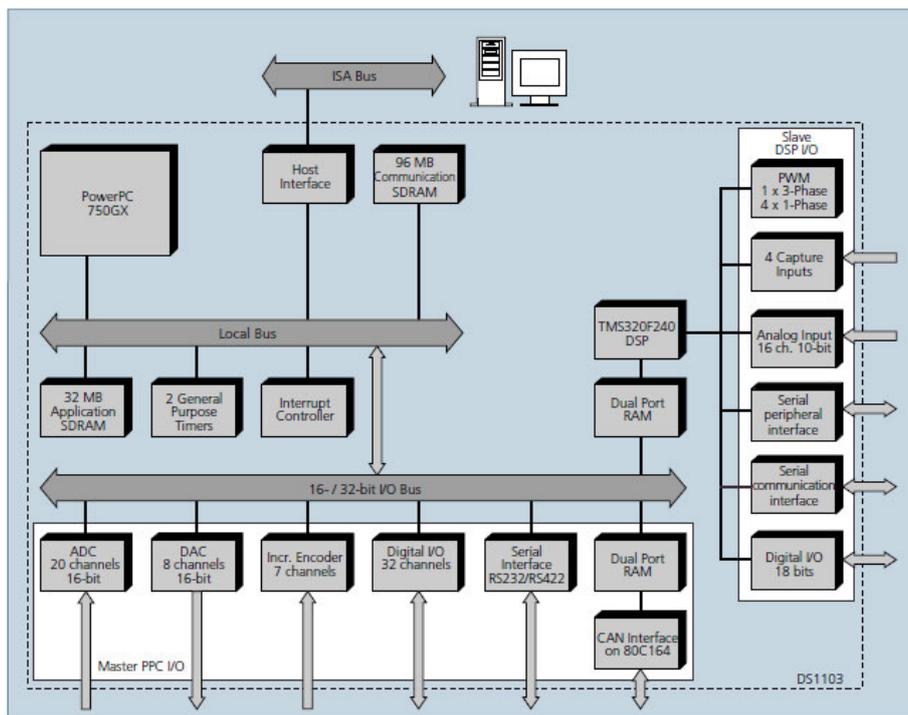


Abbildung 7.1: Blockdiagramm DS1103 [23]

7.1.1 DS1103 PPC Controller Board

Die Datenaufzeichnung und Auswertung des Prüfmotors erfolgt über das Single-Board. Dieses ist mit einem Power-PC-750GX-Prozessor mit einer Taktfrequenz von 1 GHz bestückt und als Singleprozessorsystem konfiguriert. Das Board ist mit einem 32 MB großen Arbeitsspeicher ausgestattet [23].



Abbildung 7.2: DS1103 PPC Controller Board [23]

7.1.2 Eigenschaften von DS1103

- Single-board system mit umfassenden E/A
- PowerPC 750GX Betrieb mit 1 GHz für Rapid Control Prototyping
- Anwendungsspeicher 32 MB
- CAN-Schnittstelle und serielle Schnittstellen
- Schnittstellen zum Anschluss von Inkrementalgebern
- Hohe E/A-Geschwindigkeit und Genauigkeit
- PWM-synchroner oder extern getriggelter E/A Stroboskop
- PLL-gesteuerter UART für genaue Baudratenauswahl [23]

7.1.3 Umfassende Schnittstellen

Die große Zahl von E/A-Schnittstellen macht die AutoBox DS1103 zu einem vielseitigen Controller-Board für zahlreiche Anwendungen. Es bietet eine breite Auswahl an Schnittstellen, darunter 50 Bit-I/O-Kanäle, 36 A/D-Kanäle und 8 D/A-Kanäle. Für zusätzliche I/O-Aufgaben wird eine DSP-Controller-Einheit, die um den TM320F240-DSP von Texas Instruments herum aufgebaut ist, als Subsystem eingesetzt [23].

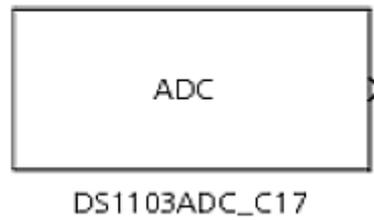
7.1.4 Aufzeichnung und Ausgabe von E/A-Werten

Die Steuerung elektrischer Antriebe erfordert eine genaue Erfassung und Ausgabe von E/A-Werten. Es besteht die Möglichkeit, die A/D-Kanäle und D/A-Kanäle sowie die Position der Inkrementalgeber-Schnittstelle mit einem internen PWM-Signal oder einem externen Triggersignal zu synchronisieren [23].

7.1.5 Analog/Digital-Umsetzer

Ein Analog-Digital-Umsetzer ist ein Bauelement oder Teil eines Bauelements zur Umsetzung analoger Eingangssignale in einen digitalen Datenstrom, der dann weiterverarbeitet oder

gespeichert werden kann. Weitere Namen und Abkürzungen sind ADU, Analog-Digital-Wandler oder A/D-Wandler, englisch ADC (analog-to-digital converter) oder kurz A/D [24].



Input Voltage Range	Simulink Output
-10 V ... +10 V	-1 ... +1 (double)

Abbildung 7.3: DS1103ADC_Cx-Block [25]

Es werden das Drucksensorsignal in Eingang ADC_C17 an Pin 23 (Connector P1B) und die Masse (GND) an Pin 22 (Connector P1B) angeschlossen (gelötet) und mit Faktor 10 multipliziert, da der Eingangsspannungsbereich von dSpace [-10V / +10V] intern auf einen Bereich von [-1 / +1] abgebildet wird (Abbildung 7.3). Umgekehrt müssen die an den Ausgängen angelegten Signale mit Faktor 0,1 (DAC) korrigiert werden.

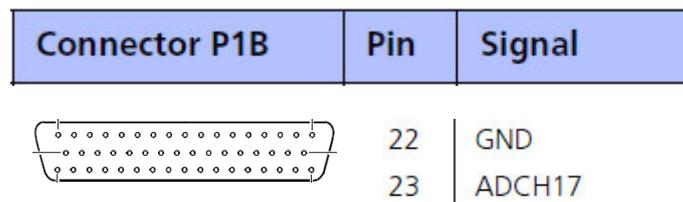


Abbildung 7.4: Pin 22/23 Connector P1B [25]

7.1.6 Frequenz Messung

Die Frequency Generation Unit und die Frequency Measurement Unit ermöglichen die Erzeugung von Rechtecksignalen mit variabler Frequenz sowie die Messung der Frequenz von Rechtecksignalen.

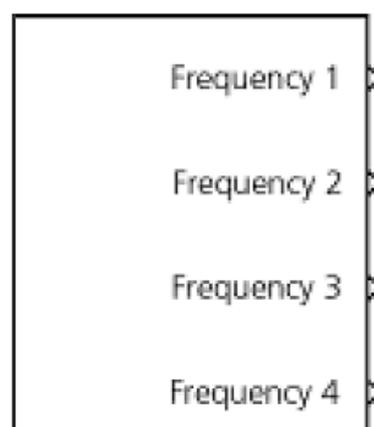


Abbildung 7.5: DS1103SL_DSP_F2D-Block [25]

Es werden die CDM-Signale vom Kurbelwinkelmarker (Rechtecksignale) in Eingang Frequency1 (SCAP1) an Pin 30 (Connector P2B) und die Masse (GND) an Pin 1 (Connector P2B) angeschlossen (gelötet).

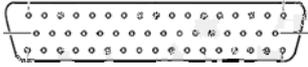
Connector P2B	Pin	Signal
	1	GND
	30	SCAP1

Abbildung 7.6: Pin 1/30 Connector P2B [25]

7.1.7 Trigger Messung

Das Trigger Measurement ermöglicht die Messung von Triggern mit steigenden, fallenden oder sowohl steigenden als auch fallenden Frequenzen als Impulsen.

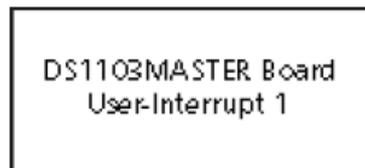


Abbildung 7.7: DS1103MASTER_HWINT_1x-Block [25]

Es werden das Triggersignal vom Kurbelwinkelmarker (Rechtecksignale) in Eingang HWINT_I1 (INT0) an Pin 16 (Connector P2B) und die Masse (GND) an Pin 32 (Connector P2B) angeschlossen (gelötet).

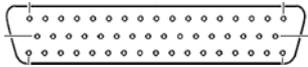
Connector P2B	Pin	Signal
	16	INT0
	32	GND

Abbildung 7.8: Pin 16/32 Connector P2B [25]

Eine detaillierte Beschreibung der technischen Daten des Controller Board DS1103 PPC bzw. der Anschlussbelegung mit allen verwendeten Pins findet sich in Anhang [A.3].

7.2 MATLAB/Simulink-Modell und dSPACE

MATLAB/Simulink ist ein Programmiersystem, welches die Modellierung, Simulation und Analyse von dynamischen Systemen erlaubt. Auf einer speziell dafür entworfenen Oberfläche und mit einer bereits sehr umfangreichen Standardbibliothek lassen sich Modelle schnell und einfach entwickeln sowie deren Funktion darstellen und simulieren. Über dieses Fenster wird die Modell-Bibliothek von Simulink und RTlib1103 erreichbar. Für den Aufbau

einer Simulationsstruktur, die aus Elementen dieser Bibliothek bestehen soll, muss der Benutzer über den New-Schalter im MATLAB-Rahmen ein neues Fenster für den Arbeitsbereich erzeugen. Die Elemente werden dann per Mausklick in den Arbeitsbereich gezogen.

Die Verbindung zwischen dem MATLAB/Simulink-Modell und der dSpace-Hardware wird mit der dSpace-Software hergestellt. Der Zugriff auf die E/A-Einheiten des Echtzeitrechnersystems erfolgt über das dSpace-Real-Time-Interface (RTI). Die Zusatzkomponente Real-Time Workshop (RTW) übernimmt die automatische Generierung und Ausführung des Stand-Alone-C-Codes auf der Echtzeit-Hardware. Nach dem Start von MATLAB wird zunächst gefragt, für welche Entwicklungsplattform das Simulink-Blockset konfiguriert werden soll. Hier wird die AutoBox für RTI1103 gewählt, da die Simulink-Library um die dSpace-Blocksets rtilib1103 erweitert wird (Abbildung 7.9).



Abbildung 7.9: Plattform RTI1103

7.2.1 Erzeugung von RTI

Mit dem Real-Time Interface (RTI) werden Simulink-Modelle einfach auf dem Controller-Board ausgeführt. Es können alle E/A grafisch durch das Ziehen von RTI-Blöcken konfiguriert werden. Die Implementierungszeit wird auf ein Minimum reduziert. Mithilfe von schnellen digitalen I/O-Karten sowie A/D-Wandlernkarten (dSpace) werden die Ein- und Ausgänge des Steuergeräts mit dem Simulationssystem verbunden. Zu den digitalen und analogen Eingangssignalen gehören z. B. die Drehzahl und der Druck des Klopfmotors.

Nach langen Recherchen und Überlegungen über Indizierung der Druckverläufe im Ottomotor wurde ein neues Simulink-Modell mithilfe eines alten von Herrn Prof. Victor Gheorghiu erstellten Programms für Kolbenverdichter erstellt, entwickelt und optimiert.

Es werden im Simulink-Modell (Abbildung 7.11 [A.4]) ein „DS1103MASTER_HWINT_Ix“-Block für das Triggersignal, ein „DS1103SL_DSP_F2D“-Block für das CDM-Signal und ein „DS1103ADC_Cx“-Block für das Drucksignal gewählt und per Drag-and-drop hinzugefügt. Das Drucksignal wird an Channel 17 angeschlossen. Dazu werden ein Gainblock, ein

Constantblock, ein Sumblock und ein Terminatorblock hinzugefügt, eingestellt und miteinander verbunden. Das CDM-Signal wird an Frequency1 angeschlossen. Dazu werden zwei Gainblocks, ein Quantizer und ein Terminatorblock hinzugefügt, eingestellt und miteinander verbunden. Das Triggersignal wird an Eingang HWINT_I1 angeschlossen. Das Signal wird in einem Trigger-Generator und einer Rate Transition verarbeitet. Das verarbeitete Triggersignal und CDM-Signal werden an eine Kurbelwinkel-Blackbox angeschlossen. Dort wird der Rohwinkel der Kurbelwelle eingestellt. Es werden der KW-Block (Rohkurbelwinkel) und der Constantblock (offset) mithilfe eines Sumblocks addiert. Das addierte Signal wird mit einem Functionblock verbunden, um den Rohwinkel dem oberen Totpunkt (OT) zuzuordnen. Im letzten Schritt wird in einer Blackbox der Kolbenweg mit dem Kurbelwinkel errechnet (Zyl-Volumenblock).

Um optimale Ergebnisse zu erzielen, sollte das Simulink-Modell wie folgt erstellt werden:

1. Das MATLAB-Programm wird geöffnet [26].
2. In der Symbolleiste (Toolbar) wird Simulink aufgerufen, die Simulink-Bibliothek wird geöffnet.
3. Im MATLAB-Befehlsfenster wird „rti1103“ eingegeben, die RTI-Bibliothek wird geöffnet.

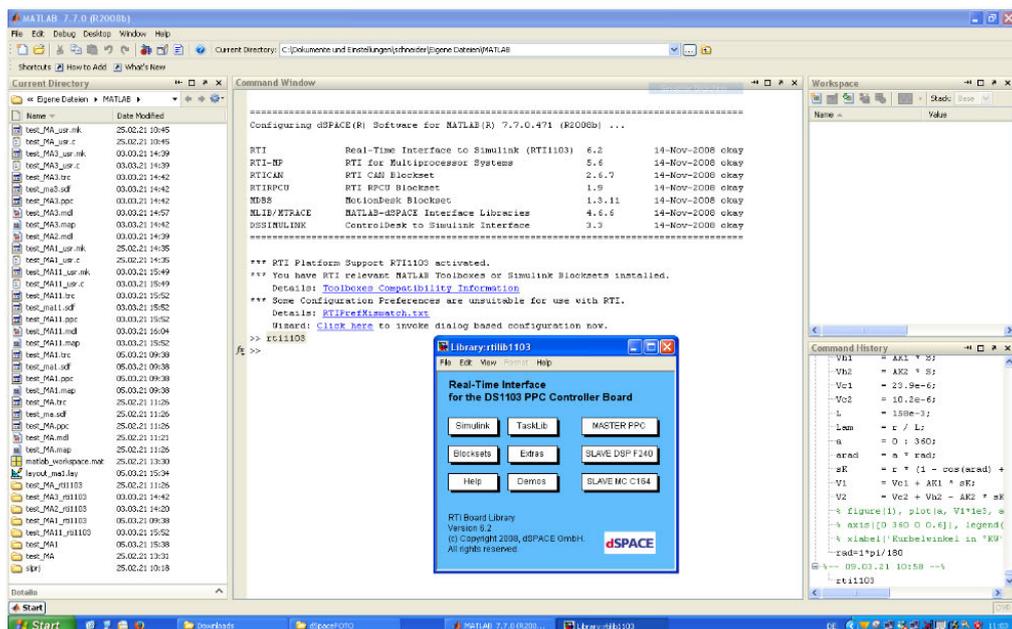


Abbildung 7.10: „rti1103“-Befehl im Command Window

4. Es wird in der Menüleiste auf (File → New → Model) geklickt. Ein neues Modell-Editor-Fenster wird geöffnet.
5. Simulink-Blöcke aus der Simulink-Bibliothek werden per Drag-and-drop zum Modell hinzugefügt.
6. RTI-Blöcke aus der RTI-Bibliothek werden per Drag-and-drop zum Modell hinzugefügt.
7. Die einzelnen Blöcke müssen anschließend miteinander verbunden werden.

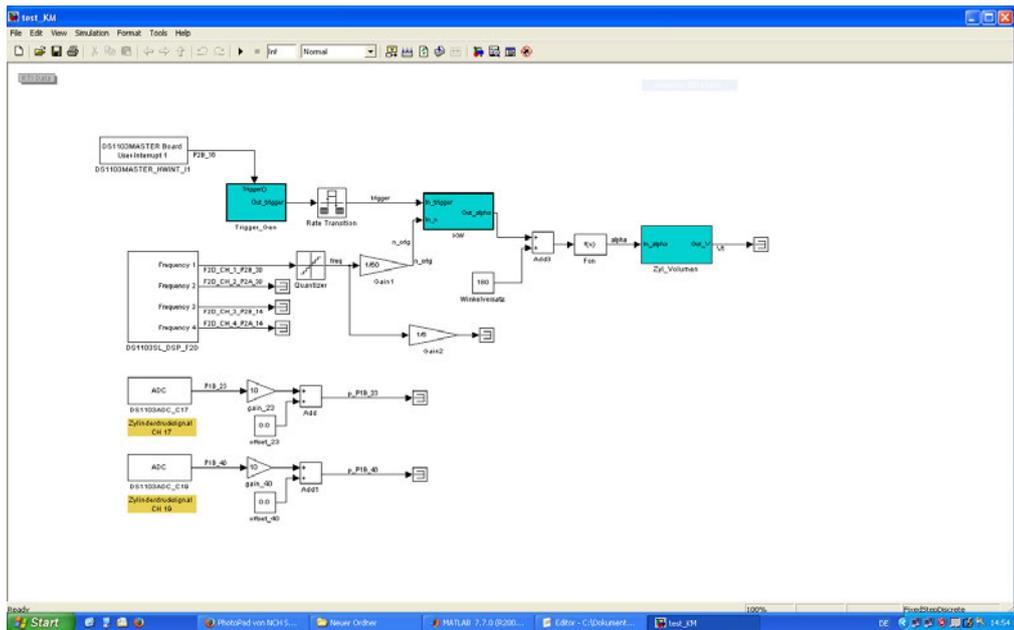


Abbildung 7.11: Modell in Simulink

8. Das Simulinkmodell wird als mdl-Datei gespeichert.
9. Es wird in der Menüleiste auf (Simulation → Configuration Parameters) geklickt oder auf der Kombinationstaste (Strg + E) gedrückt, um das Modell zu konfigurieren.

Configuration Parameters: **Solver**

Start time: **0.0**

Stop time: **Inf**

Type: **Fixed-step**

Solver: **Discrete (no continuous)**

Fixed-step-size: **1/3600**

Periodic sample time constraint: **Unconstrained**

Tasking mode for Periodic sample times: **Auto**

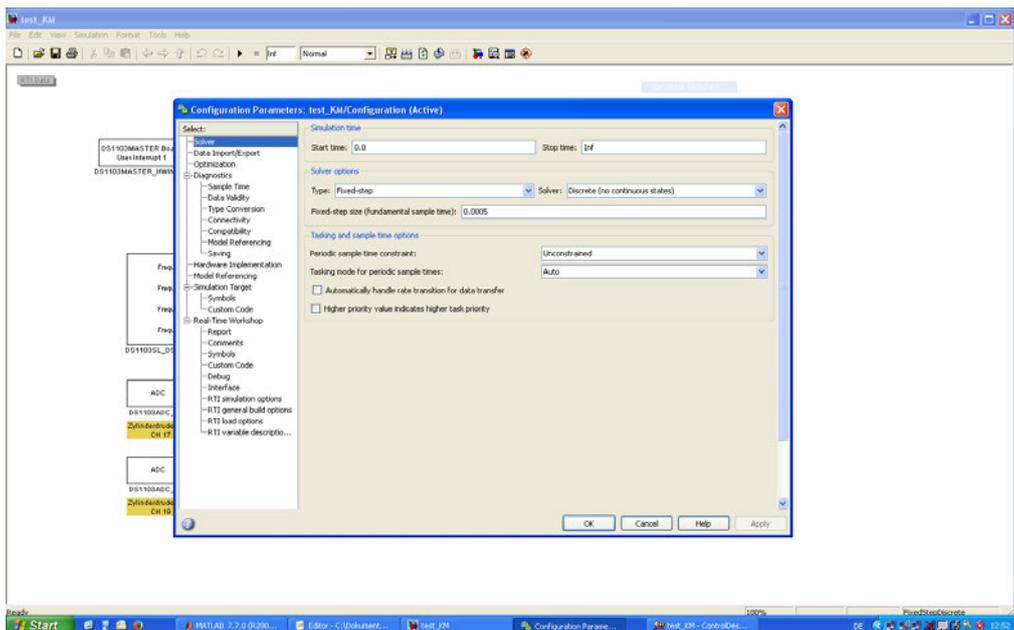


Abbildung 7.12: konfiguration des Modells

10. Es wird in der Menüleiste auf (Tools → Real-Time Workshop → Build Model) geklickt oder auf der Kombinationstaste (Strg + B) gedrückt, um „Build Model“ zu bauen.

Real-Time Workshop Settings:

System target file: rti1103.tlc

Language: C

Select checkbox for „Generate makefile“

Make command: make_rti

Template makefile: rti1103.tmf

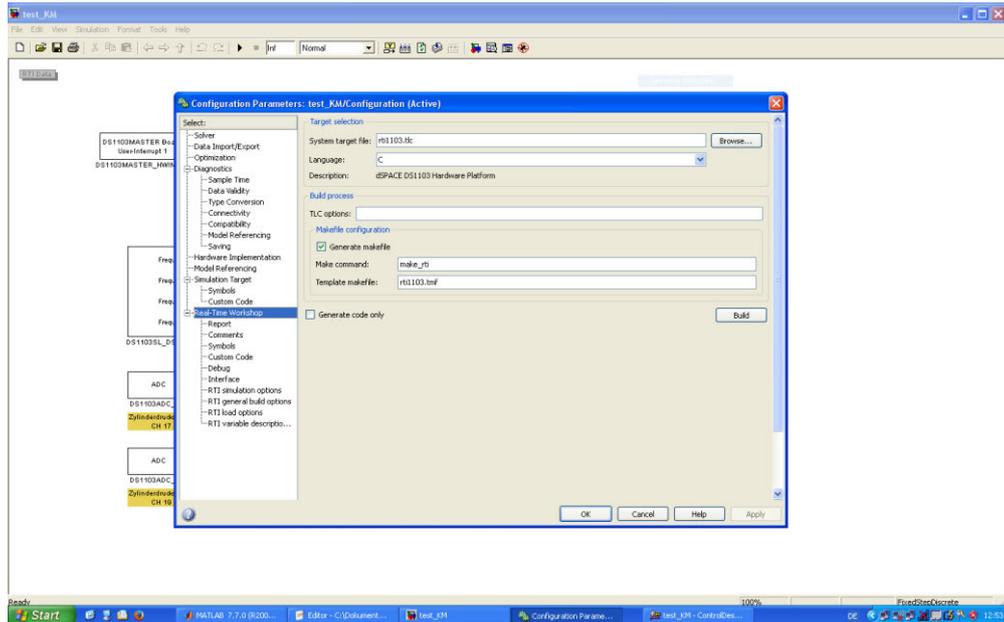


Abbildung 7.13: „Build Model“ konfigurieren

Simulink-Blöcke können aus dem Modell gelöscht werden, aber das graue Symbol „RTI-Data“ darf nicht gelöscht werden. RTI Data

11. Im nächsten Schritt wird das Modell als sdf-Datei gespeichert.

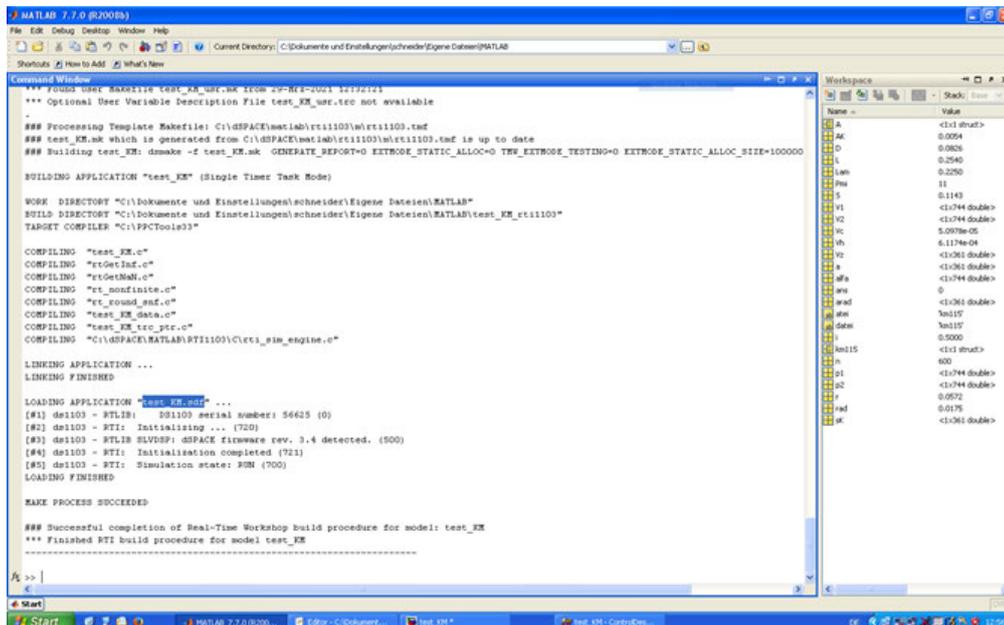


Abbildung 7.14: Modell als sdf-Datei

Es ist möglich, alle notwendigen Dateien auf die dSpace-Karte herunterzuladen, wenn der Build fertig ist. Anwendungsdateien können entweder in den internen 32-MB-Applikationsspeicher des Boards selbst oder auf das Compact-Flash-Laufwerk heruntergeladen werden, das dann in den PC-Kartenleser gesteckt wird.

7.2.2 ControlDesk

ControlDesk ist eine Benutzeroberfläche, die es dem Benutzer ermöglicht, ein Layout zur Anzeige der ausgewählten Variablen sowie mit Bedienelementen wie Tasten, Schaltern usw. zu erstellen. Der Anwender kann die Echtzeitanwendung auf die dSpace-Karte herunterladen und starten oder stoppen. Das Layout mit den Anzeigen der wichtigsten Variablen werden in ControlDesk-Version 3.3 erstellt, um den Zylinderdruck und die Kurbelwinkel des Prüfmotors in Echtzeit zu indizieren bzw. simulieren.

7.2.3 Durchführung von Experimenten mit RTI

1. Das DS1103-Board wird mit dem Schalter auf der Rückseite eingeschaltet [26].
2. ControlDesk wird geöffnet.

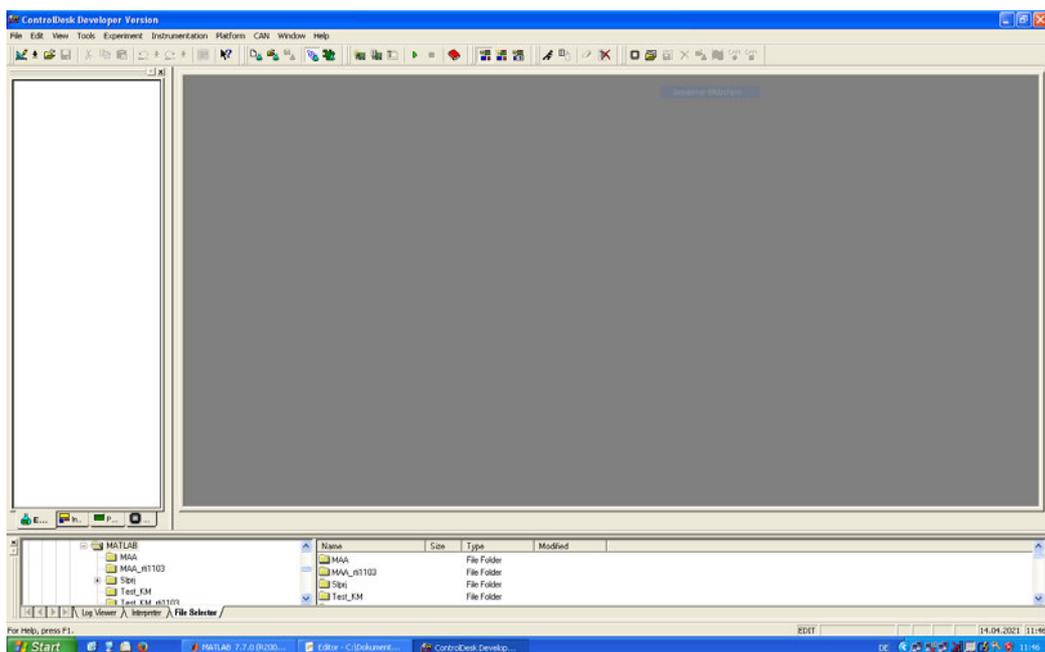


Abbildung 7.15: ControlDesk Programm

3. Es wird in der Menüleiste auf (Plattform → Initialization → Register) geklickt, um das DS1103-Board zu registrieren. Diese Schritte sollten nicht jedes Mal ausgeführt werden, wenn das System DS1103 verwendet wird.

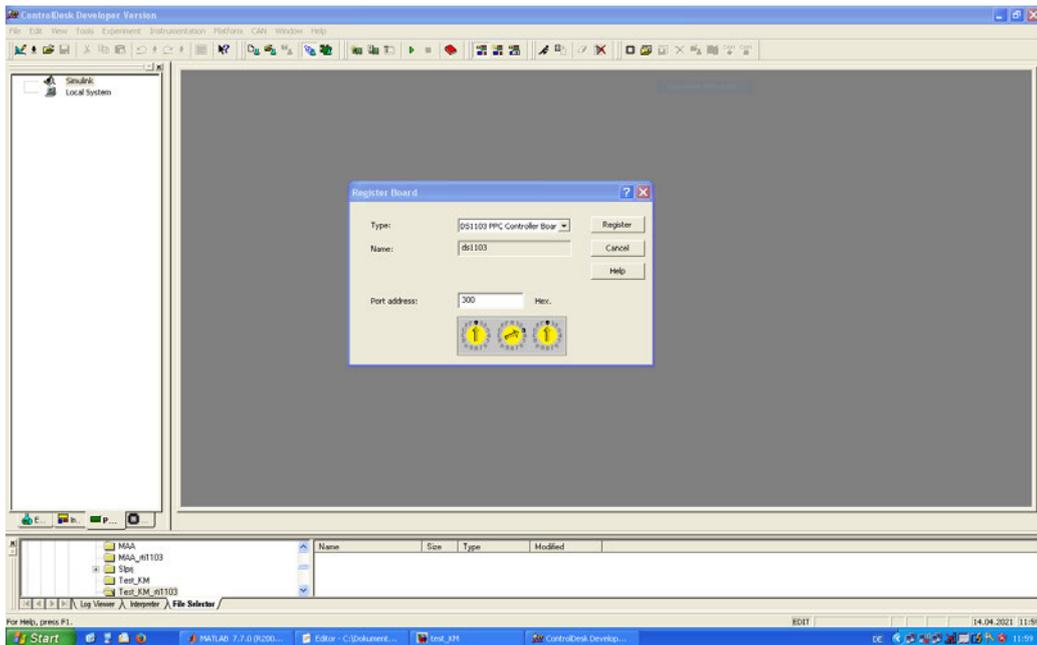


Abbildung 7.16: DS1103 Board registrieren

4. Es wird in der Menüleiste auf (File → New Experiment) geklickt. ControlDesk öffnet einen New Experiment Dialog.

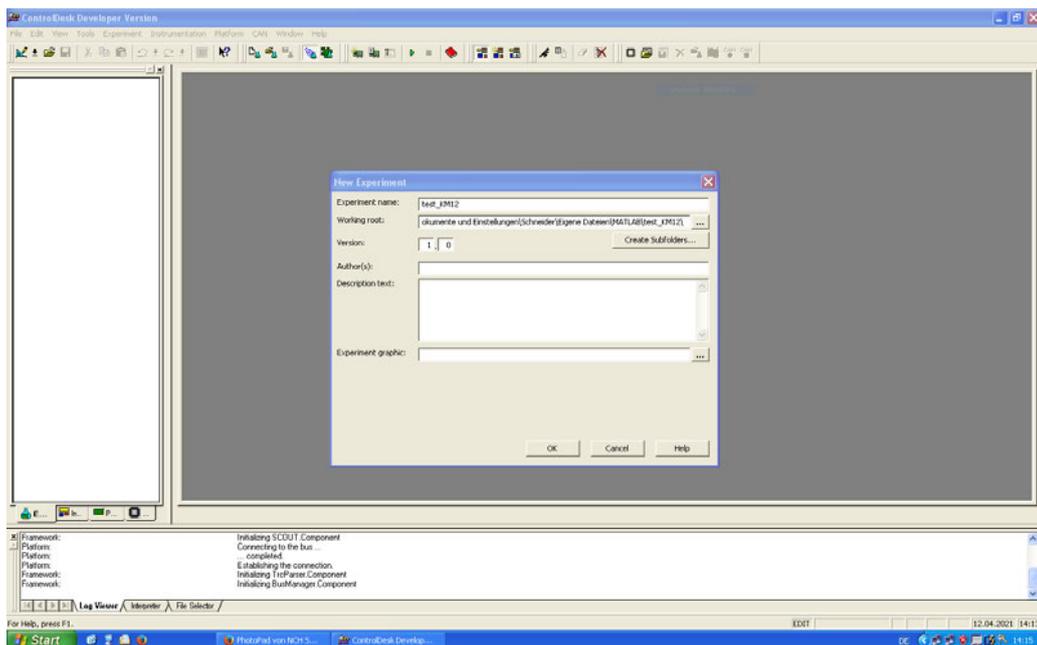


Abbildung 7.17: New Experiment Dialog

5. Für das New Experiment wird ein Name eingegeben und das Arbeitsverzeichnis eingegeben.
6. Es wird auf „OK“ geklickt. ControlDesk zeigt das Experiment in Navigator an.

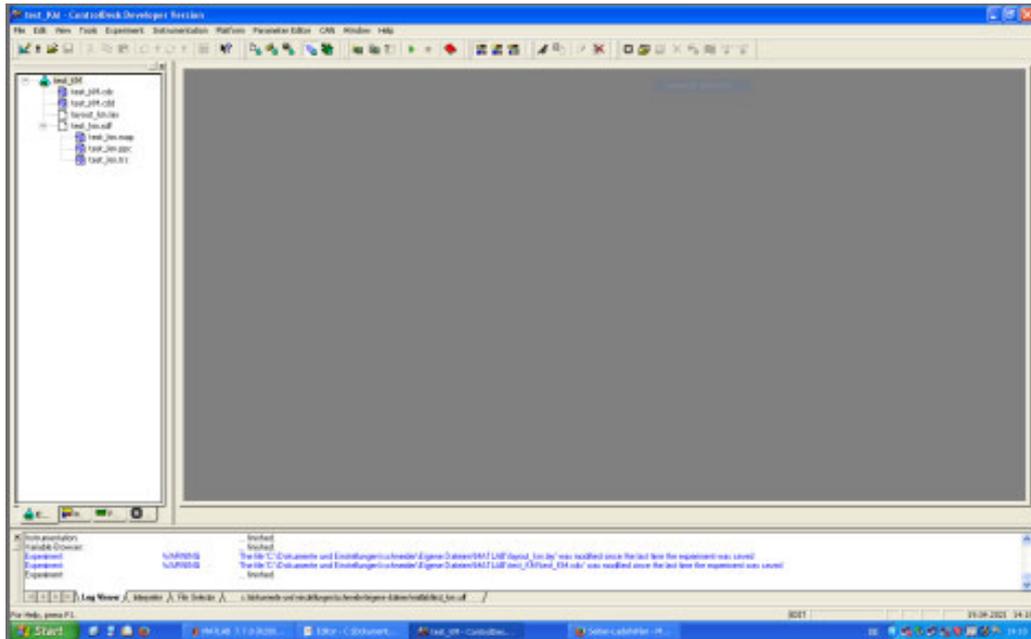


Abbildung 7.18: New Experiment in Navigator

7. Es wird in der Menüleiste auf (File → New → Layout) geklickt. ControlDesk fügt ein neues Layout in Experiment ein.

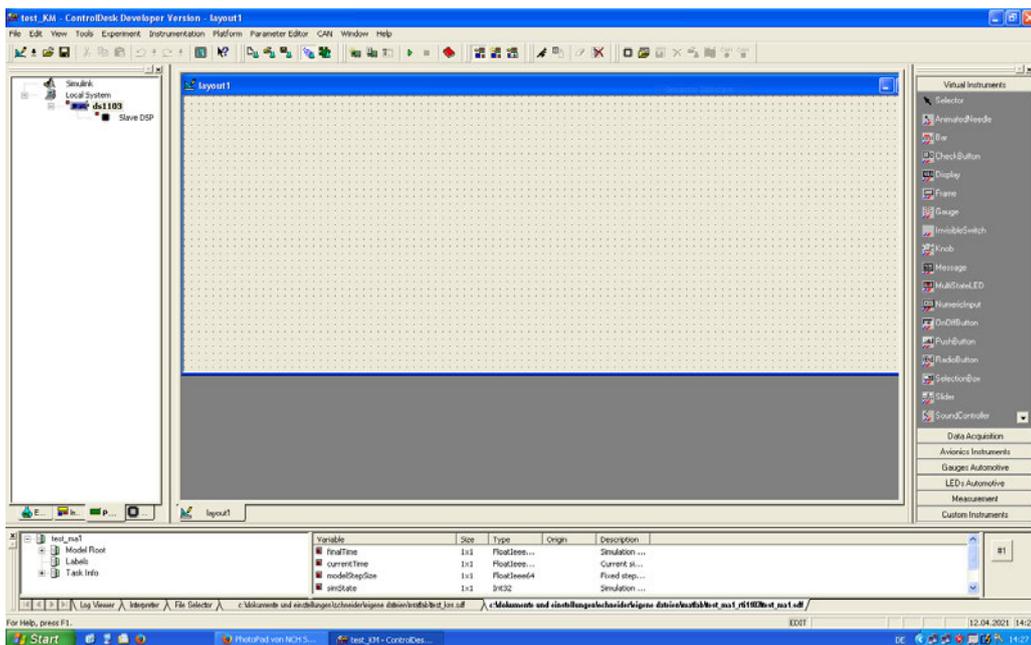


Abbildung 7.19: New Layout

8. Bei „Edit Mode“ wird in „Virtual Instrument“ oder „Data Acquisition“ auf das Symbol eines Instruments geklickt, z. B. Display, Plotter Array und Gauge.
9. Im Layout-Fenster wird ein Rechteck mit der Maus gezeichnet. ControlDesk fügt ein neues Display oder Plotter Array ein.

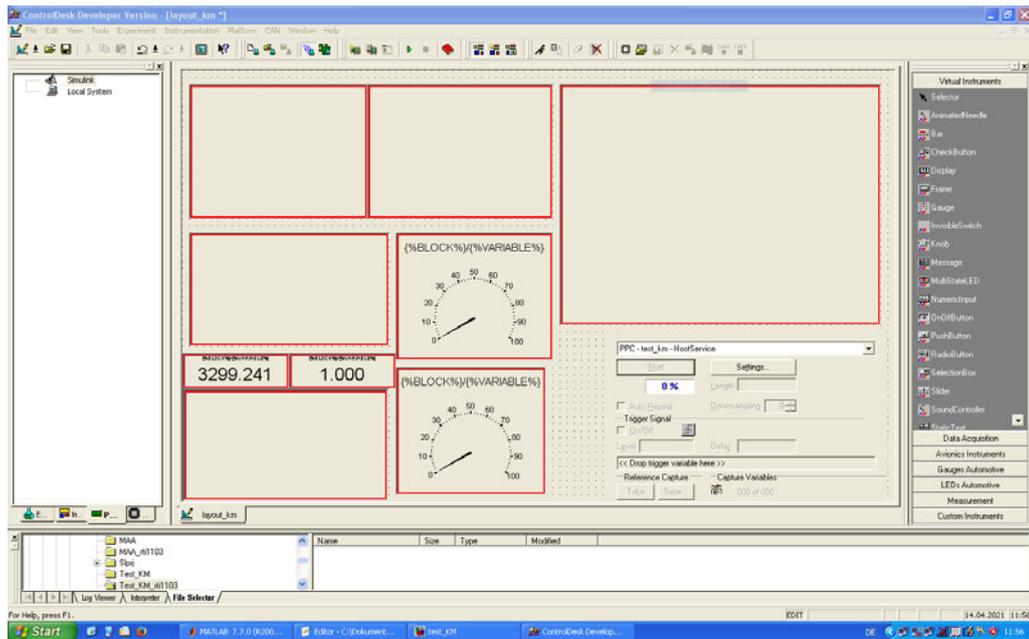


Abbildung 7.20: Instrumente auswählen & einfügen

10. In „Variable Browser“ wird ein Signal ausgewählt und im Gerät abgelegt, z. B. ein Out_trigger-Signal aus Model Root.

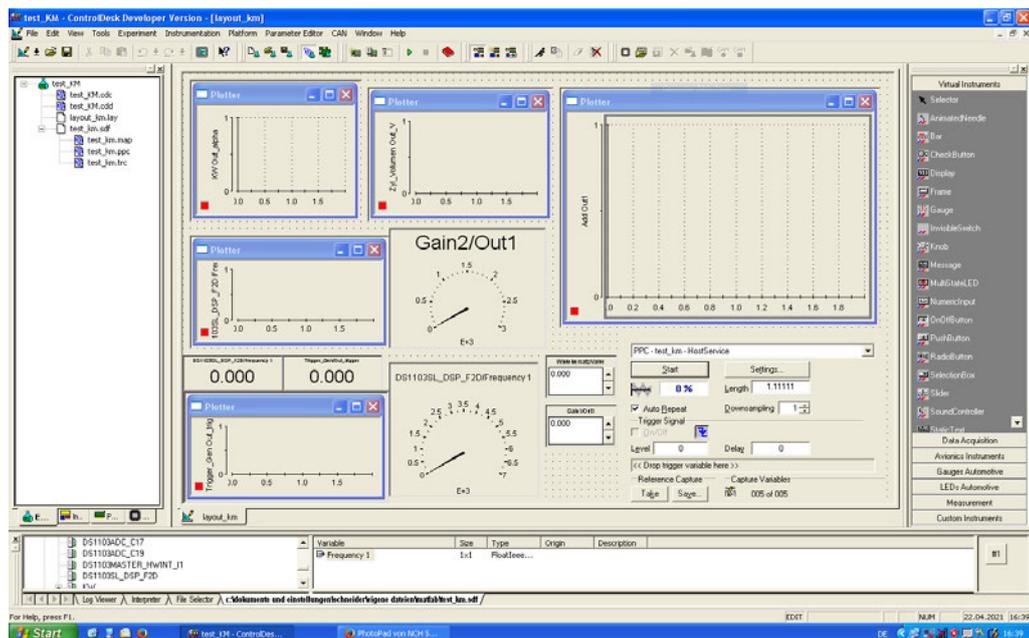


Abbildung 7.21: Signal auswählen und im Gerät ablegen

Die Eigenschaften der Instrumente können nach Bedarf geändert werden. Mit der rechten Maustaste wird auf das Instrument geklickt und die „Eigenschaften“ gewählt.

11. Es wird in der Menüleiste auf „Load“ geklickt. Es öffnet sich ein Dialogfenster und eine sdf-Datei muss gewählt werden.

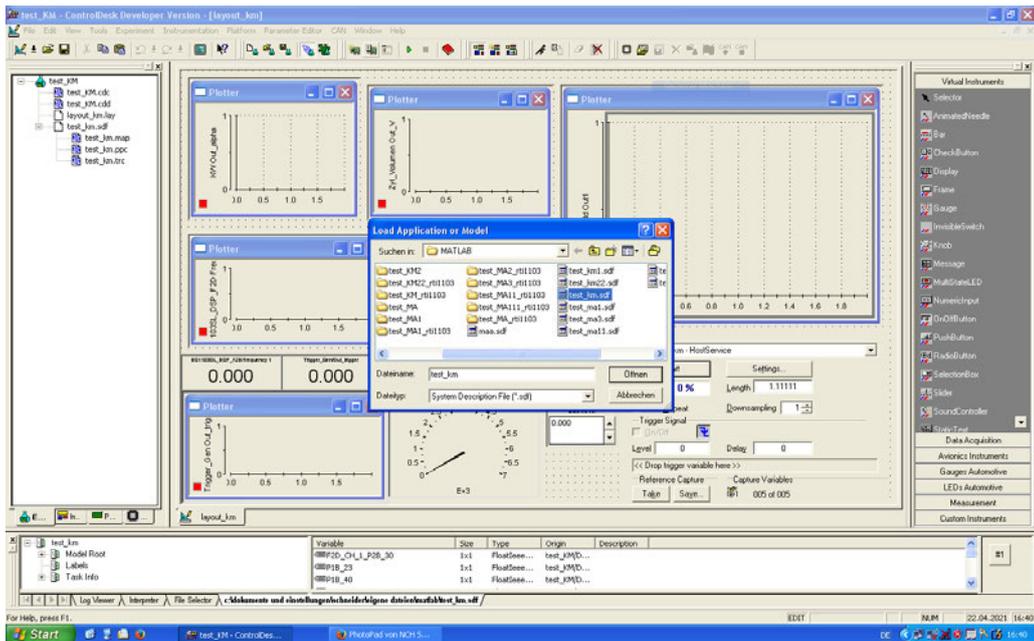


Abbildung 7.22: Auswahl und Load sdf-Datei

- Es wird in der Menüleiste auf „Start“ und „Animation Mode“ geklickt, um in den Animationsmodus zu wechseln. Um das Programm zu stoppen, wird erst vom „Animation Mode“ in den „Edit Mode“ gewechselt und dann „Stop“ geklickt.

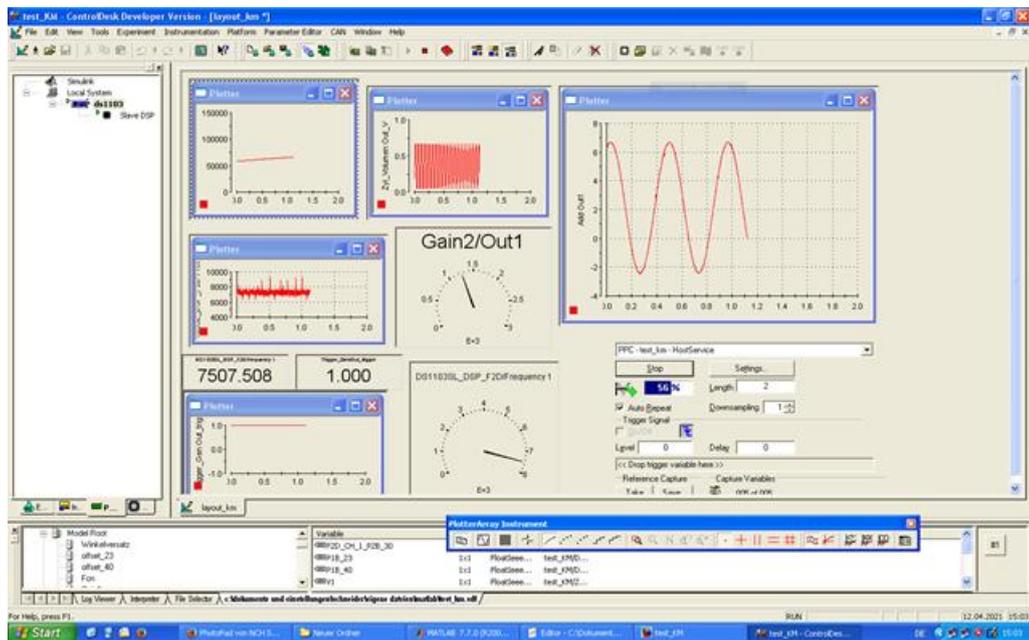


Abbildung 7.23: Programm Start/Stop & Animation

- Aus „Data Acquisition“ wird das Instrument „CaptureSettings“ ausgewählt und in das Layout eingefügt. Das Instrument wird zum Speichern und Aufzeichnen von Daten aus Plotter Array verwendet.

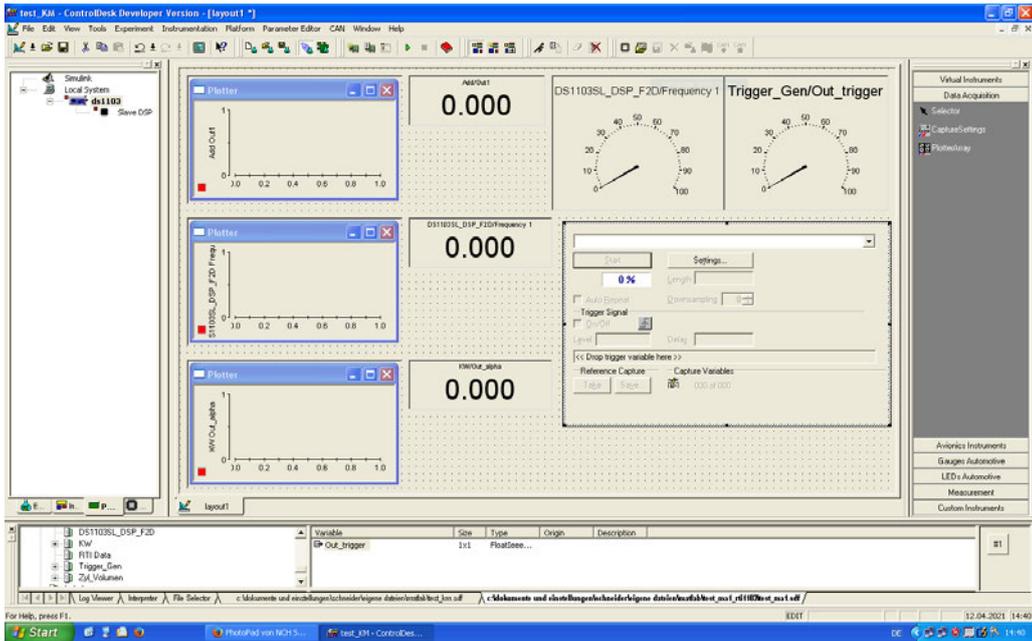


Abbildung 7.24: Instrument „CaptureSettings“ auswählen und einfügen

- Das obere Dropdown-Menü wird für das Instrument auf „PPC - HostService“ gestellt. (Der Name für das Projekt wird ebenfalls angegeben.)

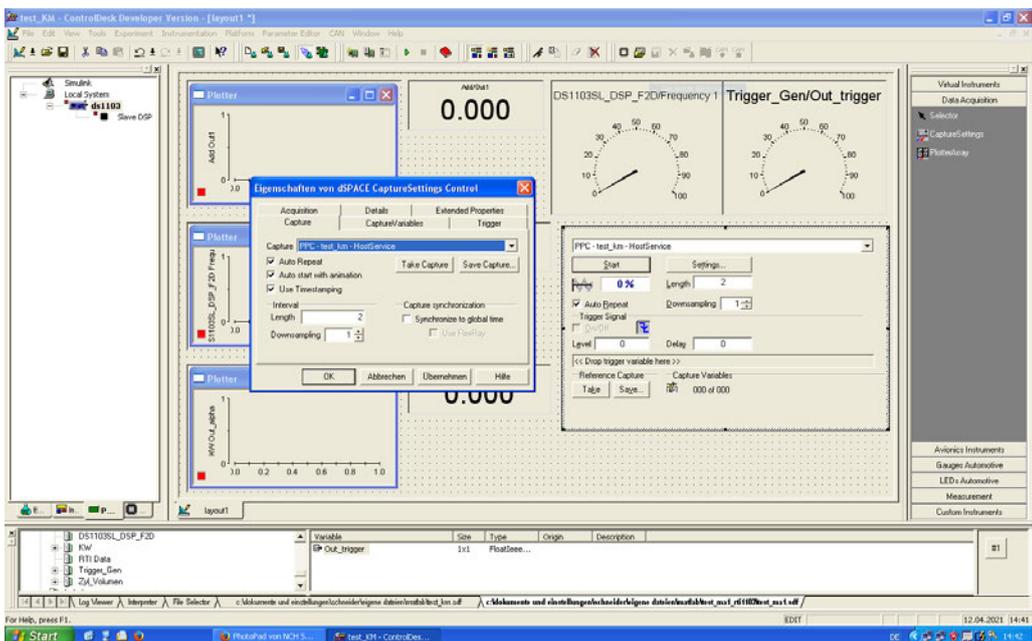


Abbildung 7.25: Name des Projekts auf „PPC - HostService“ stellen

- Das Dialogfeld „Settings“ für das „CaptureSettings“-Instrument wird geöffnet und die Registerkarte auf „Acquisition“ gestellt, dann wird für das Aufzählungsfeld „Steam of Disk“ gewählt.

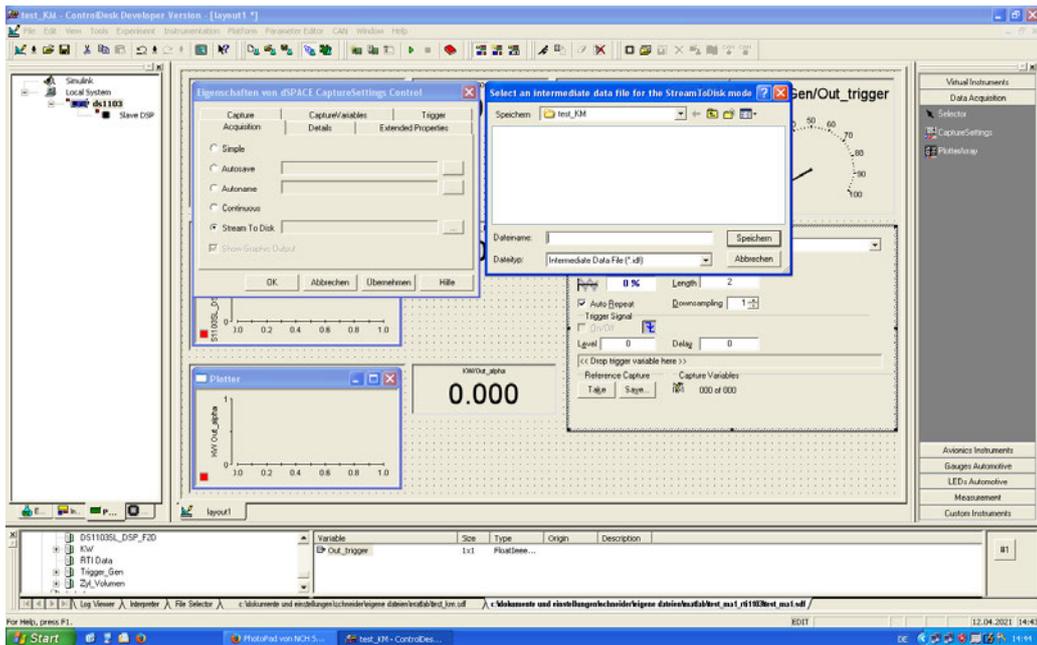


Abbildung 7.26: Settings auf „Acquisition“ und „Stream of Disk“

- Die Schaltfläche mit „...“ wird gewählt und eine Datei für die Daten, in der gespeichert werden soll, wird erstellt oder gewählt. Die Datei wird als „.idf“-Datei gespeichert.

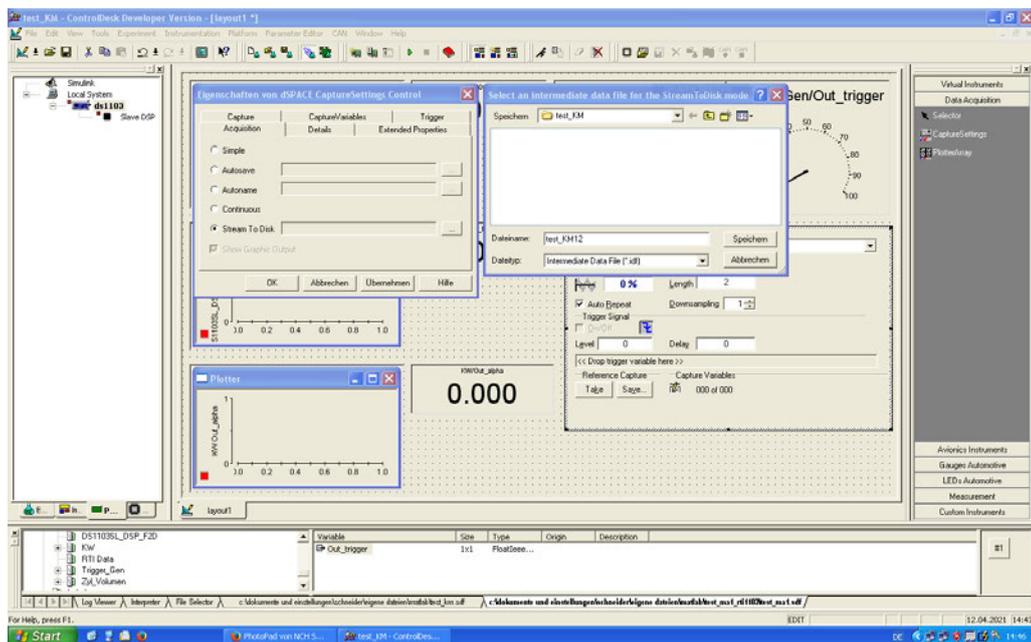


Abbildung 7.27: „.idf“-Datei wählen und Datei speichern

- Wenn die Schaltfläche „Start“ am Instrument ausgewählt ist, meldet ControlDesk möglicherweise einen Fehler mit den Einstellungen „Länge“ oder „Downsampling“. Durch willkürliches Setzen der „Länge“ auf „2“ wird dies für die Beispielanwendung behoben.

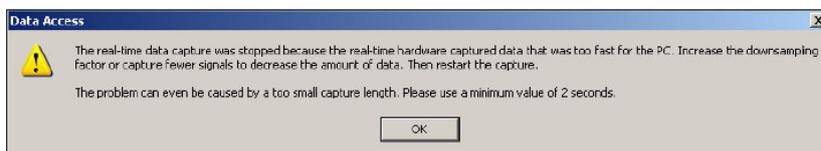


Abbildung 7.28: Fehlermeldung „Data Access“

18. Es wird in der Menüleiste auf (Tools → Convert IDF File) geklickt. Die konvertierten Daten sollten unter Verwendung der Schaltflächen „Quelldatei“ („.idf-Datei“) und „Zieldatei“ („.mat-Datei“) und Auswahl der Schaltfläche „Convert“ gespeichert werden.

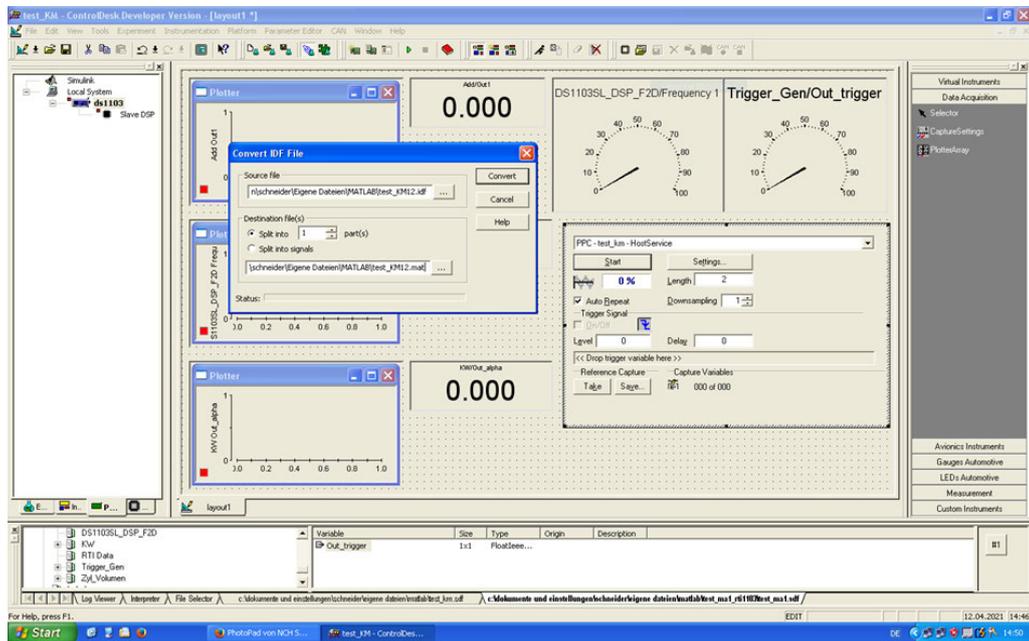


Abbildung 7.29: „idf“-Datei in „mat“-Datei konvertieren

In diesem Schritt in Echtzeit lassen sich die Druckverläufe über dem Kurbelwinkel sowie die Zeit verfolgen und können die Daten erfasst und gespeichert werden.

Hier werden die Rohdaten des Klopfmotors wie Druck (p), Umdrehung Frequenz (FRQ), Umdrehung Trigger (TRG), Kurbelwinkel (φ) und Volumen (V) über die Zeit geplottet.

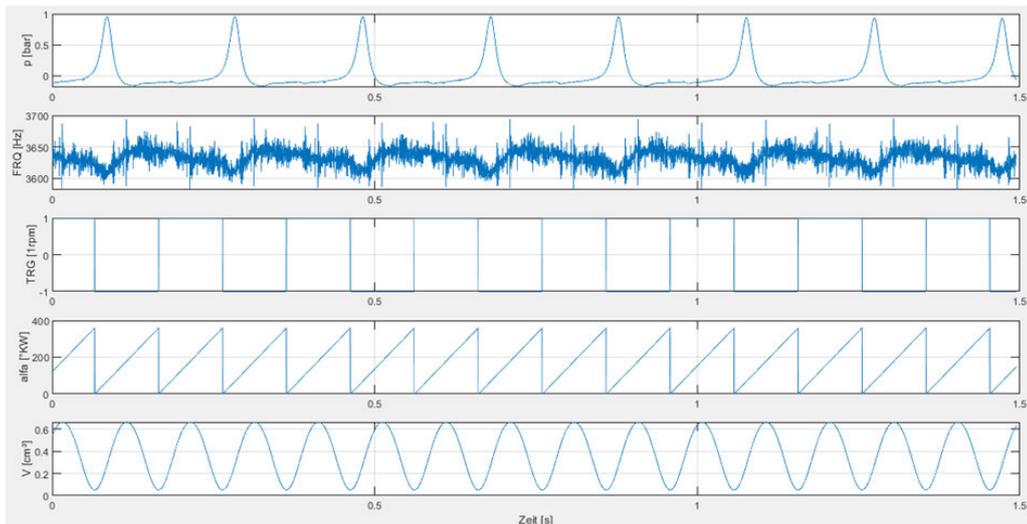


Abbildung 7.30: Darstellung von Rohdaten mit dem MATLAB-Programm

Der MATLAB-Code wird erstellt, erweitert und geprüft, um die Daten grafisch darzustellen [A.5]. Mit dem MATLAB-Programm muss Druck über Kurbelwinkel ($p - \varphi$), Druck über Volumen ($p - V$) und Heizverlauf über Kurbelwinkel (QH - φ) dargestellt und analysiert

werden. Für eine richtige Darstellung im p-V-Diagramm muss Druck über Kurbelwinkel so verschoben werden, dass OT kurz vor 360°KW oder 0°KW platziert ist.

```

1 % Auswertungsprogramm für den Klopfmotor
2 % 24.06.2021
3
4 load('pr') % Load Druck in Bar
5 load('alfa') % load Kurbelwinkel in °KW
6 D = 0.08255; % Bohrung in m
7 r = 0.05715; % Kurbelradius in m
8 S = 2 * r; % Kolbenhub in m
9 AK = pi / 4 * D^2; % Kolbenzylinderfläche in m^2
10 Vh = AK * S; % Hubvolumen eines Zylinders
11 Vc = 6.0978e-5; % Schachraum m^3
12 L = 254e-3; % Pleuellänge in m
13 n = 600; % Umdrehung in 1/Min
14 nM = 0.5; % Motor Taktrate [-]
15 Lam = r / L; % Pleuelstangenverhältnis der A-Reihe
16 a = alpha; % Pleuelstangenwinkel in °KW
17 rad = (1/180)*pi; % rad
18 arad = a * rad; % Kurbelwinkel in Radiant
19 aK = r * (1 - cos(arad) + Lam / 4 * (1 - cos(2 * arad))); % Kolbenweg in m
20 Vz = (Vc + AK * aK);
21
22 %Hier wird der Heizerlauf nach Hohenberg berechnet.
23
24 R Luft = 287; % Gaskonstante in [J/Kg*K]
25 cv = 717; % spez. isochore Wärmekapazität in [J/Kg*K]
26 istart = 1;
  
```

Abbildung 7.31: Matlab-Code erstellen

Der Abbildung 7.32 ist zu entnehmen, dass die Kurbelwinkelzuordnung zum oberen Totpunkt (OT) nicht korrekt ist. Für eine bessere Darstellung muss der Druck über dem Kurbelwinkel so verschoben werden, dass ein korrektes Standard-p-V-Diagramm gezeigt wird.

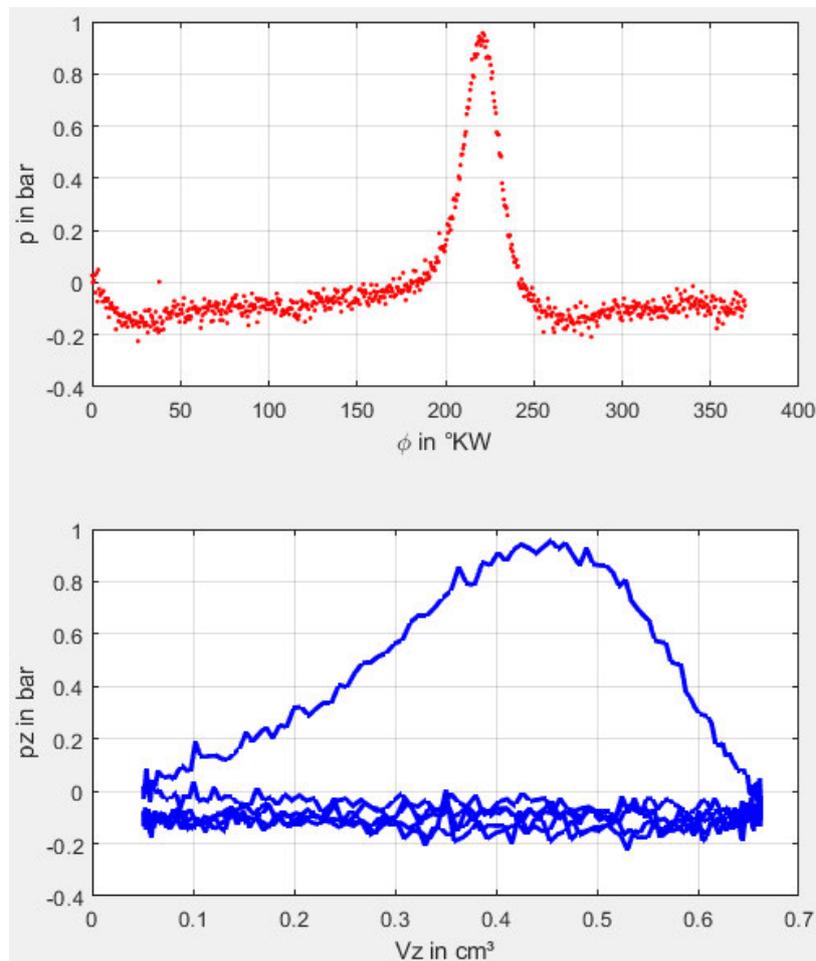


Abbildung 7.32: (p - ϕ)- und (p - V)-Diagramm

8. Versuchsauswertung

8.1 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz)

Das Gesetz der Erhaltung der Energie besagt: Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt werden, sie kann aber weder erzeugt noch vernichtet werden. Das gilt für reversible und irreversible Zustandsänderungen. Es kann unter Vernachlässigung von potenzieller und kinetischer Energie für instationäre, offene Systeme wie folgt formuliert werden [27]:

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{d\varphi} + \frac{dQ_W}{d\varphi} + \frac{dW_t}{d\varphi} + \frac{dH_E}{d\varphi} + \frac{dH_A}{d\varphi} + \frac{dH_L}{d\varphi} \quad (8.1)$$

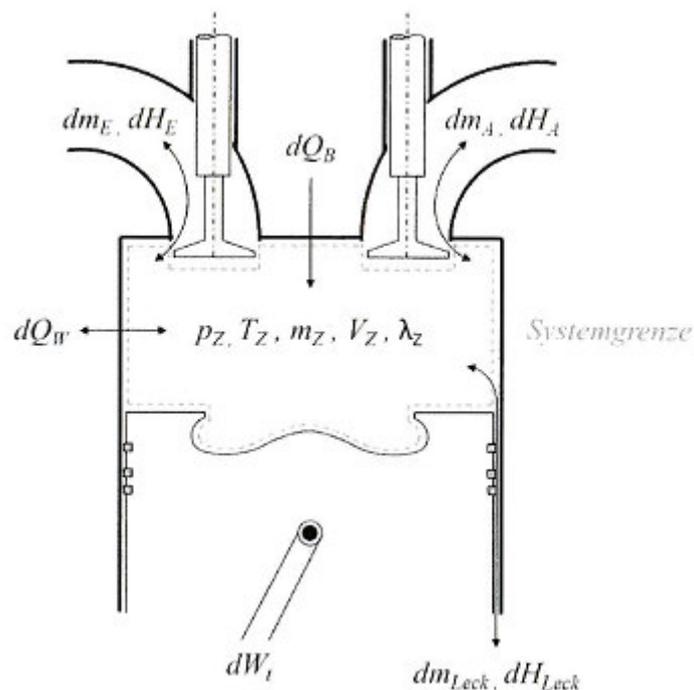


Abbildung 8.1: Thermodynamisches System Brennraum für innere Gemischbildung [27]

8.2 Thermodynamik und Heizverlauf

Eine energetische Beurteilung der im Brennraum ablaufenden Vorgänge über eine thermodynamische Analyse des Brennverlaufes ist in Echtzeit aufgrund der begrenzten Rechen- und Speicherleistung heutiger Motorsteuergeräte nur schwer realisierbar. Vor allem die Modellierung der Wandwärme- und Leckageverluste sowie die Berechnung der Rauchgaskalorik gestalten sich durch deren iterative Lösung als sehr rechenintensiv. Daher wird zur energetischen Beurteilung und als Basis für die Regelung der Verbrennung der differentielle Heizverlauf $dQ_H/d\varphi$ als erste Näherung des Brennverlaufes verwendet [27].

1. Hauptsatz der Thermodynamik in der Hochdruckphase des Arbeitsspieles ($-180^\circ\text{KW} \leq \varphi \leq 180^\circ\text{KW}$) für das geschlossene System [27]:

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = \frac{dU}{d\varphi} - \frac{dQ_W}{d\varphi} + p_z \frac{dV_Z}{d\varphi} - \frac{dH_L}{d\varphi} \quad (8.2)$$

Der differentielle Heizverlauf unter Vernachlässigung der Leckageverlust

$$\frac{dQ_H}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{d\varphi} + \frac{dQ_W}{d\varphi} = \frac{dU}{d\varphi} + p_z \frac{dV_Z}{d\varphi} - \left(\frac{dH_L}{d\varphi} \approx 0\right) \quad (8.3)$$

Es wird angenommen, dass die innere Energie nicht vom Druck und der Zusammensetzung des Arbeitsgases abhängt und wird zusätzlich eine Änderung der Zylindermasse ausgeschlossen.

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{d(m_z u)}{d\varphi} = m_z \frac{dU}{d\varphi} + \left(\frac{dm_z}{d\varphi} \approx 0\right) u = m_z c_v \frac{dT}{d\varphi} \quad (8.4)$$

Bei Vernachlässigung der Änderung der individuellen Gaskonstante R_z unter Einnahme der thermischen Zustandsgleichung

$$p_z \frac{dV_Z}{d\varphi} + V_Z \frac{dp_z}{d\varphi} = m_z R_z \frac{dT_z}{d\varphi} + m_z T_z \left(\frac{dR_z}{d\varphi} \approx 0\right) + R_z T_z \left(\frac{dm_z}{d\varphi} \approx 0\right) \quad (8.5)$$

führt Gleichung (8.3) zu:

$$\frac{dQ_H}{d\varphi} = \frac{c_v}{R_z} \left(p_z \frac{dV_Z}{d\varphi} + V_Z \frac{dp_z}{d\varphi} \right) + p_z \frac{dV_Z}{d\varphi} \quad (8.6)$$

Mit dem Zusammenhang zwischen spezifisch isochorer Wärmekapazität c_v , spezifisch isobarer Wärmekapazität c_p , individueller Gaskonstante R_z und dem Isentropenexponenten κ :

$$\frac{c_v}{R_z} = \frac{c_v}{c_p - c_v} = \frac{1}{\frac{c_p}{c_v} - 1} = \frac{1}{\kappa - 1} \quad (8.7)$$

Es wird der differentielle Heizverlauf aus gemessenen Brennraumdruck p_z , der Volumenfunktion des Kolbentriebes $\frac{dV_Z}{d\varphi}$ und dem Isentropenexponenten κ berechnet:

$$\frac{dQ_H}{d\varphi} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_z \frac{dV_Z}{d\varphi} + \frac{1}{\kappa - 1} V_Z \frac{dp_z}{d\varphi} \quad (8.8)$$

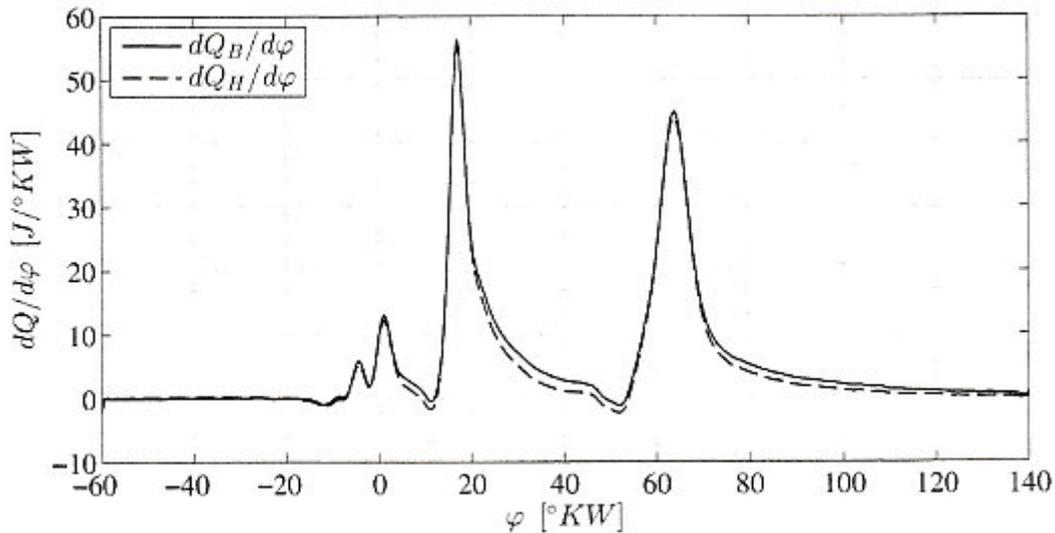


Abbildung 8.2: Brenn- und Heizverlauf in Ottomotor ($n = 1000 \text{ 1/min}$; $p = 11 \text{ Bar}$) [27]

8.3 Auswertung des (p - φ) -, (p - V)- und (QH - φ)-Diagramms

Umfangreiche Testmessungen haben gezeigt, dass ein sinnvoller Messbetrieb nur bei ausgeschalteter Zündung möglich ist. Mit der Zündung werden die Ergebnisse gestört und die Daten werden unzuverlässig. Durch Zündstörungen wird oft das dSpace-Software-System blockiert. Daraus kann geschlossen werden, dass die hohe Frequenz und/oder hohe Spannung durch die Zündspule das Problem verursachen. Leider konnte es trotz aller Anstrengungen und Änderungen am Motor nicht beseitigt werden, weshalb sich die Ergebnisse mit der Zündung nicht verbessert haben.

Es wurde dann der Versuch unternommen, mit dem OSIRIS-Messsystem bessere Ergebnisse zu erzielen, aber das ist nicht gelungen, da die Zündspule auch hier Störungen verursacht. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse ohne Zündung bewertet bzw. analysiert.

Die Diagramme (p - φ), (V - φ), (p - V) und (QH - φ) aus dem Klopfmotor-Versuch wurden mithilfe des MATLAB-Motorprozesses dargestellt. Der Druckverlauf über dem Kurbelwinkel (p - φ) zeigt, dass der Kolben kurz vor 0°KW seinen oberen Totpunkt (OT) erreicht hat. Dies ist im p-V-Diagramm gut ersichtlich. Das (QH - φ)-Diagramm zeigt auch, dass der Heizverlauf vor dem OT-Bereich schnell steigt (Wärmeabgabe). Im OT-Bereich und danach weist er einige Schwankungen auf, ab 400°KW sinkt er dann bis 600°KW ab.

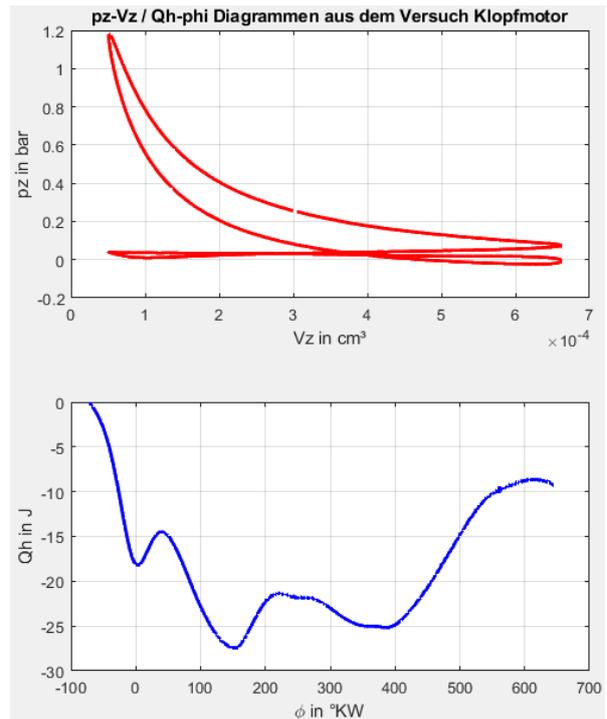
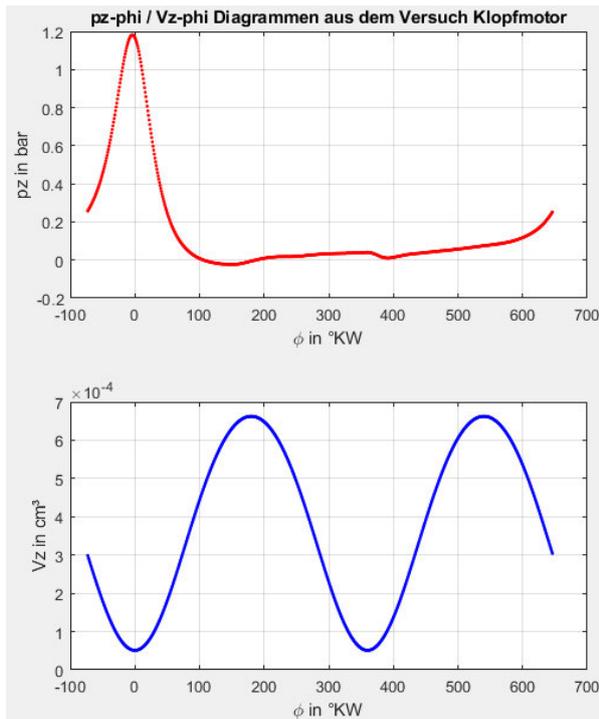


Abbildung 8.3: ($p - \phi$)-, ($V - \phi$)-, ($p - V$)- und ($QH - \phi$)-Diagramm aus dem Versuch Klopfmotor

9. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung und Erweiterung der messtechnischen Instrumente und der Inbetriebnahme eines Sonderottomotors. Im Motor sollen die Zylinderdruckverläufe und Volumenänderungsverläufe über Kurbelwinkel für verschiedene alternative Kraftstoffe untersucht werden. Im Zentrum für Energietechnik (ZET) des Instituts für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen befindet sich ein Sonderottomotor, der bei verschiedenen Laborversuchen wie der Oktanzahlermittlung oder einer Zylinderdruckindizierung mit alternativen Kraftstoffen eingesetzt werden kann.

In Kapitel 2 dieser Arbeit wurden die allgemeinen theoretischen Grundlagen des Ottomotors dargestellt. Der Aufbau und das Funktionsprinzip sowie die Wirkungsweise wurden erläutert, ebenso wurden die thermodynamischen Grundlagen und der effektive Druck erklärt. In Kapitel 3 wurden die Herstellung von Kraftstoffen – insbesondere von alkoholischen, bio- und synthetischen Kraftstoffen – dargelegt und die Eigenschaften von Kraftstoffen diskutiert. Die verschiedenen Einspritzungssysteme wurden verglichen und deren Anwendungsfelder sowie Vor- und Nachteile benannt.

Kapitel 4 befasste sich mit den Luftverhältnissen im Kraftstoff und den Einflüssen von fetten und mageren Luft-Kraftstoff-Gemischen im Verbrennungsmotor sowie den Emissionen. In Kapitel 5 wurde der ASTM-CFR-Motor des Modells D2699/D2700 thematisiert. Die Eigenschaften und Spezifikationen des Motors wurden detailliert vorgestellt und die Einstellung der Zylinderhöhe, das Verdichtungsverhältnis und das Zündsystem erklärt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden, wie in Kapitel 6 beschrieben, ein Drucksensor und ein Kurbelwinkelmarker am Prüfmotor angepasst und montiert, um die Druckverläufe und Volumenänderungsverläufe im Motor erfassen und grafisch darstellen zu können.

Kapitel 7 befasste sich mit dem dSpace-Hard- und Software-System und dessen Eigenschaften und Besonderheiten. Nach der Anbindung des Systems an die Echtzeithardware von dSpace wurde die Steuerung mithilfe der grafischen Programmier-Oberfläche ControlDesk erläutert. Mit dem MATLAB/Simulink-Programm wurde ein Programm erstellt und optimiert, um Druckverläufe über Kurbelwinkel im Zylinder zu erfassen und grafisch darzustellen. Anschließend wurden mit dem erstellten MATLAB-Motorprozess die Druckverläufe und auf Druck basierten Heizverläufe sowie ein p-V-Diagramm grafisch dargestellt und analysiert.

Nach zahlreichen Versuchen am Prüfmotor stellte sich heraus, dass, wenn die Zündung genutzt wird, keine korrekten, zuverlässigen Ergebnisse zu erzielen sind. Die Ursache des Problems liegt möglicherweise in der durch die Zündspule bedingten hohen Frequenz

und/oder der hohen Spannung. Obwohl eine Vielzahl an Änderungen am Prüfmotor vorgenommen wurde, konnten dieses Problem nicht beseitigt und die Ergebnisse mit der Zündung nicht verbessert werden.

Mithilfe des OSIRIS-Programms wurde versucht, bessere Ergebnisse zu erzielen, was aber nicht gelang, da die Zündspule ebenfalls Störungen verursacht. Daher wurden die Ergebnisse ohne Zündung bewertet und analysiert.

Es wird vorgeschlagen, bei künftigen Versuchen einen optischen Kurbelwinkelmarker (AVL 365C) einzusetzen, um störungsfreie Messungen zu ermöglichen und bessere Ergebnisse zu erzielen. Die Funktion von Kurbelwinkelmarker AVL 365C basiert auf dem Prinzip der Reflexion von Infrarotlicht an einer rotierenden Strichscheibe. Die Winkelinformation wird vom Aufnehmer über das Glasfaserkabel zur Sende-Empfangs-Elektronik übertragen [28].

10. Literaturverzeichnis:

- [1] <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/> [online;23.02.2021]
- [2] <https://www.bmu.de/service/haeufige-fragen-faq/faq-alternative-kraftstoffe/>
[online;23.02.2021]
- [3] <https://www.astm.org/Standards/D2699.htm> [online;23.02.2021]
Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine
Fuel ASTM D2699 - 19
- [4] [https://de.wikipedia.org/wiki/Klopfen_\(Verbrennungsmotor\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Klopfen_(Verbrennungsmotor)) [online;23.02.2021]
- [5] <https://www.energie-lexikon.info/ottomotor.html> [online;01.03.2021]
- [6] J.Piatek, Kolbenmaschinen-Skript, WS2019
[a,S.64 neue Zeichnung] ; [b,S.67 ; c,S.68 ; d,S.71 ; e,S.103]
- [7] U.Todsén, Verbrennungsmotoren, 2.Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2017
[a,S.30 ; b,S.23]
- [8] K.Reif, Grundlagen Fahrzeug und Motorentechnik im Überblick, 2 Auflage, Wiesbaden:
Springer Fachmedien, 2016 [S.37]
- [9] K.Reif, Ottomotor Management kompakt, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015
[a,S.33 ; b,S.32 ; c,S.33-34 ; d,S.34 ; e,S.35-36]
- [10] <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/biokraftstoff.html>
[online;02.02.2020]
- [11] W.Eifler, E.Schlücker, U.Spicher, G.Will, Küttner Kolbenmaschinen, 7.Auflage,
Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009 [a,S.276-277 ; b,S.377]
- [12] U.Todsén, Verbrennungsmotoren, 2.Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2017
[a,S.81-83 ; b,S.87 ; c,S.135-136]
- [13] <https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/50-cooperative-fuel-research-engine> [online; 13.02.2021]
- [14] Klopfmotor, Skript (ASTM-CFR-Motor) [a,S.47 ; b,S.41-46]
- [15] W.Eifler, E.Schlücker, U.Spicher, G.Will, Küttner Kolbenmaschinen, 7.Auflage,
Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009 [S.258]
- [16] Klopfmotor, Skript (ASTM-CFR-Motor) [a,S.1-2 ; b,S.18-19 ; c,S.14]
- [17] Klopfmotor, Skript (ASTM-CFR-Motor)
[a,S.51-55 ; b,S.8-13 ; c,S.57-64 ; d,S.42 ; e,S.88 ; f,S.95]
- [18] K.Reif, Grundlagen Fahrzeug und Motorentechnik im Überblick, 2 Auflage, Wiesbaden:
Springer Fachmedien, 2016 [S.38]
- [19] AVL Opt. Winkelmarkier Einrichtung Typ 360C/600 – 0,1°, Bedienungsanleitung
- [20] <https://de.wikipedia.org/wiki/Drucksensor> [online; 22.02.2021]
- [21] R.v.Basshysen, F.Schäfer, Handbuch Verbrennungsmotor, 7.Auflage,

- Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015 [S.996]
- [22] J.Piatek, Kolbenmaschinen-Skript, WS2019 [S.88]
- [23] http://www.ceanet.com.au/Portals/0/documents/products/dSPACE/dspace_2008_ds1103_en_pi777.pdf [online; 20.02.2021]
- [24] <https://de.wikipedia.org/wiki/Analog-Digital-Umsetzer> [online; 22.02.2021]
- [25] DS1103 PPC Controller Board, RTI Reference
- [26] <http://ee.bradley.edu/projects/proj2009/dscntrl/Tutorial.pdf> (dSpace)
- [27] N.Held, Zylinderdruckbasierte Regelkonzepte für Sonderbrennverfahren bei PKW-Dieselmotoren, 1.Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017 [S.13-16] [S.34-36]
- [28] https://www.avl.com/documents/10138/885965/ProductSheet_Angle_Encoder_365C_D_2.pdf [online; 01.03.2021]

11. Softwareverzeichnis

- [-] MATLAB/Simulink Version 2008b
- [-] dSpace ControlDesk Version 3.3

A.1 Information zur Grundeinstellung der Zylinderhöhe

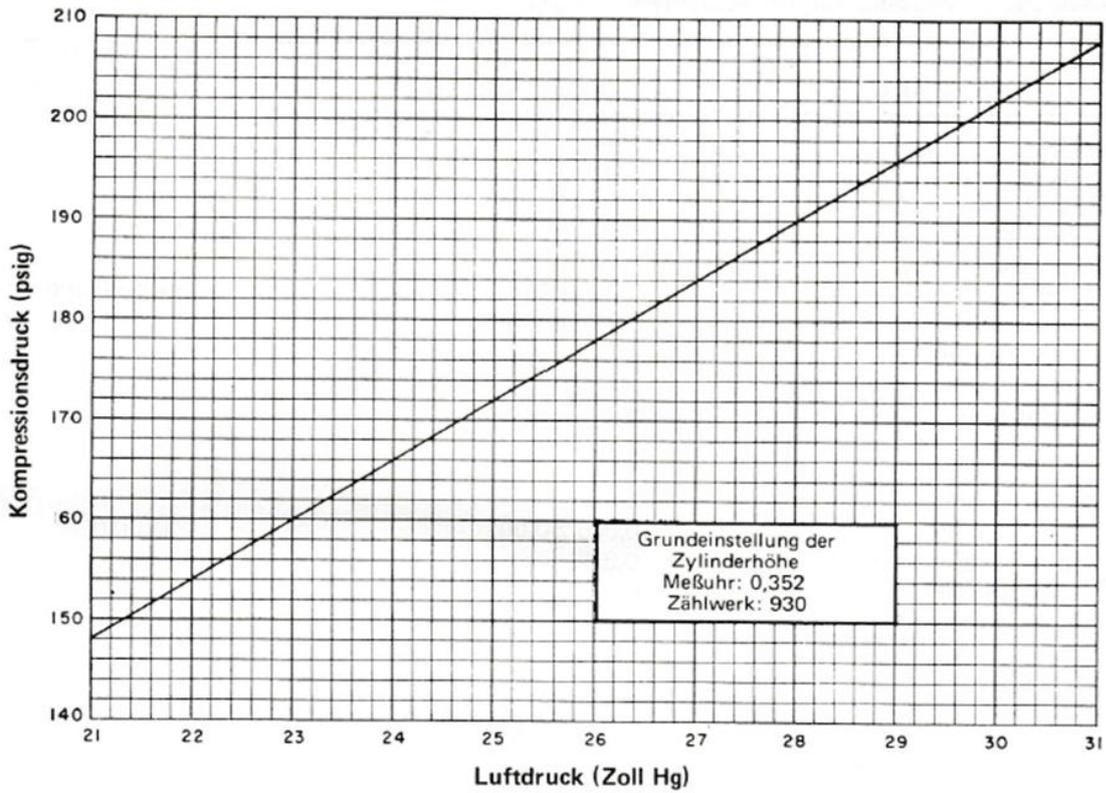


Bild 21a: Research Methode
 Wirklicher Kompressionsdruck in Abhängigkeit vom herrschenden örtlichen Luftdruck zur Grundeinstellung der Zylinderhöhe (Meßuhr oder Zählwerk)

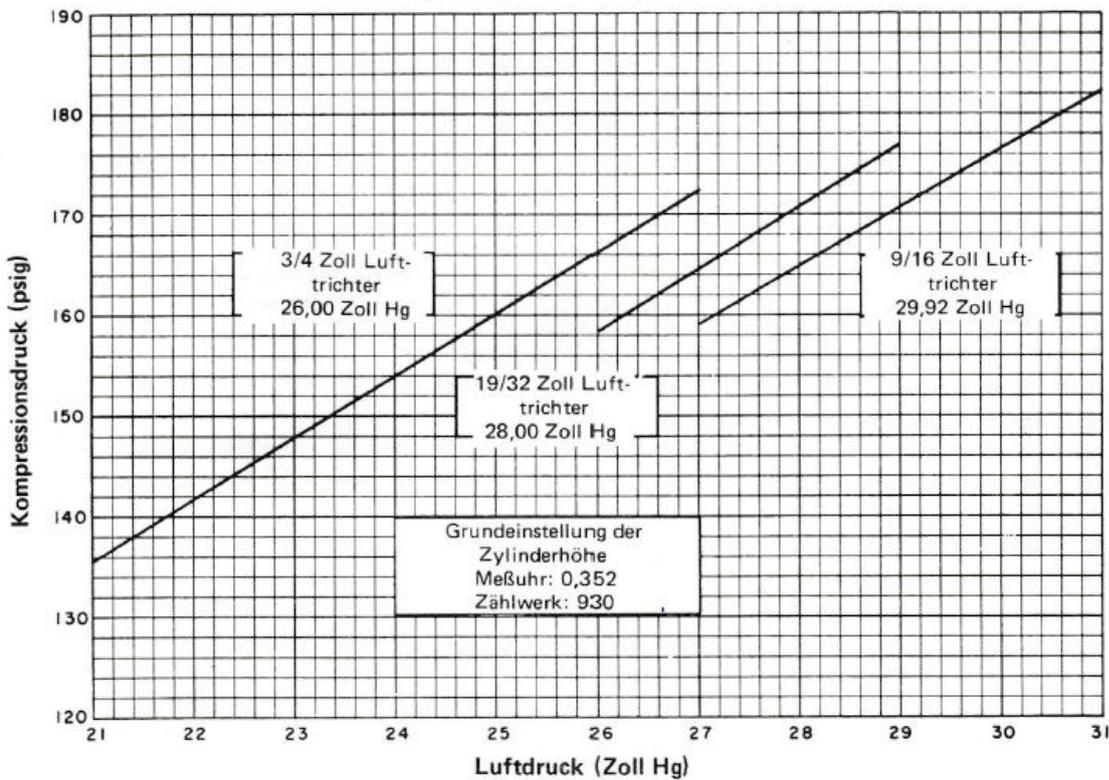


Bild 21b: Motor und Motor (LP) Methode
 Wirklicher Kompressionsdruck in Abhängigkeit vom herrschenden örtlichen Luftdruck zur Grundeinstellung der Zylinderhöhe (Meßuhr oder Zählwerk)

A.2 dSpace DS 1103 Board mit Zubehör



DS 1103 Board (AutoBox)



Express-Card DS 821 Link board



Lizenz-Dongle



A.3 Technischendaten DS1103 PPC Controller Board

Parameter		Specification
Processor	PowerPC Type	■ PPC 750GX
	CPU clock	■ 1 GHz
	Cache	■ 32 KB level 1 (L1) instruction cache ■ 32 KB level 1 (L1) data cache ■ 1 MB level 2 (L2)
	Bus frequency	■ 133 MHz
	Temperature sensor	■ Reads actual temperature at the PPC
Memory	Local memory	■ 32 MB application SDRAM as program memory, cached
	Global memory	■ 96 MB communication SDRAM for data storage and data exchange with host
Timer	2 general-purpose timers	■ One 32-bit down counter ■ Reload by software ■ 15-ns resolution
		■ One 32-bit up counter with compare register ■ Reload by software ■ 30-ns resolution
	1 sampling rate timer (decrementer)	■ 32-bit down counter ■ Reload by software ■ 30-ns resolution
	1 time base counter	■ 64-bit up counter ■ 30-ns resolution
Interrupt controller		<ul style="list-style-type: none"> ■ 3 timer interrupts ■ 7 incremental encoder index line interrupts ■ 1 UART (universal asynchronous receiver and transmitter) interrupt ■ 1 CAN interrupt ■ 1 slave DSP interrupt ■ 2 slave DSP PWM interrupts ■ 1 host interrupt ■ 4 external interrupts (user interrupts)
A/D converter	Channels	<ul style="list-style-type: none"> ■ 16 multiplexed channels equipped with 4 sample & hold A/D converters (4 channels belong to one A/D converter. 4 consecutive samplings are necessary to sample all channels belonging to one A/D converter.) ■ 4 parallel channels each equipped with one sample & hold A/D converter ■ Note: 8 A/D converter channels (4 multiplexed and 4 parallel) can be sampled simultaneously.
	Resolution	■ 16-bit
	Input voltage range	■ ± 10 V
	Overvoltage protection	■ ± 15 V
	Conversion time	<ul style="list-style-type: none"> ■ Multiplexed channels: 1 μs¹⁾ ■ Parallel channels: 800 ns¹⁾
	Offset error	■ ± 5 mV
	Gain error	■ $\pm 0.25\%$
	Offset drift	■ 40 μ V/K
	Gain drift	■ 50 ppm/K
	Signal-to-noise ratio	■ >83 dB
D/A converter	Channels	■ 8 channels
	Resolution	■ 16-bit
	Output range	■ ± 10 V
	Settling time	■ 5 μ s (14-bit)
	Offset error	■ ± 1 mV
	Gain error	■ $\pm 0.5\%$
	Gain drift	■ 25 ppm/K

Parameter		Specification
D/A converter	Signal-to-noise ratio	■ >83 dB
	I_{max}	■ ± 5 mA
	$C_{l,max}$	■ 10 nF
Digital I/O	Channels	<ul style="list-style-type: none"> ■ 32-bit parallel I/O ■ Organized in four 8-bit groups ■ Each 8-bit group can be set to input or output (programmable by software)
	Voltage range	■ TTL input/output levels
	$I_{out,max}$	■ ± 10 mA
Digital incremental encoder interface	Channels	<ul style="list-style-type: none"> ■ 6 independent channels ■ Single-ended (TTL) or differential (RS422) input (software programmable for each channel)
	Position counters	<ul style="list-style-type: none"> ■ 24-bit resolution ■ Max. 1.65 MHz input frequency, i.e., fourfold pulse count up to 6.6 MHz ■ Counter reset or reload via software
	Encoder supply voltage	<ul style="list-style-type: none"> ■ 5 V/1.5 A ■ Shared with analog incremental encoder interface
Analog incremental encoder interface	Channels	<ul style="list-style-type: none"> ■ 1 channel ■ Sinusoidal signals: 1 V_{pp} differential or 11 μApp differential (software programmable)
	Position counters	<ul style="list-style-type: none"> ■ < 5° resolution ■ 32-bit loadable position counter ■ Max. 0.6 MHz input frequency, i.e., fourfold pulse count up to 2.4 MHz
	A/D converter performance	<ul style="list-style-type: none"> ■ 6-bit resolution ■ 10 MSPS
	Encoder supply voltage	<ul style="list-style-type: none"> ■ 5 V/1.5 A ■ Shared with digital incremental encoder interface
CAN interface	Configuration	<ul style="list-style-type: none"> ■ 1 channel based on SAB 80C164 microcontroller ■ ISO DIS 11898-2 CAN high-speed standard
	Baud rate	■ Max. 1 Mbit/s
Serial interface	Configuration	<ul style="list-style-type: none"> ■ TL6C550C single UART with FIFO ■ PLL-driven UART for accurate baud rate selection ■ RS232/RS422 compatibility
	Baud rate	<ul style="list-style-type: none"> ■ Up to 115.2 kBd (RS232) ■ Up to 1 Mbd (RS422)
Slave DSP	Type	■ Texas Instruments TMS320F240 DSP
	Clock rate	■ 20 MHz
	Memory	<ul style="list-style-type: none"> ■ 64Kx16 external code memory ■ 28Kx16 external data memory ■ 4Kx16 dual-port memory for communication ■ 32 KB flash memory
	I/O channels	<ul style="list-style-type: none"> ■ 16 A/D converter inputs ■ 10 PWM outputs ■ 4 capture inputs ■ 2 serial ports
	Input voltage range	<ul style="list-style-type: none"> ■ TTL input/output level ■ A/D converter inputs: 0 ... 5 V
	Output current	■ Max. ± 13 mA
Host interface		<ul style="list-style-type: none"> ■ Plug & Play support ■ Requires a full-size 16-bit ISA slot
Physical characteristics	Physical size	■ 340 x 125 x 45 mm (13.4 x 4.9 x 1.77 in)
	Ambient temperature	■ 0 ... 50 °C (32 ... 122 °F)
	Cooling	■ Passive cooling
	Power supply	<ul style="list-style-type: none"> ■ +5 V $\pm 5\%$, 4 A ■ +12 V $\pm 5\%$, 0.75A ■ -12 V $\pm 5\%$, 0.25A

Product	Order Number
DS1103 PPC Controller Board	■ DS1103

Relevant Software and Hardware

Software	Order Number	
Included	■ DS1103 Real-Time Library	–
	■ Experiment and Platform Manager for hardware management	–
Required	■ Real-Time Interface (RTI)	■ RTI
	■ Microtec C Compiler for PowerPC	■ CCPPPC
Optional	■ Real-Time Interface CAN Blockset	■ RTICAN_BS
	■ ControlDesk Standard – Developer Version	■ CS_D
	■ ControlDesk Standard – Operator Version	■ CS_O
	■ MLIB/MTRACE	■ MLIB/MTRACE
	■ CLIB	■ CLIB
	■ MotionDesk	■ MotionDesk

Hardware	Order Number	
Optional	■ Connector Panel	■ CP1103
	■ Connector/LED Combi Panel	■ CLP1103

ADC Unit

The master PPC on the DS1103 controls an ADC unit featuring two different types of A/D converters:

- 4 parallel A/D converters (ADC1 ... ADC4), multiplexed to 4 channels each (signals ADCH1 ... ADCH16). The input signals of each converter are selected by a 4:1 input multiplexer. The A/D converters have the following characteristics:
 - 16-bit resolution
 - ± 10 V input voltage range
 - ± 5 mV offset error
 - $\pm 0.25\%$ gain error
 - > 83 dB (at 10 kHz) signal-to-noise ratio (SNR) (since board revision DS1103-09)
- 4 parallel A/D converters (ADC5 ... ADC8) with one channel each (signals ADCH17 ... ADCH20). The A/D converters have the following characteristics:
 - 16-bit resolution (since board revision DS1103-09)
 - ± 10 V input voltage range
 - ± 5 mV offset error
 - $\pm 0.25\%$ gain error (since board revision DS1103-09)
 - > 83 dB (at 10 kHz) signal-to-noise ratio (SNR) (since board revision DS1103-09)

You can also use the ADC unit of the slave DSP. Refer to *Slave DSP ADC Unit* on page 46.

Measured Execution Times

Execution times are available for the following RTLib units:

- *ADC unit* on page 311
- *DAC unit* on page 312
- *Incremental Encoder Interface* on page 312
- *Digital I/O* on page 313
- *Trigger functions* on page 313

ADC unit

The following execution times have been measured for the functions of the ADC unit:

Function	Execution time (in μs)
ds1103_adc_start	0.06
ds1103_adc_delayed_start	1.10
ds1103_adc_mux_all	0.27
ds1103_adc_mux	0.24
ds1103_adc_read_all	1.00
ds1103_adc_multi_conv_read	5.40
ds1103_adc_trigger_setup	0.24

Function	Execution time (in μs)	
	mux	non-mux
ds1103_adc_read_conv	0.30	0.27
ds1103_adc_read_ch	0.30	0.30
ds1103_adc_read2	0.45	0.60



The execution times of the read functions do not include the conversion time.

Master PPC

DAC unit

The following execution times have been measured for the functions of the DAC unit:

Function	Execution time (in μs)
ds1103_dac_init	0.78
ds1103_dac_reset	0.27
ds1103_dac_write	0.09
ds1103_dac_write2	0.09
ds1103_dac_strobe	0.06
ds1103_dac_trigger_setup	0.24

Slave DSP Square-Wave Signal Measurement (F2D)

The slave DSP provides input channels for the measurement of the frequencies of up to four square-wave signals.

Minimum frequency

For each of the four input channels, you can specify a minimum frequency in the range 5 mHz ... 150 Hz. If the frequency of the corresponding input channel is smaller than the minimum frequency, the square-wave signal measurement will return a value of 0 Hz.

Maximum frequency and resolution

The maximum frequency that can be measured depends on the number of channels used for F2D:

Number of Channels	Maximum Frequency	Resolution
1	80 kHz	50 ns
2	40 kHz	50 ns
3	25 kHz	50 ns
4	20 kHz	50 ns



- Due to quantization effects, you will encounter deviations between the input frequency and the measured frequency value, especially for higher input frequencies.
- If the input frequency exceeds these ranges, the measurement will be faulty.
- If you perform 3-phase PWM or PWMSV generation at the same time, there may be measurement faults for F2D, even in lower frequency ranges.

RTI/RTLib support

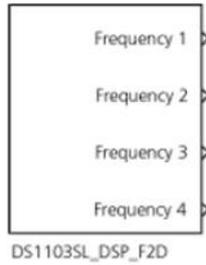
You can perform square-wave signal measurement on the slave DSP via RTI1103 and RTLib1103. For details, see

- DS1103SL_DSP_F2D in the *DS1103 RTI Reference*
- Square Wave Signal Generation (D2F) in the *DS1103 RTLib Reference*

Connecting external devices

For a circuit diagram and information on the electrical characteristics and signal conditioning of the timing I/O unit, see *Slave DSP Bit I/O* ( *DS1103 Hardware Installation and Configuration*).

DS1103SL_DSP_F2D



Purpose	To measure the frequency of square wave signals on up to 4 independent channels.
I/O mapping	For information on the I/O mapping, refer to <i>Slave DSP Square-Wave Signal Measurement (F2D)</i> (DS1103 Features).



The I/O mapping of this block can conflict with other I/O features. For further information, refer to *Conflicting I/O Features* ([DS1103 Features](#)).

block outputs the signal frequency specified in Hz. For information on the ranges for frequency measurement, refer to *Slave DSP Square-Wave Signal Measurement (F2D)* ([DS1103 Features](#)).



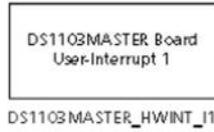
- The values of the maximum frequency depend on the number of used channels.
- When exceeding these ranges the measurement may be faulty.
- When using other interrupt-based functions at the same time – for example: square wave signal generation (D2F) – there may be measurement faults even in lower frequency ranges.

Dialog pages	The dialog settings can be specified on the following pages: <ul style="list-style-type: none">■ <i>Range Page (DS1103SL_DSP_F2D)</i> on page 108
Related RTLib functions	ds1103_slave_dsp_communication_init, ds1103_slave_dsp_f2d_init, ds1103_slave_dsp_f2d_read_register, ds1103_slave_dsp_f2d_read_request, ds1103_slave_dsp_f2d_read

Range Page (DS1103SL_DSP_F2D)

Purpose	To specify the frequency limit for zero detection.
Dialog settings	Lower limit for zero detection Lets you specify the frequency limit for zero detection of the input signal. Smaller frequencies will cause a block output of zero. Value is given in Hz. It can be selected for each channel. The values must be given within the range 0.005 ... 150 Hz.

DS1103MASTER_HWINT_Ix



Purpose

To make the hardware interrupts of the DS1103 board available as trigger sources in a block diagram.

 Do not use the encoder index detection interrupt from the MASTER_HWINT_Ix block and the ENC_HW_INDEX_Cx or the ENC_SW_INDEX_Cx block for the same channel at the same time, because this leads to an incorrect encoder index detection of the ENC_HW_INDEX_Cx blocks.

I/O mapping

For information on the I/O mapping, refer to *Interrupts Provided by the DS1103* ( [DS1103 Features](#)).

 The I/O mapping of this block can conflict with other I/O features. For further information, refer to *Conflicting I/O Features* ( [DS1103 Features](#)).

Unit Page (DS1103MASTER_HWINT_Ix)

Purpose

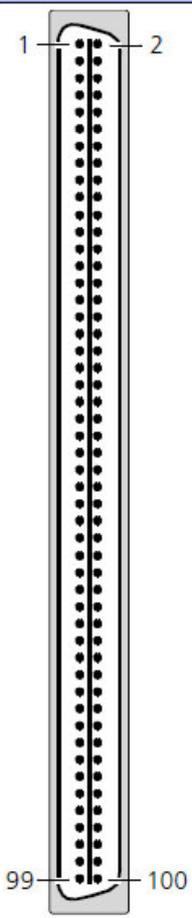
To specify the interrupt source.

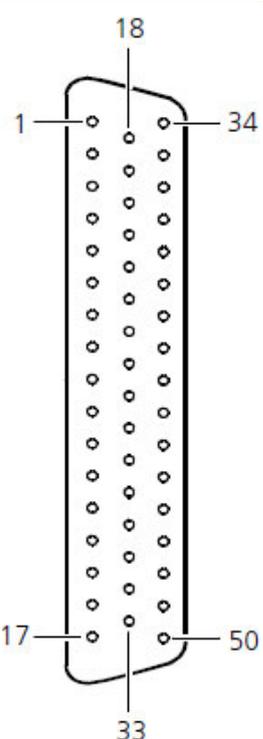
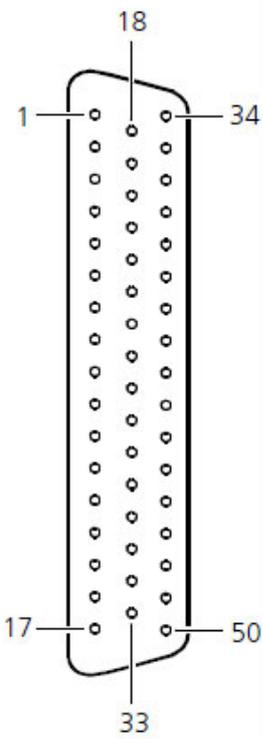
Dialog settings

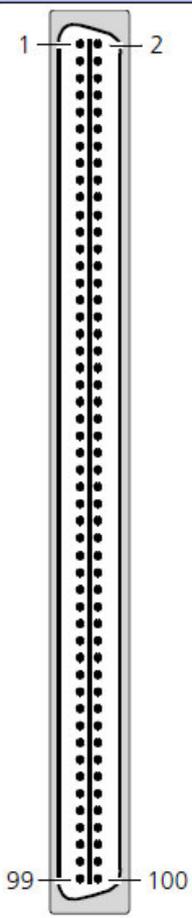
Interrupt Select the type of the interrupt source.

To feed an external interrupt signal into your system, 4 user interrupts are available. Additionally, for each of the 7 encoder position counters, an interrupt on index found is available. You can also access the host interrupt with this block.

No	Interrupt Type	DS1103 Board I/O Connector	DS1103 Panel I/O Connector
1	User interrupt 0	P2.INT0	INT0
2	User interrupt 1	P2.INT1	INT1
3	User interrupt 2	P2.INT2	INT2
4	User interrupt 3	P2.INT3	INT3
5	—	—	—
6	Host interrupt	—	—
7	Encoder index channel 1	P3.IDX(1)	INC1
8	Encoder index channel 2	P3.IDX(2)	INC2
9	Encoder index channel 3	P3.IDX(3)	INC3
10	Encoder index channel 4	P3.IDX(4)	INC4
11	Encoder index channel 5	P3.IDX(5)	INC5
12	Encoder index channel 6	P3.IDX(6)	INC6
13	Encoder index channel 7	P3.IDX(7)	INC7

Connector (P1)	Pin	Sub-D Pin	Signal	Pin	Sub-D Pin	Signal	
	P1 1	P1B 1	GND	P1 2	P1A 1	GND	
	P1 3	P1B 34	ADCH1	P1 4	P1A 34	ADCH2	
	P1 5	P1B 18	GND	P1 6	P1A 18	GND	
	P1 7	P1B 2	ADCH3	P1 8	P1A 2	ADCH4	
	P1 9	P1B 35	GND	P1 10	P1A 35	GND	
	P1 11	P1B 19	ADCH5	P1 12	P1A 19	ADCH6	
	P1 13	P1B 3	GND	P1 14	P1A 3	GND	
	P1 15	P1B 36	ADCH7	P1 16	P1A 36	ADCH8	
	P1 17	P1B 20	GND	P1 18	P1A 20	GND	
	P1 19	P1B 4	ADCH9	P1 20	P1A 4	ADCH10	
	P1 21	P1B 37	GND	P1 22	P1A 37	GND	
	P1 23	P1B 21	ADCH11	P1 24	P1A 21	ADCH12	
	P1 25	P1B 5	GND	P1 26	P1A 5	GND	
	P1 27	P1B 38	ADCH13	P1 28	P1A 38	ADCH14	
	P1 29	P1B 22	GND	P1 30	P1A 22	GND	
	P1 31	P1B 6	ADCH15	P1 32	P1A 6	ADCH16	
	P1 33	P1B 39	GND	P1 34	P1A 39	GND	
	P1 35	P1B 23	ADCH17	P1 36	P1A 23	ADCH18	
	P1 37	P1B 7	GND	P1 38	P1A 7	GND	
	P1 39	P1B 40	ADCH19	P1 40	P1A 40	ADCH20	
	P1 41	P1B 24	GND	P1 42	P1A 24	GND	
	P1 43	P1B 8	GND	P1 44	P1A 8	GND	
	P1 45	P1B 41	GND	P1 46	P1A 41	GND	
	P1 47	P1B 25	DACH1	P1 48	P1A 25	DACH2	
	P1 49	P1B 9	GND	P1 50	P1A 9	GND	
	P1 51	P1B 42	DACH3	P1 52	P1A 42	DACH4	
	P1 53	P1B 26	GND	P1 54	P1A 26	GND	
	P1 55	P1B 10	DACH5	P1 56	P1A 10	DACH6	
	P1 57	P1B 43	GND	P1 58	P1A 43	GND	
		P1 59	P1B 27	DACH7	P1 60	P1A 27	DACH8
		P1 61	P1B 11	GND	P1 62	P1A 11	GND
		P1 63	P1B 44	GND	P1 64	P1A 44	GND
		P1 65	P1B 28	GND	P1 66	P1A 28	GND
		P1 67	P1B 12	SADCH1	P1 68	P1A 12	SADCH2
		P1 69	P1B 45	GND	P1 70	P1A 45	GND
		P1 71	P1B 29	SADCH3	P1 72	P1A 29	SADCH4
		P1 73	P1B 13	GND	P1 74	P1A 13	GND
		P1 75	P1B 46	SADCH5	P1 76	P1A 46	SADCH6
		P1 77	P1B 30	GND	P1 78	P1A 30	GND
		P1 79	P1B 14	SADCH7	P1 80	P1A 14	SADCH8
		P1 81	P1B 47	GND	P1 82	P1A 47	GND
		P1 83	P1B 31	SADCH9	P1 84	P1A 31	SADCH10
		P1 85	P1B 15	GND	P1 86	P1A 15	GND
		P1 87	P1B 48	SADCH11	P1 88	P1A 48	SADCH12
		P1 89	P1B 32	GND	P1 90	P1A 32	GND
		P1 91	P1B 16	SADCH13	P1 92	P1A 16	SADCH14
		P1 93	P1B 49	GND	P1 94	P1A 49	GND
		P1 95	P1B 33	SADCH15	P1 96	P1A 33	SADCH16
		P1 97	P1B 17	GND	P1 98	P1A 17	GND
		P1 99	P1B 50	SADCSOC	P1 100	P1A 50	GND

Connector P1B	Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND			34	ADCH1
	2	ADCH3	18	GND	35	GND
	3	GND	19	ADCH5	36	ADCH7
	4	ADCH9	20	GND	37	GND
	5	GND	21	ADCH11	38	ADCH13
	6	ADCH15	22	GND	39	GND
	7	GND	23	ADCH17	40	ADCH19
	8	GND	24	GND	41	GND
	9	GND	25	DACH1	42	DACH3
	10	DACH5	26	GND	43	GND
	11	GND	27	DACH7	44	GND
	12	SADCH1	28	GND	45	GND
	13	GND	29	SADCH3	46	SADCH5
	14	SADCH7	30	GND	47	GND
	15	GND	31	SADCH9	48	SADCH11
	16	SADCH13	32	GND	49	GND
	17	GND	33	SADCH15	50	SADCSOC
Connector P2B	Pin	Signal	Pin	Signal	Pin	Signal
	1	GND			34	GND
	2	IO2	18	IO0	35	GND
	3	IO6	19	IO4	36	GND
	4	IO10	20	IO8	37	GND
	5	IO14	21	IO12	38	GND
	6	IO18	22	IO16	39	GND
	7	IO22	23	IO20	40	GND
	8	IO26	24	IO24	41	GND
	9	IO30	25	IO28	42	GND
	10	STMRDIR	26	STINT1	43	GND
	11	ST3PWM	27	ST1PWM	44	GND
	12	SPWM3	28	SPWM1	45	SPWM5
	13	SPWM9	29	SPWM7	46	GND
	14	SCAP3	30	SCAP1	47	GND
	15	SSCLK	31	SXF	48	SSIMO
	16	$\overline{\text{INT0}}$	32	GND	49	$\overline{\text{INT2}}$
	17	VCC1 (+ 5 V)	33	VCC1 (+ 5 V)	50	GND

Connector (P2)	Pin	Sub-D Pin	Signal	Pin	Sub-D Pin	Signal	
	P2 1	P2B 1	GND	P2 2	P2A 1	GND	
	P2 3	P2B 34	GND	P2 4	P2A 34	GND	
	P2 5	P2B 18	IO0	P2 6	P2A 18	IO1	
	P2 7	P2B 2	IO2	P2 8	P2A 2	IO3	
	P2 9	P2B 35	GND	P2 10	P2A 35	GND	
	P2 11	P2B 19	IO4	P2 12	P2A 19	IO5	
	P2 13	P2B 3	IO6	P2 14	P2A 3	IO7	
	P2 15	P2B 36	GND	P2 16	P2A 36	GND	
	P2 17	P2B 20	IO8	P2 18	P2A 20	IO9	
	P2 19	P2B 4	IO10	P2 20	P2A 4	IO11	
	P2 21	P2B 37	GND	P2 22	P2A 37	GND	
	P2 23	P2B 21	IO12	P2 24	P2A 21	IO13	
	P2 25	P2B 5	IO14	P2 26	P2A 5	IO15	
	P2 27	P2B 38	GND	P2 28	P2A 38	GND	
	P2 29	P2B 22	IO16	P2 30	P2A 22	IO17	
	P2 31	P2B 6	IO18	P2 32	P2A 6	IO19	
	P2 33	P2B 39	GND	P2 34	P2A 39	GND	
	P2 35	P2B 23	IO20	P2 36	P2A 23	IO21	
	P2 37	P2B 7	IO22	P2 38	P2A 7	IO23	
	P2 39	P2B 40	GND	P2 40	P2A 40	GND	
	P2 41	P2B 24	IO24	P2 42	P2A 24	IO25	
	P2 43	P2B 8	IO26	P2 44	P2A 8	IO27	
	P2 45	P2B 41	GND	P2 46	P2A 41	GND	
	P2 47	P2B 25	IO28	P2 48	P2A 25	IO29	
	P2 49	P2B 9	IO30	P2 50	P2A 9	IO31	
	P2 51	P2B 42	GND	P2 52	P2A 42	GND	
	P2 53	P2B 26	STINT1	P2 54	P2A 26	STINT2	
	P2 55	P2B 10	STMTRDIR	P2 56	P2A 10	STMTRCLK	
	P2 57	P2B 43	GND	P2 58	P2A 43	GND	
	P2 59	P2B 27	ST1PWM	P2 60	P2A 27	ST2PWM	
	P2 61	P2B 11	ST3PWM	P2 62	P2A 11	SPDPINT	
	P2 63	P2B 44	GND	P2 64	P2A 44	GND	
		P2 65	P2B 28	SPWM1	P2 66	P2A 28	SPWM2
		P2 67	P2B 12	SPWM3	P2 68	P2A 12	SPWM4
		P2 69	P2B 45	SPWM5	P2 70	P2A 45	SPWM6
		P2 71	P2B 29	SPWM7	P2 72	P2A 29	SPWM8
		P2 73	P2B 13	SPWM9	P2 74	P2A 13	GND
		P2 75	P2B 46	GND	P2 76	P2A 46	GND
		P2 77	P2B 30	SCAP1	P2 78	P2A 30	SCAP2
		P2 79	P2B 14	SCAP3	P2 80	P2A 14	SCAP4
		P2 81	P2B 47	GND	P2 82	P2A 47	GND
		P2 83	P2B 31	SXF	P2 84	P2A 31	SBIO
		P2 85	P2B 15	SSCLK	P2 86	P2A 15	SSTE
		P2 87	P2B 48	SSIMO	P2 88	P2A 48	SSOMI
		P2 89	P2B 32	GND	P2 90	P2A 32	GND
		P2 91	P2B 16	$\overline{\text{INT0}}$	P2 92	P2A 16	$\overline{\text{INT1}}$
		P2 93	P2B 49	$\overline{\text{INT2}}$	P2 94	P2A 49	$\overline{\text{INT3}}$
		P2 95	P2B 33	VCC1 (+ 5 V)	P2 96	P2A 33	VCC1 (+ 5 V)
		P2 97	P2B 17	VCC1 (+ 5 V)	P2 98	P2A 17	VCC1 (+ 5 V)
		P2 99	P2B 50	GND	P2 100	P2A 50	GND

A.5 Matlab-Programm

```

% Auswertungsprogramm für dem Klopfmotor
% BA/MA
% 24.04.2021

clear all;
close all;

dateiname_xls = 'klopfmotor1.xlsx';
[kw1] = xlsread([dateiname_xls], 'klopfmotor1', 'A17:A736');
[pz1] = xlsread([dateiname_xls], 'klopfmotor1', 'B17:B736');

kw = transpose (kw1); % Kurbelwinkel in °KW
kw2 = kw+275; % Offsetverschiebung
for i =1:1:length(kw2)
    if kw2(i)>720
        kw2(i)=kw2(i)-720;
    end
end

pz = transpose (pz1); % druck in bar
D = 0.08255; % Bohrung in m
r = 0.05715; % Kurbelradius in m
S = 2 * r; % Kolbenhub in m
AK = pi / 4 * D^2; % Kolbenstirnfläche in m^2
Vh = AK * S; % Hubvolumen eines Zylinders
Vc = 5.0978e-5; % Schadraum m^3
L = 254e-3; % Pleuellänge in m
n = 600; % Umdrehung in 1/Min
i = 0.5; % Motor Taktzahl [-]
Lam = r / L; % Pleuelstangeverhältnis der A-Reihe
a = kw2 ; % Kurbelwinkel in °KW
rad = (1/180)*pi; % rad
arad = a * rad; % Kurbelwinkel in Radiant
sK = r * (1 - cos(arad) + Lam / 4 * (1 - cos(2 * arad))); % Kolbenweg
Vz = (Vc + AK * sK);

%In dieser Funktion wird der Heizverlauf nach Hohenberg berechnet.
R = 287 ; % Gaskonstante in [J/Kg*K]
cv = 717 ; % spez.isochoore Wärmekapazität in
istart = 1 ;
iende = 720 ;

Qh (1) = 0;
for i = 1:1:length(pz)
    if i < length(pz)
        dkw = kw2 (i+1)- kw2 (i);
        dQh(i) = (cv/R*Vz(i+1)*(pz(i+1)*1e5-pz(i)*1e5*(Vz(i)/Vz(i+1))^(R/cv-1)));
    else
        dQh(i) = 0;
    end
    if i > 1
        Qh(i) = Qh(i-1) + dQh(i);
    end
end

figure(1), set(gcf, 'Position', [3 467 560 664])
subplot(211), plot(kw2, pz, 'r.', 'LineWidth',2), grid, ylabel('pz in bar')
xlabel('\phi in °KW')
title(['pz-phi / Vz-phi Diagrammen aus dem Versuch Klopfmotor'], 'Interpreter')
subplot(212), plot(kw2, Vz, 'b.', 'LineWidth',2), grid, ylabel('Vz in cm^3')
xlabel('\phi in °KW')

figure(2), set(gcf, 'Position', [574 467 560 664])
subplot(211), plot(Vz, pz, 'r', 'LineWidth',2), grid, ylabel('pz in bar')
xlabel('Vz in cm^3')
title(['pz-Vz / Qh-phi Diagrammen aus dem Versuch Klopfmotor'], 'Interpreter')
subplot(212), plot(kw2, Qh, 'b', 'LineWidth',2), grid, ylabel('Qh in J')
xlabel('\phi in °KW')

```



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: mehdi _____

Vorname: Ajideh _____

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

<<< Ertüchtigung und Erprobung eines fremdgezündeten Sonderottomotors für die Zylinderdruckindizierung beim Betrieb mit alternativen Kraftstoffen >>>

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

12.05.2021

Ort

Datum

Unterschrift im Original