

Fachhochschule Bochum
Fachbereich 4 – Mechatronik und Maschinenbau
Studienrichtung Konstruktionstechnik

Diplomarbeit

Druckverlaufsanalyse und Ersatzbrennverlauf in Excel.

Verfasst von Stefan Degener

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Do für die Betreuung während dieser Abschlussarbeit und Herrn Prof. Dr.-Ing. Beese für die Bereitschaft die Aufgabe des Zweitprüfers zu übernehmen.

Weiterhin gilt mein Dank Frau Katrin Berlet für die mentale Unterstützung während der Diplomarbeitsphase und die sowohl sprachliche Korrektur als auch für orthografische Hilfen.

Ebenso bedanke ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Stefan Stork, Kai Dudek und Jürgen Fellmer für hilfreiche Anregungen im Bereich Text- und Graphikbearbeitung.

Inhaltsverzeichnis

1. <u>Einleitung</u>	3
1.1 Der Dieselmotor – Historisches	5
2. <u>Druckverlaufsanalyse</u>	7
2.1 Der Motor - technische Grundlagen	7
2.1.1 Geometrische Daten.....	8
2.1.2 Kinematische Daten.....	10
2.1.3 Motorkenngrößen.....	11
2.1.4 Verbrennung	14
2.2 Thermodynamische Grundlagen	17
2.2.1 Idealprozeßrechnung	18
2.2.2 Realprozeßrechnung	19
2.3 Der Brennverlauf	24
2.4 Vibe Ersatzbrennverlauf	27
3. <u>Datenverarbeitende Grundlagen</u>	33
3.1 Excel	33
3.1.1 Makros	33
3.1.2 Visual Basic for Applications	33
3.2 Der Solver	36
4. <u>Programmaufbau</u>	39
4.1 Module	39
4.1.1 Main1	39
4.1.2 Main2	41
4.1.3 Outro.....	43
4.1.4 Vibe.....	44
4.2 Programmstruktur – Gesamter Überblick	45
4.2.1 Microsoft Excel Objekte	45
4.2.2 Formulare	45
4.2.3 Module	47

5. <u>Anleitung</u>	51
5.1 Die Arbeitsmappe ‚Druckverlaufsanalyse‘	53
5.2 Approximation	56
6. <u>Auswertung</u>	57
7. <u>Bibliographie</u>	59
8. <u>Anhang</u>	62
8.1 Abbildungsverzeichnis.....	62
8.2 Verwendete Formelzeichen.....	63
8.3 Programmcode.....	65
8.4 Variablenliste.....	102

1. Einleitung

Um Zeit und Kosten für die Prototyp- und Serienentwicklung zu sparen, ist es bei der Neuentwicklung eines Motors von großer Bedeutung, möglichst früh das spätere Verhalten des Motors abschätzen zu können. Der reale Arbeitsprozess einer Kolbenverbrennungsmaschine ist ein komplizierter thermodynamischer Vorgang, der besonders stark durch instationäres Verhalten der beteiligten Größen gekennzeichnet wird. Der Brennverlauf gibt Aufschluss über die Vorgänge im Inneren des Zylinders. Mit der Kenntnis des Brennverlaufs ist es möglich, die Verbrennung innerhalb einer Modellvorstellung zu beschreiben. Geht man von einem gemittelten Druck und einer gemittelten Temperatur aus, d.h. keine örtlichen Unterschiede innerhalb des Brennraums, spricht man vom „*Einzonenmodell*“. Diese Modellvorstellung setzt vollständige und sofortige Mischung der Zylinderladung voraus, die somit unabhängig vom Ort im Zylinder ist und als homogen betrachtet werden kann. Beim „*Zweizonenmodell*“ hingegen werden örtliche Unterschiede, wie z.B. Temperaturunterschiede, dadurch berücksichtigt, dass der Brennraum in eine Zone mit verbrannter und eine Zone mit unverbrannter Ladungsmasse unterteilt wird. Für Berechnungen in denen die Temperaturunterschiede eine große Rolle spielen, z.B. bei Berücksichtigung von Abgasemissionen, würde das Einzonenmodell die Ergebnisse zu stark verfälschen¹. Das Einzonenmodell liefert jedoch schon genügend genaue Ergebnisse und wird in vorliegender Arbeit verwendet.

Aufschluss über die Vorgänge im Brennraum gibt die Zylinderdruckindizierung. Für diese Messungen werden überwiegend piezoelektrische Druckaufnehmer verwendet². Ist der Zylinderdruckverlauf bekannt, kann über die Energiegleichung der Brennverlauf bestimmt werden. Üblicherweise verwendet man nicht den aus der Druckverlausanalyse bekannten Brennverlauf, sondern eine einfache mathematische Funktion, den Ersatzbrennverlauf. Der sowjetische Professor *I.I. Vibe* hat aufgrund der

¹ Kraßnig, G.: Prozessrechnung am realen Motor, 1989, S.250

² Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.36

Überlegung, dass die Verbrennung eines Kohlenwasserstoffs eine typische Kettenreaktion ist, ein Rechenmodell aufgestellt, welches die sogenannte Umsetzrate mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschreibt³. Die Differenzierung dieser Funktion ergibt den Ersatzbrennverlauf und durch Optimierung der beteiligten Parameter kann dieser den aus der Druckverlafsanalyse bekannten Brennverlauf gut wiedergeben.

Die heutigen Möglichkeiten der Datenverarbeitung vereinfachen die Durchführung einer Druckverlafsanalyse um ein Vielfaches. Benötigt man für die umfangreichen Berechnungen des Verbrennungsablaufes von Hand ca. 2 Tage⁴, so verkürzt sich der Vorgang mit Hilfe der Datenverarbeitung auf wenige Sekunden. Durch die Vielfältigkeit der heute angebotenen Programmiersprachen, Programmiereditoren und fertiger Kalkulationssoftware bieten sich dem Anwendungsentwickler eine Fülle von Auswahlmöglichkeiten zur Realisierung entsprechender Problemlösungen. Für vorliegende Arbeit bietet Excel 2000 eine gute Kombination aus den oben genannten Auswahlmöglichkeiten:

- Tabellenkalkulation mit Rechenfunktionen.
- Die Integrierung von Visual Basic ermöglicht die Programmierung von Anwendungen.
- Editorähnliche Programmieroberfläche.

Einen weiteren Vorteil bietet die Plattformunabhängigkeit⁵ und die relativ leichte Erlernbarkeit von Visual Basic.

³ Vibe, I.I.: Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren, 1970, S.43

⁴ Lange, W.; Woschni, G.: Thermodynamische Auswertung von Indikator-Diagrammen, elektronisch gerechnet, MTZ 25/7, 1964, S.286

⁵ Unabhängig vom Betriebs- und Computersystem.

1.1 Der Dieselmotor – Historisches

Vor gut einem Jahrhundert, am 27. Februar 1892, meldete der Ingenieur Rudolf Diesel seinen "Dieselmotor" beim Kaiserlichen Patentamt zu Berlin zum Patent an. Das Ziel, welches er seit seiner Studienzeit verfolgte, rückte mit dem erteilten Patent, datiert auf den 28. Februar 1892, am 23. Februar 1893 näher.

Rudolf Diesel wurde am 18. März 1858 in Paris geboren, studierte am Polytechnikum München, der späteren Technischen Hochschule, Maschinenbau und erhielt dort die Anregung zur Konstruktion einer Wärmekraftmaschine mit möglichst hohem Wirkungsgrad. So entwickelte er in den Jahren 1893 bis 1897 in Zusammenarbeit mit der Maschinenfabrik Augsburg und der Firma F. Krupp den Dieselmotor. Er baute mit ihnen den ersten Kleindieselmotor, sowie Dieselmotoren für Lastwagen und Lokomotiven. 1907 gründete Rudolf Diesel eine Gesellschaft für Thermo-Lokomotiven, und 1913 unternahm er eine Probefahrt mit der ersten 1000 PS Großdiesellok für die Preußischen Staatseisenbahnen. Im Ausland geehrt, im Inland in Auseinandersetzungen verwickelt und zu stolz, Fehlspukulationen und Irrtümer einzustehen, setzte Rudolf Diesel auf der Überfahrt von Antwerpen nach Harwich seinem Leben vermutlich selbst ein Ende.

Rudolf Diesel war der Meinung, dass der Wirkungsgrad der seit 1867 bekannten Ottomotoren nicht zufriedenstellend genug war.

Moderne Dieselmotoren erreichen einen Wirkungsgrad von 46% und sind in der Energieausnutzung den Ottomotoren weit überlegen. So bezieht sich auch das Patent von Diesel auf die "Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors", denn immerhin verfügten schon die ersten Dieselmotoren über einen wesentlich besseren Wirkungsgrad als die im Vergleich schon länger bekannten Ottomotoren. Ein Dieselmotor konnte bereits etwa ein Drittel der aufgewandten Energie in Arbeit umsetzen. Doch nicht nur Diesel nahm sich diesem Prinzip an, sondern auch andere Maschinenbauer, und so gab es in den ersten Jahrzehnten der Dieselgeschichte berühmte Firmen wie "Deutz", "MWM" und "Colo", die sich

ebenfalls mit dem Bau und der Konstruktion von Dieselaggregaten, sowie deren weiterer Entwicklung befassten.

Die physikalische Arbeitsweise unterscheidet sich grundsätzlich nicht vom Ottomotor. Es findet hier die Umwandlung von chemischer Energie (Treibstoff) über die Wärmeenergie (Verbrennung) in mechanische Energie (Fortbewegung) statt. Die Hauptunterschiede zum Ottomotor bestehen in der Gemischbildung und in der Art der Zündung (Selbstzündung). Dieselmotoren haben im Gegensatz zu Benzinmotoren keine Zündanlage. Aufgrund ihrer Funktionsweise benötigen sie aber immer eine Einspritzanlage. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Art der Luft-Kraftstoff-Gemischbildung. Beim Dieselmotor wird die innere Gemischbildung verwendet.



Abbildung 1.1: Erster Dieselmotor, entwickelt 1893 – 1897 in Augsburg⁶.

⁶ Diesel, R.: Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors, Reprint 1986

2. Druckverlaufsanalyse

2.1 Der Motor – technische Grundlagen

Bei einem Dieselmotor handelt es sich einfach ausgedrückt um einen Energiewandler, der durch Verbrennung eines Kraftstoffgemisches chemisch gebundene Energie in mechanische Energie umwandelt. Die durch die Verbrennung freigesetzte Wärme wird einem thermodynamischen Kreisprozess zugeführt und als Druck-Volumen-Arbeit genutzt.

Im Gegensatz zum Ottomotor findet die Gemischbildung im Inneren des Zylinders statt. Über die Einlassventile wird lediglich Frischluft angesaugt und verdichtet. Gegen Ende des Verdichtungstaktes wird der Kraftstoff in den Brennraum gespritzt und bildet mit der hochkomprimierten und erhitzten Luft ein selbstzündendes Gemisch. Um diese Selbstzündung zu ermöglichen, sollten Dieselkraftstoffe möglichst zündwillig sein. Auskunft hierüber gibt die Cetan-Zahl. Dieser Wert wird durch einen Vergleich von Cetan $C_{16}H_{34}$ (zündwillig) und α -Methylnaphtalin $C_{11}H_{10}$ (zündunwillig) unter genormten Betriebsbedingungen ermittelt⁷.

⁷ Pischinger, R.: Thermodynamische Grundlagen. In: List, H.; Pischinger, A.[Hrsg]: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 1989, S.44

2.1.1 Geometrische Daten

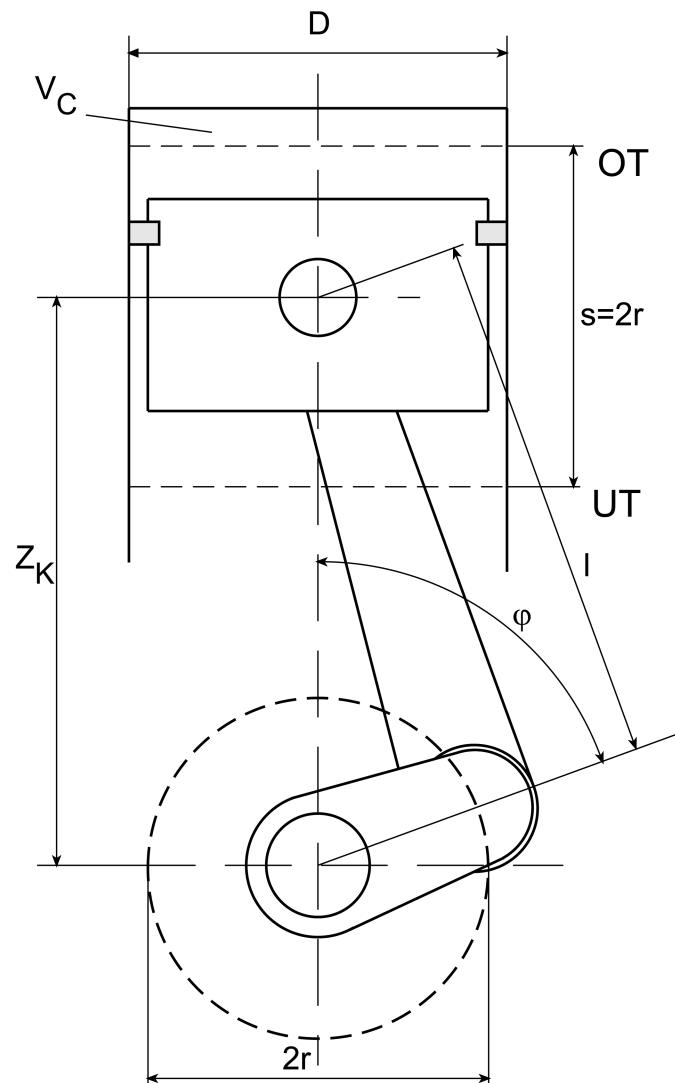


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Tauchkolbenmotors.⁸

Bohrung D : Durchmesser des Zylinders

Hub s : Der Hub bezeichnet den Weg, den der Kolben im Zylinder zwischen dem oberen und dem unteren Totpunkt zurücklegt.

⁸ Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.14

Hubraum V_h : Der Hubraum eines Zylinders ist der Raum, den der Kolben während des Hubes durchläuft.

$$V_h = \frac{s \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad (2-01)$$

Schubstangenverhältnis λ_s : Das Verhältnis zwischen Kurbelradius r und Pleuelstangenlänge wird als Schubstangenverhältnis bezeichnet.

$$\lambda_s = \frac{r}{l} \quad (2-02)$$

Verdichtungsverhältnis ε : Das Verdichtungsverhältnis beschreibt das maximale Zylindervolumen V_{\max} und Hubvolumen im Verhältnis zum Kompressionsvolumen V_c . Unter Kompressionsvolumen versteht man den Raum, den der Kolben nicht durchläuft. Es befindet sich oberhalb des oberen Totpunktes.

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}}{V_c} = \frac{(V_c + V_h)}{V_c} \quad (2-03)$$

2.1.2 Kinematische Daten

Die Lage des Kolbens Z_K ist abhängig von der jeweiligen Kurbelstellung φ .

Diese wird in *Grad Kurbelwinkel* ($^{\circ}\text{KW}$) ausgedrückt:

$$Z_K = r \cdot f(\varphi) \quad (2-04)$$

$$f(\varphi) = (1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right) \quad (2-05)$$

Mit der Änderung der Kolbenstellung ergibt sich ein periodisch wechselndes Zylindervolumen:

$$V_z(\varphi) = V_c + Z_k(\varphi) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2-06)$$

2.1.3 Motorkenngrößen

Mit n als Motordrehzahl in min^{-1} ergibt sich die mittlere Kolbengeschwindigkeit:

$$cm = s \cdot \frac{n}{30} \quad (2-07)$$

Der Unterschied zwischen dem Zweitakt- und Viertaktverfahren wird durch die Taktzahl a berücksichtigt.

$$a = \frac{n}{n_a} \quad (2-08)$$

Mit dem messbaren Drehmoment M und der Taktzahl a ergibt sich die Nutzarbeit W_e .

$$W_e = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot M \quad (2-09)$$

Die spezifische Nutzarbeit w_e hingegen erhält man durch Division mit dem Hubvolumen V_h :

$$w_e = \frac{W_e}{V_h} \quad (2-10)$$

Oft wird noch als Motorkenngroße der in bar angegebene effektive Mitteldruck verwendet⁹. Ein bar entspricht in diesem Fall $0,1 \frac{kJ}{dm^3}$.

⁹ Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.22

Durch die Angabe der Drehzahl n in min^{-1} und des effektiven Mitteldruckes p_e in bar ergibt sich die effektive Motorleistung:

$$P_e = p_e \cdot z \cdot V_h \cdot \frac{n}{600 \cdot a} \quad (2-11)$$

Das Verhältnis von Nutzleistung W_e und zugeführter Brennstoffenergie Q_B wird als effektiver Wirkungsgrad η_e bezeichnet.

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_B} \quad (2-12)$$

Der effektive Wirkungsgrad ergibt sich auch als Produkt aus mechanischem Wirkungsgrad η_m und innerem Wirkungsgrad η_i

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_B} \quad (2-13)$$

$$\eta_m = \frac{W_i}{W_e} \quad (2-14)$$

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m \quad (2-15)$$

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit kann neben den Wirkungsgraden auch der spezifische Kraftstoffverbrauch angegeben werden.

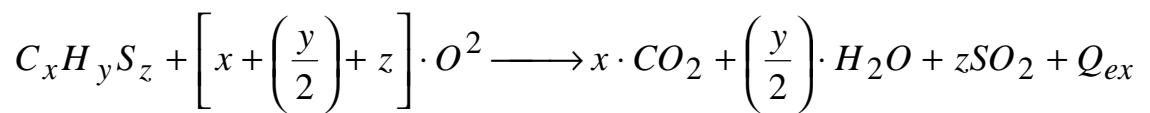
Der effektive spezifische Kraftstoffverbrauch b_e ist der auf die Leistung P_e bezogene Kraftstoffverbrauch und kann auch mit Hilfe des effektiven Wirkungsgrades η_e errechnet werden.

$$b_e = \frac{m_B}{P_e} = \frac{I}{\eta_e \cdot H_u} \quad (2-16)$$

2.1.4 Verbrennung

Chemisch gebundene Brennstoffenergie wird durch Reaktionen mit Sauerstoff zu nutzbarer Energie. Verbrennung ist sozusagen eine Oxidation des Kraftstoffes mit Sauerstoff als Oxidationsmittel. Die brennbaren Bestandteile sind neben unerwünschtem Schwefel (S) hauptsächlich Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H). Als Ballaststoffe erscheinen in zu vernachlässigenden Anteilen Sauerstoff (O), Stickstoff (N), Asche und Wasser.

Die Bilanzgleichung zur vollkommenen Oxidation eines allgemeinen Kraftstoffmoleküls $C_xH_yS_z$ ergibt sich wie folgt¹⁰:



Die freigesetzte Wärme Q_{ex} entspricht dem kraftstoffspezifischen Heizwert H_u , daher errechnet sich die durch die innere Verbrennung dem Prozess zugeführte Wärme Q_{zu} aus der Kraftstoffmenge m_B und dem Heizwert.

$$Q_{zu} \leq m_B \cdot H_u \quad (2-17)$$

¹⁰ Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.15

Es kommt zu einer vollständigen Verbrennung, wenn die erforderliche Menge Sauerstoff zur Verfügung steht. Er wird der Umgebungsluft entnommen. Somit ist die maximal umsetzbare Kraftstoffmenge m_B von der im Zylinder befindlichen Luftmasse abhängig. Die kraftstoffspezifische Mindestluftmasse L_{\min} , die im Zylinder enthaltene Luftmasse m_{LZ} und die Kraftstoffmenge m_B beschreiben das Luftverhältnis λ_V .

$$\lambda_V = \frac{m_{LZ}}{m_B \cdot L_{\min}} \quad (2-18)$$

Für L_{\min} gilt für Dieselkraftstoff gemäß der Elementaranalyse der Anhaltswert 14,5 kg/kg¹¹.

Nach Ende des Expansionshubes kommt es zum Austausch der Zylinderladung gegen Frischgas. Der sogenannte Ladungswechsel kann durch folgende dimensionslose Kenngrößen bewertet werden.

Der Luftaufwand λ_l ist ein Maß für den Luftdurchsatz und gibt an, wie viel Luft relativ zur theoretischen Luftmasse insgesamt in den Zylinder eingeströmt ist.

$$\lambda_l = \frac{m_L}{\rho \cdot V_h} \quad (2-19)$$

Der Liefergrad λ_l kennzeichnet den Erfolg des Ladungswechsels und beschreibt das Verhältnis von im Zylinder verbleibender zugeführter Frischluftmasse m_{LZ} und der theoretisch möglichen Ladungsmasse.

$$\lambda_l = \frac{m_{LZ}}{\rho \cdot V_h} \quad (2-20)$$

¹¹ Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.15

Der Fanggrad λ_Z gibt an, welcher Anteil von der gesamten angesaugten Frisch-ladungsmasse tatsächlich im Zylinder verbleibt.

$$\lambda_Z = \frac{m_{LZ}}{m_{LZ} + m_{Sp}} \quad (2-21)$$

Im Spülgrad λ_{Sp} kommt zum Ausdruck, zu welchem Anteil die gesamte Zylinderladung aus Frischluftmasse besteht. Er beschreibt sozusagen die Qualität der Zylinderladung.

$$\lambda_{Sp} = \frac{m_{LZ}}{m_Z} \quad (2-22)$$

2.2 Thermodynamische Grundlagen

Thermodynamische Prozesse verändern den Zustand eines thermodynamischen Systems und damit dessen Zustandsgrößen. Für entsprechende Rechnungen ist es notwendig, den betrachteten Raum abzugrenzen und zwischen offenen, geschlossenen und abgeschlossenen Systemen zu unterscheiden.

- Offenes System: Sowohl stationärer oder instationärer Transport von Materie als auch Energie ist über die Systemgrenzen hinaus möglich.
- Geschlossenes System: Es findet kein Transport von Materie über die Systemgrenzen hinaus statt.
- Abgeschlossenes System: Es ist weder Transport von Materie noch Energie über die Systemgrenzen hinaus möglich.

Bei Verbrennungskraftmaschinen können sich unterschiedliche Arten von Systemen ergeben. Während der Arbeitsraum z.B. während der Hochdruckphase ein geschlossenes System bildet, handelt es sich beim Ladungswechsel um ein offenes instationäres System.

Die innere Energie dU des Systems „Brennraum“ ändert sich, wenn über die Systemgrenzen die Enthalpie dH des eingespritzten Kraftstoffs Wärme dQ_w oder Arbeit dW zu- oder abgeführt wird. Dieser Zusammenhang wird durch den 1. Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben.

$$dU = dW + dQ_w + dQ_B + dH \quad (2-23)$$

Die Allgemeine Gasgleichung beschreibt die Veränderung der Zustandsgrößen.

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (2-24)$$

2.2.1 Idealprozessrechnung

Man unterscheidet in der Prozessrechnung zwischen idealisiertem und realem Arbeitsprozess. Idealprozesse sind Kreisprozesse nach denen eine ideale Maschine arbeiten würde.

Für eine thermische Maschine wird der ideale Kreisprozess zum Vergleichsprozess. Für den Ottomotor kann als Vergleichsprozess der Gleichraumprozess und für den Dieselmotor der Seiligerprozess gewählt werden.

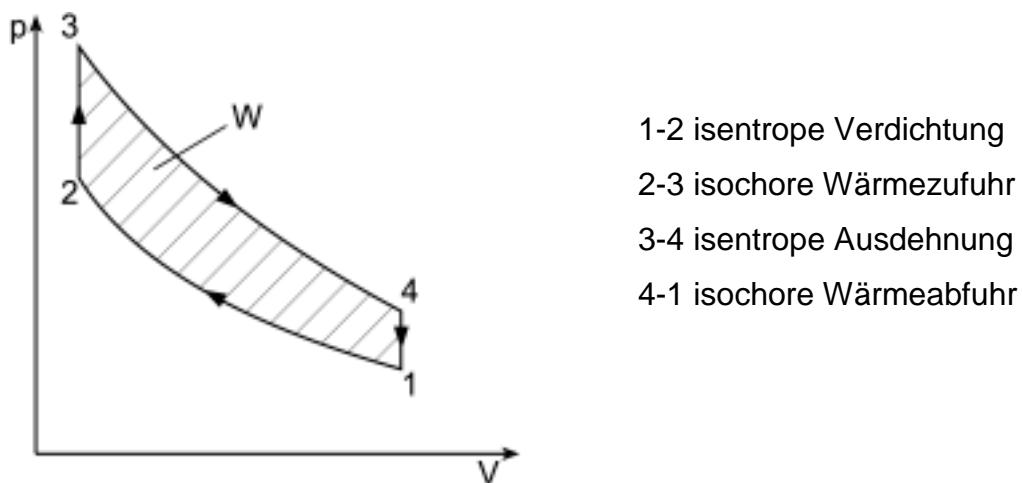


Abbildung 2.2: p, V -Diagramm für den Gleichraumprozess.

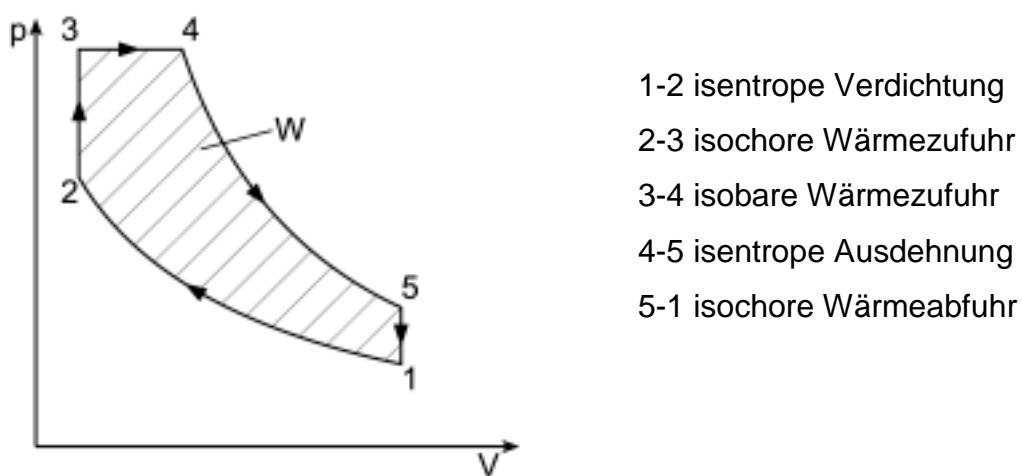


Abbildung 2.3: p, V -Diagramm für den Seiligerprozess.

2.2.2 Realprozessrechnung

Für die Berechnung eines realen Arbeitsprozesses reichen die idealisierten Vergleichsprozesse nicht mehr aus. So ist zum Beispiel Gleichung (2 – 24) für reale Gase nicht uneingeschränkt anwendbar. Bei höherem Druck verändert sich das Gasverhalten eines Stoffes derart, dass dies nicht mehr vernachlässigt werden kann. Dieser Umstand kann durch den sogenannten Realgasfaktor Z berücksichtigt werden.

$$Z = \frac{p \cdot v}{R \cdot T} \quad (2 - 25)$$

Der Realgasfaktor ist eine Funktion des jeweiligen Stoffes, welche von der Temperatur und dem Druck abhängt. Für die Bestimmung von Z in der Datenverarbeitung stellt *Zacharias F.* in der Motortechnische Zeitschrift 31/7 eine Näherungsformel vor. Im Programmcode dieser Arbeit wird ein darauf aufbauender fertiger Algorithmus verwendet¹².

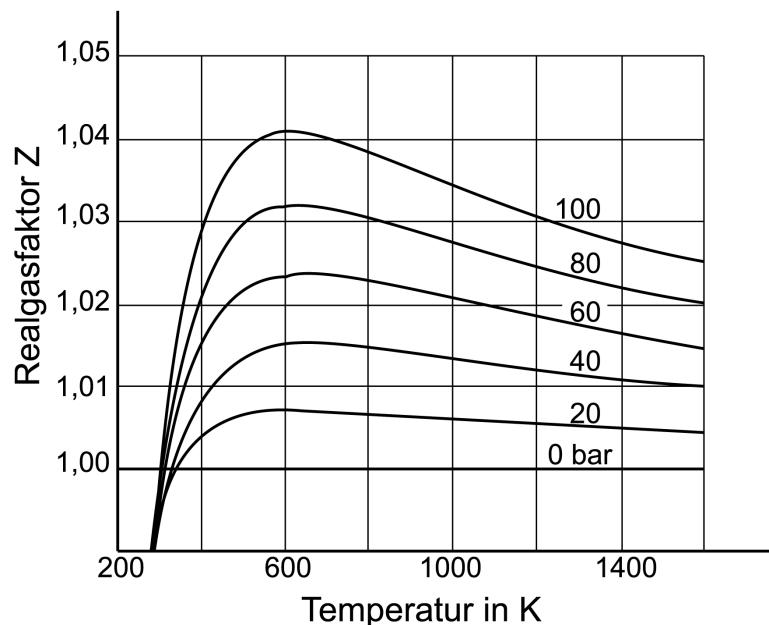


Abbildung 2.4: Realgasfaktor von Luft als Funktion von Druck und Temperatur¹³.

¹² Betz, A.: Druckverlaufsanalyse für direkteinspritzende Dieselmotoren, T.H. München 1984

¹³ Pischinger, R.: Thermodynamische Grundlagen. In: List, H.; Pischinger, A.[Hrsg]: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 1989, S.16

Folgende Tabelle zeigt die Unterschiede zwischen dem Idealprozess und dem Realprozess auf.

TEILMODELL	IDEALPROZEß	REALPROZEß
Stoffwerte	Ideales Gas $C_p, C_v, \kappa = \text{konstant}$	Reales Gas; Zusammensetzung ändert sich während des Prozesses. Stoffwerte abhängig von Druck, Temperatur und Zusammensetzung.
Ladungswechsel	Ladungswechsel als Wärmeabfuhr.	Massenaustausch durch Ventile; Restgas bleibt im Zylinder.
Verbrennung	Vollständige Verbrennung nach idealisierter Gesetzmäßigkeit.	Unterschiedliche Brennverläufe sind möglich; Kraftstoff verbrennt nicht vollständig.
Wandwäremeverluste	Nicht berücksichtigt.	Werden berücksichtigt.
Undichtigkeiten	Nicht berücksichtigt.	Werden teilweise berücksichtigt, in dieser Arbeit aber vernachlässigt.

Tabelle 2.1: Unterschiede zwischen Ideal- und Realprozessrechnung.¹⁴

Bei einer Motordrehzahl von 3000 min^{-1} dauert ein Arbeitsspiel von 2 Umdrehungen 40 ms . Während dieser kurzen Zeitspanne kommt es in Sekundenbruchteilen zu Veränderungen der thermischen und kalorischen Zustandsgrößen. Diese instationären Vorgänge sind mit den einfachen Formeln der Idealprozessrechnung nicht mehr ohne weiteres lösbar und müssen in differentieller Form aufgestellt werden.

Unter Vernachlässigung der Enthalpie des eingespritzten Brennstoffes ergibt sich daher für die Energiegleichung:

$$\frac{dU}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{d\varphi} + \frac{dQ_W}{d\varphi} + \frac{dW}{d\varphi} \quad (2-26)$$

¹⁴ Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.31

Mit u für die spezifische Energie ergibt sich die innere Energie U des Arbeitsgases aus folgender Gleichung:

$$\frac{dU}{d\varphi} = u \cdot \frac{dm}{d\varphi} + m \cdot \frac{du}{d\varphi} \quad (2-27)$$

Die spezifische innere Energie u wird nach einer empirische Funktion der Temperatur und des Luftverhältnisses von *E.Justi* errechnet¹⁵:

$$u(T, \lambda) = 0,1445 \cdot \left[1356,8 + \left(489,6 + \frac{46,4}{\lambda^{0,93}} \right) \cdot (T - T_{bez}) \cdot 10^{-2} + \left(7,768 + \frac{3,36}{\lambda^{0,8}} \right) \cdot (T - T_{bez}) \cdot 10^{-4} - \left(0,0975 + \frac{0,0485}{\lambda^{0,75}} \right) \cdot (T - T_{bez})^3 \cdot 10^{-6} \right] \quad (2-28)$$

Da die Druckabhängigkeit sehr gering ist¹⁶, wird diese vernachlässigt, und das totale Differential für die spezifische innere Energie lautet daher:

$$\frac{du}{d\varphi} = \frac{\partial u}{\partial T} \cdot \frac{dT}{d\varphi} + \frac{\partial u}{\partial \lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\varphi} \quad (2-29)$$

Die partiellen Differentiale $\frac{\partial u}{\partial T}$ und $\frac{\partial u}{\partial \lambda}$ werden anhand der Beziehung nach *E.Justi* berechnet.

¹⁵ Merker, G.P.; Schwarz, C.: Technische Verbrennung, 2001, S.55

¹⁶ Kraßnig, G.: Prozessrechnung am realen Motor. In: List, H.; Pischinger, A.[Hrsg]: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 1989, S.134

Für die Berechnung der Wandwärme $\frac{dQ_W}{d\varphi}$ wird der Brennraum in die drei

Bereiche Zylinderkopffläche A_1 , Kolbenfläche A_2 und Zylinderwandfläche A_3 unterteilt. Die periodisch wechselnde Zylinderwandfläche ergibt sich mit Hilfe von Gleichung (2 – 04) aus:

$$A_{3,j} = VC + 0,5 \cdot Vh \cdot Z_K \quad (2 - 30)$$

Mit Hilfe des Wärmeübergangskoeffizienten α , der Wandtemperatur T_W , der Winkelgeschwindigkeit ω und den entsprechenden Flächen errechnet sich die Wandwärme gemäß dem Newtonschen Abkühlungsgesetz durch folgende Beziehung¹⁷:

$$\frac{dQ_W}{d\varphi} = \frac{\alpha}{\omega} \cdot \sum_i^3 A_i \cdot (T - T_{W_i}) \quad (2 - 31)$$

Für den Wärmeübergangskoeffizient α gilt nach Woschni¹⁸:

$$\alpha = 130 \cdot d^{-0,2} \cdot p^{0,8} \cdot T^{-0,53} \cdot \left[C_1 \cdot c_m + C_2 \cdot \frac{Vh \cdot T_1}{p_1 \cdot V_1} \cdot (p - p_0) \right]^{0,8} \quad (2 - 32)$$

Mit C_1 wird die Turbulenz im Zylinder während der Ladungswechselphase und der Expansions- und Verdichtungsphase berücksichtigt. Durch C_2 wird dem Unterschied zwischen Motoren mit direkter Einspritzung und Kammermotoren Rechnung getragen.

¹⁷ Vgl.: Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.264

¹⁸ Kraßnig, G.: Prozessrechnung am realen Motor. In: List, H.; Pischinger, A.[Hrsg]: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 1989, S.188

$$\text{Die Ladungswechselphase: } C_1 = 6,18 + 0,417 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (2-33)$$

$$\text{Die Verdichtungs- und Expansionsphase: } C_1 = 2,28 + 0,308 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (2-34)$$

$$\text{Motoren mit direkter Einspritzung: } C_2 = 0,00324 \frac{m}{s \cdot K} \quad (2-35)$$

$$\text{Kammermotoren: } C_2 = 0,0062 \frac{m}{s \cdot K} \quad (2-36)$$

Die Volumenänderungsarbeit $\frac{dW}{d\varphi}$ entspricht der im p,V -Diagramm eingeschlossenen Fläche und wird mit Hilfe des momentanen Drucks p und der von der Kolbenstellung abhängigen Volumenänderung $\frac{dV}{d\varphi}$ bestimmt.

$$\frac{dW}{d\varphi} = p \cdot \frac{dV}{d\varphi} \quad (2-37)$$

Der im folgenden Abschnitt behandelte Brennverlauf kann somit durch die Energiegleichung (2-23) bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \frac{dQ_B}{d\varphi} = & \left[u \cdot \frac{dm}{d\varphi} + m \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial T} \cdot \frac{dT}{d\varphi} + \frac{\partial u}{\partial \lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\varphi} \right) \right] \\ & - \sum_i \alpha_i \cdot (T_i - T) - p \cdot \frac{dV}{d\varphi} \end{aligned} \quad (2-38)$$

2.3 Der Brennverlauf

Wird die durch die Verbrennung des eingespritzten Kraftstoffes entstehende Wärme Q_B auf eine Zeiteinheit oder die Einheit des Kurbelwinkels bezogen, spricht man vom Brennverlauf $\frac{dQ_B}{dt}$ bzw. $\frac{dQ_B}{d\varphi}$.

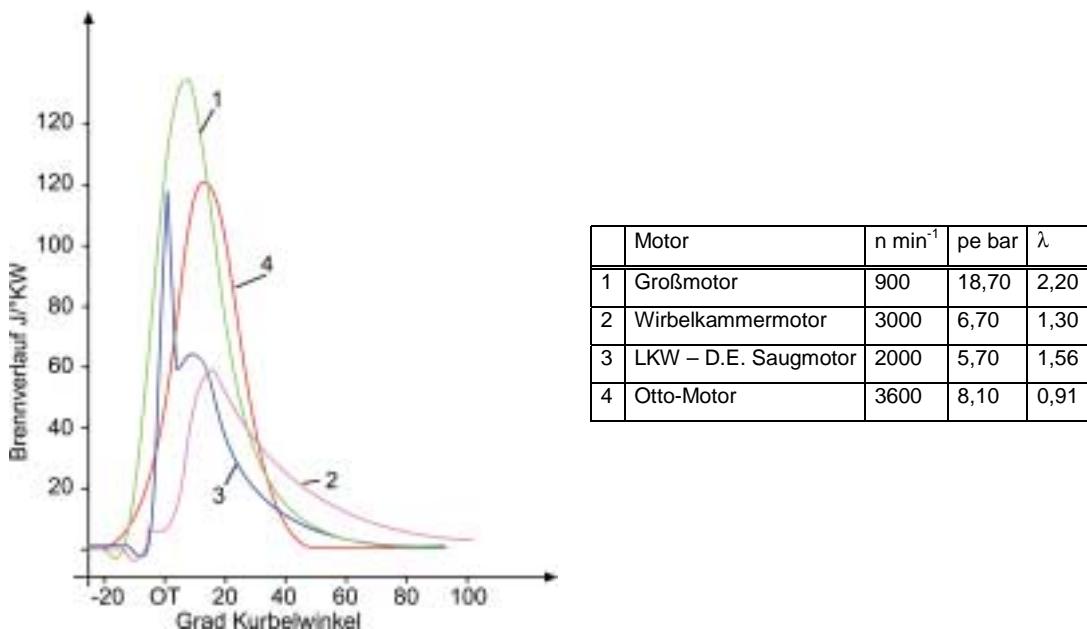
Durch Umstellung von Gleichung (2 – 23), kann dieser berechnet werden.

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = \frac{dU}{d\varphi} - \frac{dQ_W}{d\varphi} - \frac{dW}{d\varphi} \quad (2 - 39)$$

Die Differenz aus Wärmeenergie Q_B und Wandwärme Q_W wird als Heizverlauf Q_H bezeichnet. Dieser wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt und nur aus Gründen der Vollständigkeit erwähnt.

$$Q_H = Q_B - Q_W \quad (2 - 40)$$

$$\frac{dQ_H}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{d\varphi} - \frac{dQ_W}{d\varphi} \quad (2 - 41)$$

Abbildung 2.5: Verschiedene Brennverläufe¹⁹

Wie in Abbildung (2.5) zu erkennen ist, können aufgrund zahlreicher Einflüsse Brennverläufe sehr unterschiedlich sein. So gibt es z.B. verschiedene stark ausgeprägte Verbrennungsstöße zu Beginn der Verbrennung oder Unterschiede in der Brenndauer. Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass sich die Brenndauer durch ein größeres Luftverhältnis verkürzt, der Zündverzug hingegen durch höheren Brennraumdruck, Gastemperaturen und Motordrehzahlen.

Infolge von höherem Druck und höheren Temperaturen kommt es bei aufgeladenen Dieselmotoren (Graph 1) zu einem kürzeren Zündverzug. Dies führt zu einem weniger ausgeprägten Verbrennungsstoß, da das Kraftstoffgemisch bei Verbrennungsbeginn relativ wenig aufbereitet ist. Beim Ottomotor (Graph 4) hingegen ist der Verbrennungsstoß weniger ausgeprägt, weil das Kraftstoff-Luft-Gemisch nahezu homogen ist und gleichmäßiger verbrennt. Im Wirbelkammermotor (Graph 2) kommt es ebenfalls zu einer gedämpften Anfangsphase. In diesem Fall ist es damit zu erklären, dass die Verbrennung bereits in der Vorkammer beginnt und dadurch in der Anfangsphase weniger Energie umgesetzt wird.

¹⁹ Kraßnig, G.: Prozessrechnung am realen Motor. In: List, H.; Pischinger, A.[Hrsg]: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 1989, S.150

Das Integral des Brennverlaufs entspricht dem Summenbrennverlauf, bzw. der Umsetzrate. Die Umsetzrate beschreibt das Verhältnis von momentan umgesetzter zu pro Arbeitsspiel freigesetzter Kraftstoffenergie.

$$x = \frac{Q_B}{Q_{B0}} \quad (2-42)$$

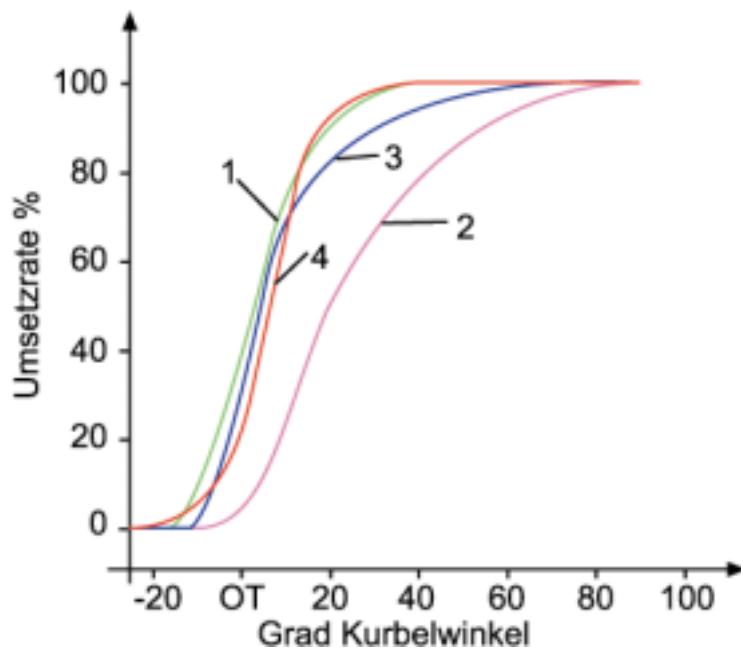


Abbildung 2.6: Umsetzraten entsprechend Abb. 2.5²⁰

Zusammenfassend können folgende Größen das Aussehen des Verlaufes bestimmen bzw. beeinflussen:

- Verbrennungsverfahren, z.B. Otto, Diesel, Direkteinspritzung, Wirbelkammerverfahren
- Betriebsparameter, z.B. Verdichtungsverhältnis, Motorlast, Aufladegrad oder Motordrehzahl
- Brennraumgeometrie
- Betriebszustände: Voll- oder Teillast

²⁰ Kraßnig, G.: Prozessrechnung am realen Motor. In: List, H.; Pischinger, A.[Hrsg]: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 1989, S.150

2.4 Der Ersatzbrennverlauf

Der aus der Druckindizierung ermittelte Brennverlauf lässt sich durch eine relativ einfache mathematische Nachbildung, dem Ersatzbrennverlauf, vereinfacht darstellen. Der am häufigsten verwendete Ersatzbrennverlauf geht auf Arbeiten von *Vibe* zurück²¹. Die *Vibe*-Funktion beschreibt die wesentlichen Merkmale einer motorischen Verbrennung mit nur drei Parametern. Nach *Vibe* wird die Energieumsetzung während der Verbrennung durch die sogenannte Durchbrennfunktion dargestellt. Der Verlauf der Energieumsetzung folgt einer Exponentialfunktion.

$$x = 1 - e^{-C \left(\frac{t}{t_0} \right)^{m+1}} \quad (2-43)$$

Unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt t_0 99,9% der Kraftstoffmenge umgesetzt wurden, d.h. $x_0 = 0,999$, ergibt sich für die Konstante C ein Zahlenwert von $C = -6,908$ ²².

Gleichung (2 – 43) ergibt sich daher zu:

$$x = 1 - e^{-6,908 \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^{m+1}} \quad (2-44)$$

Die Durchbrennfunktion drückt das Verhältnis von der zum Zeitpunkt t umgesetzten Kraftstoffenergie Q_B zu der gesamten, pro Arbeitsspiel zugeführten Kraftstoffstoffenergie Q_{B_0} aus²³.

$$x = \frac{Q_B}{Q_{B_0}} \quad (2-45)$$

²¹ Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.37

²² Vibe, I., I.: Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren, 1970, S.55f

²³ Vergl. Abschnitt 2.3, S.25f

Im Rahmen dieser Arbeit erscheint es zweckmäßiger anstatt der Zeit die entsprechenden Kurbelwinkelwerte $\Delta\varphi$ und $\Delta\varphi_{VD}$ zu verwenden.

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{VB} \quad (2-46)$$

$$\Delta\varphi_{VD} = \varphi_{VE} - \varphi_{VB} \quad (2-47)$$

Durch die Gleichungen (2-44) und (2-47) erhält man folgende Funktion für die Energieumsetzung:

$$Q_B = Q_{B_0} \cdot \left[1 - e^{-6,908 \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_{VD}} \right)^{m+1}} \right] \quad (2-48)$$

Durch Differenzierung dieser Funktion erhält man den gewünschten Ersatzbrennverlauf nach *Vibe*.²⁴

$$\frac{dQ_B}{d\varphi} = \frac{Q_{B_0}}{\Delta\varphi_{VD}} \cdot 6,908 \cdot (m+1) \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_{VD}} \right)^m \cdot e^{-6,908 \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_{VD}} \right)^{m+1}} \quad (2-49)$$

Der Faktor m stellt den sogenannten Formparameter dar. Durch diesen ergibt sich die relative Lage des Maximums der *Vibe*-Funktion. Die Energieumsetzung erfolgt umso später, je größer der Formparameter ist.

Einzelheiten einer Verbrennung wie sie z.B. bei unterschiedlichen Brennraumformen auftreten, können mit dieser Funktion allerdings nicht im Detail wiedergegeben werden.

²⁴ Vgl.: Mollenhauer, K.: Handbuch Dieselmotoren, 1997, S.37

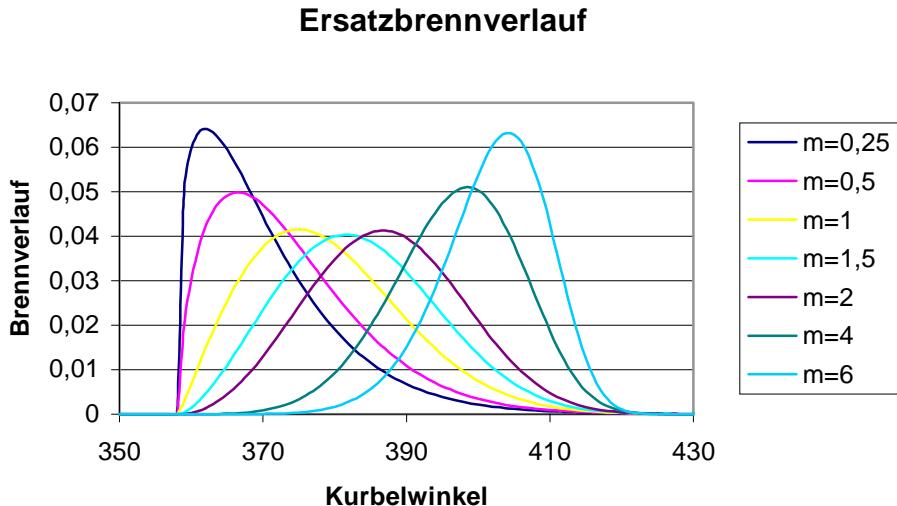


Abbildung 2.7: *Vibe*-Ersatzbrennverlauf für verschiedene Formparameter.

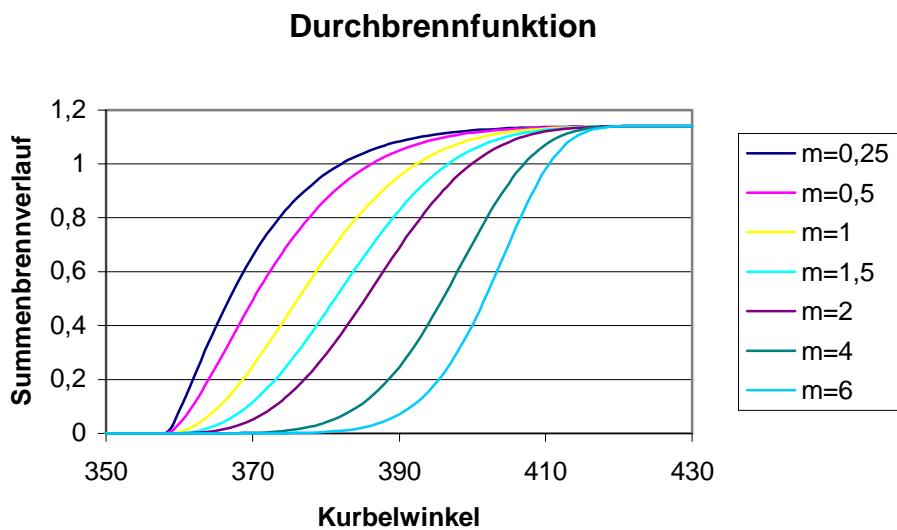


Abbildung 2.8: Summenbrennverlauf für verschiedene Formparameter.

In Anbetracht der Tatsache, dass der *Vibe*-Ersatzbrennverlauf *nur* von den drei Parametern $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi_{VD}$ und m beschrieben wird, liefert er eine relativ gute Annäherung. Bei der Betrachtung schnelllaufender Dieselmotoren mit Direkteinspritzung reicht diese einfache mathematische Form unter Umständen jedoch nicht mehr aus. Erst durch Überlagerung zweier *Vibe*-Funktionen erhöht sich die Genauigkeit der Annäherung, und insbesondere der starke Anstieg zu Beginn der Verbrennung wird besser wiedergegeben.

Diese Doppel-*Vibe*-Funktion wird durch zwei Funktionen gebildet, welche den gleichen Verbrennungsbeginn φ_{VB} besitzen, sich aber durch den Verbrennungsenergie-Anteil β , die Verbrennungsdauer φ_{VD} und den Formfaktor m unterscheiden. Der Brennverlauf wird jetzt durch 5 Parameter beschrieben, wodurch sich zwar der Rechenaufwand erhöht, jedoch die Ähnlichkeit an den realen Brennverlauf entsprechend verbessert.

Die Doppel-*Vibe*-Funktion ergibt sich aus der Addition von zwei *Vibe*-Teilbrennverläufen, die aus Gründen der Vereinfachung und besseren Vergleichsmöglichkeit mit dem *Visual Basic Code* als *Vibe1* und *Vibe2* bezeichnet werden. Der Faktor β bestimmt den Kraftstoffenergieanteil der einzelnen Brennverläufe.

$$Q_{Bges} = Q_{B1} + Q_{B2} \quad (2-50)$$

$$Q_{B1} = Q_{Bges} \cdot \beta \quad (2-51)$$

$$Q_{B2} = Q_{Bges} \cdot (1 - \beta) \quad (2-52)$$

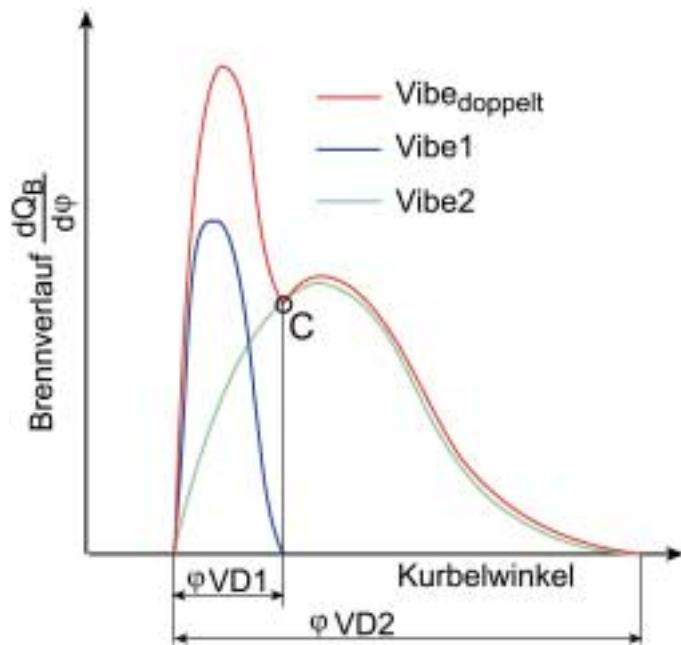


Abbildung 2.9: Vibe Teil-Brennverläufe und Doppel-Vibe-Funktion²³

Das Verbrennungsende φ_{VE1} und somit die Verbrennungsdauer $\Delta\varphi_{VD1}$ kann näherungsweise durch den Sattelpunkt C (siehe Abbildung 2.9) oder durch Symmetrie zur maximalen Umsetzgeschwindigkeit $\left(\frac{dQ_{Bges}}{d\varphi}\right)_{\max}$ festgelegt werden²⁵.

$$\varphi_{VE1} = \varphi_{\max} + (\varphi_{\max} - \varphi_{VB}) \quad (2-53)$$

$$\Delta\varphi_{VD1} = \varphi_{VE1} - \varphi_{VB} \quad (2-54)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (2 – 50) bis (2 – 54) ergeben sich die beiden Vibe-Teilbrennverläufe.

²⁵ Kraßnig, G.: Prozessrechnung am realen Motor. In: List, H.; Pischinger, A.[Hrsg]: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 1989, S.173

$$Vibe1 = \frac{dQ_{B1}}{d\varphi} = \frac{Q_{B_{01}}}{\Delta\varphi_{VD1}} \cdot 6,908 \cdot (m1 + 1) \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_{VD1}} \right)^{m1} \cdot e^{-6,908 \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_{VD1}} \right)^{(m1+1)}} \quad (2-55)$$

$$Vibe2 = \frac{dQ_{B2}}{d\varphi} = \frac{Q_{B_{02}}}{\Delta\varphi_{VD2}} \cdot 6,908 \cdot (m2 + 1) \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_{VD2}} \right)^{m2} \cdot e^{-6,908 \cdot \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_{VD2}} \right)^{(m2+1)}} \quad (2-56)$$

Durch die Addition der beiden Verläufe ergibt sich der doppelte Vibe-Brennverlauf.

$$Vibe_{doppelt} = Vibe1 + Vibe2 \quad (2-57)$$

3. Datenverarbeitende Grundlagen

3.1 Excel

So wie das Textverarbeitungsprogramm die Schreibmaschine abgelöst hat, so ersetzen Tabellenkalkulationsprogramme wie z.B. *MS Excel* oder *Lotus 1 - 2 - 3* den Taschenrechner.

Der Fortschritt liegt jedoch vor allem darin, dass mit variablen Werten gerechnet werden kann. Diese können in Zellen abgelegt werden und jederzeit nach Belieben geändert werden. Sind entsprechende Verknüpfungen innerhalb eines Dokumentes vorhanden, so wird die gesamte Berechnung automatisch aktualisiert und erspart mühsame Arbeiten.

3.1.1 Makros

Bei Tabellenkalkulationen und Datenanalysen wiederholen sich sehr häufig bestimmte Abfolgen von Arbeitsschritten. Das Aufzeichnen sogenannter Makros gibt die Möglichkeit, bestimmte Aufgaben, die sich mit den Befehlen der Anwendung durchführen lassen, zu automatisieren. Wiederkehrende Arbeitsschritte können mit dem integrierten Makrorekorder aufgezeichnet und jederzeit abgerufen werden.

3.1.2 Visual Basic for Applications

Das Aufzeichnen von Makros dient der Zusammenfassung und Vereinfachung der vorhandenen Möglichkeiten. Für komplexere Probleme, welche nicht oder nur beschränkt mit den Befehlen der Anwendung zu lösen sind, gibt es für Anwendungsentwickler die Möglichkeit, aufgezeichnete Makros den individuellen Problemen anzupassen oder eigene Makros bzw. Anwendungen zu programmieren.

Excel stellt dafür die Programmiersprache *Visual Basic for Applications*, kurz VBA, und eine entsprechende Entwicklungsumgebung zur Verfügung. Bei VBA handelt es sich um eine objektorientierte Programmiersprache, die von *Visual Basic* (VB) abgeleitet wurde. VBA ist ebenso wie VB auf die Windowsumgebung abgestimmt. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, dass VB eine selbständige Sprache ist und VBA immer als Feature einer Office Anwendung eingesetzt wird, d.h. es können keine eigenständigen Programme, sogenannte exe-Dateien, erstellt werden. Verschachtelte Bedingungen, Schleifen und/oder Dialogfelder für die Ein- und Ausgabe von Daten sind ebenso möglich wie der Zugriff auf Datenbanken. Die Bearbeitung eines Makros oder die Programmierung einer eigenen Anwendung erfolgt im dafür integrierten Moduleditor. Dieser ist über folgende Menü - Abfolge aus Excel heraus aufrufbar.

- Extras
- Makros
- Visual Basic-Editor

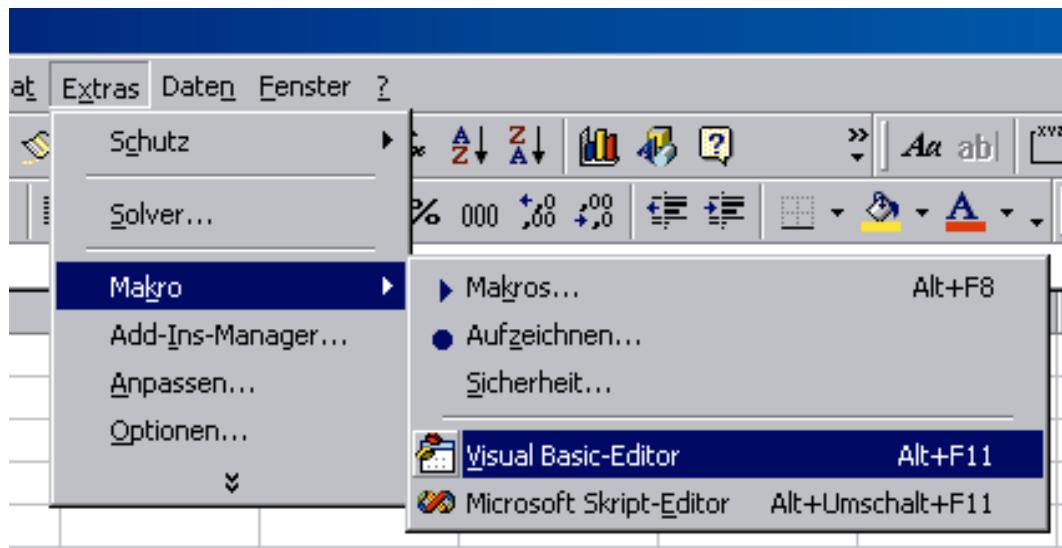


Abbildung 3.1: Menü Abfolge zum Start des Visual Basic Editors.

Der Moduleditor enthält standardmäßig die Fenster *Projekt*, *Eigenschaften* und *Code*. Im Fenster *Projekt* werden die Elemente eines Projektes in einem Verzeichnisbaum dargestellt. Eigenschaften dieser Elemente können im Fenster *Eigenschaften* modifiziert werden. Der eigentliche Programmcode wird im Fenster *Code*, wie in einem Texteditor geschrieben und ebenso wie aufgezeichnete Makros in Modulen abgelegt.

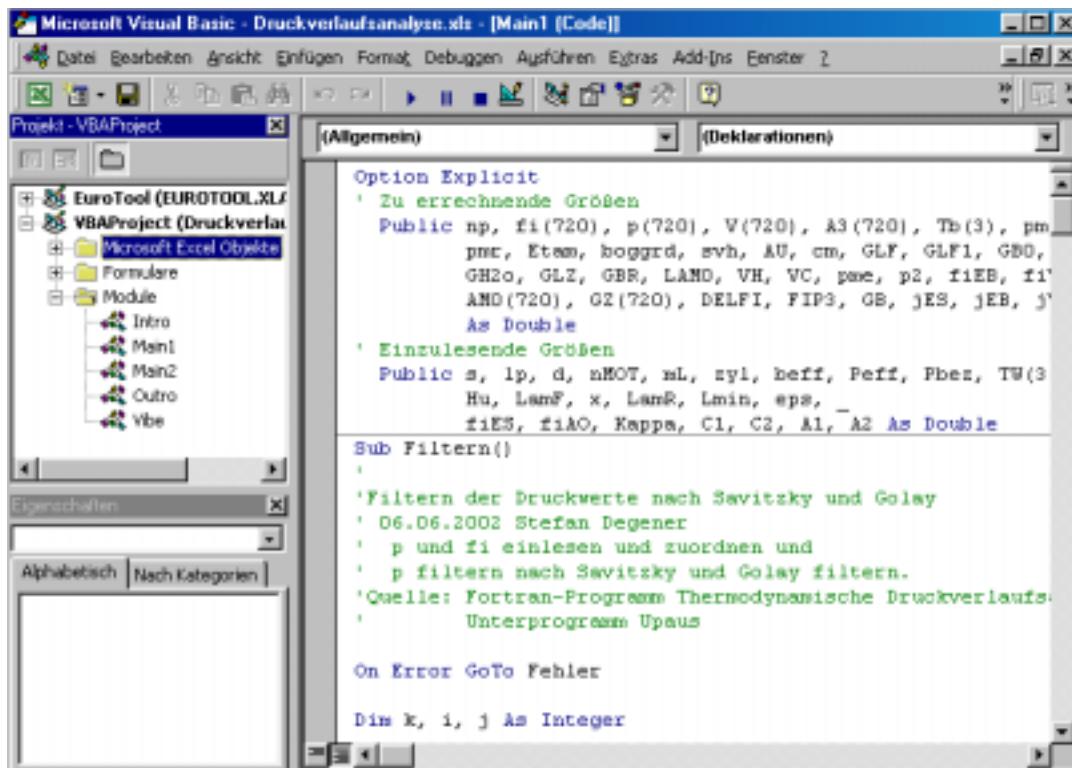


Abbildung 3.2: Moduleditor

Grundsätzlich gibt es zwei Prozedurtypen: Die sogenannten Sub-Prozeduren und Funktionen. Sub-Prozeduren führen Aktionen aus, ohne ein Ergebnis zurückzugeben. Bei aufgezeichneten Makros handelt es sich ebenfalls um Sub-Prozeduren.

Sollte der Umfang der Tabellenfunktionen nicht ausreichen, können eigene Funktionen programmiert werden und in einem Tabelleblatt, wie z.B. die integrierte Funktion *Wurzel(x)* verwendet werden. Diese Funktionen geben ein Ergebnis zurück.

Vom Anwender programmierte Sub-Prozeduren und Funktionen können, wie Makros durch den *Player*, durch eigens erstellte Buttons und Menüs oder aus anderen Sub-Prozeduren aufgerufen werden.

3.2 Der Solver

Excel 2000 verfügt über zusätzliche Werkzeuge, sogenannte *Add-Ins*, die vor Gebrauch entweder geladen oder installiert werden müssen. Alle integrierten *Add-Ins* sind im *Add-Ins-Manager*, welcher über das Menü *Extras* (siehe Abbildung 3.1) aufgerufen wird aufgeführt und müssen bei Bedarf aktiviert, deaktiviert oder installiert werden.

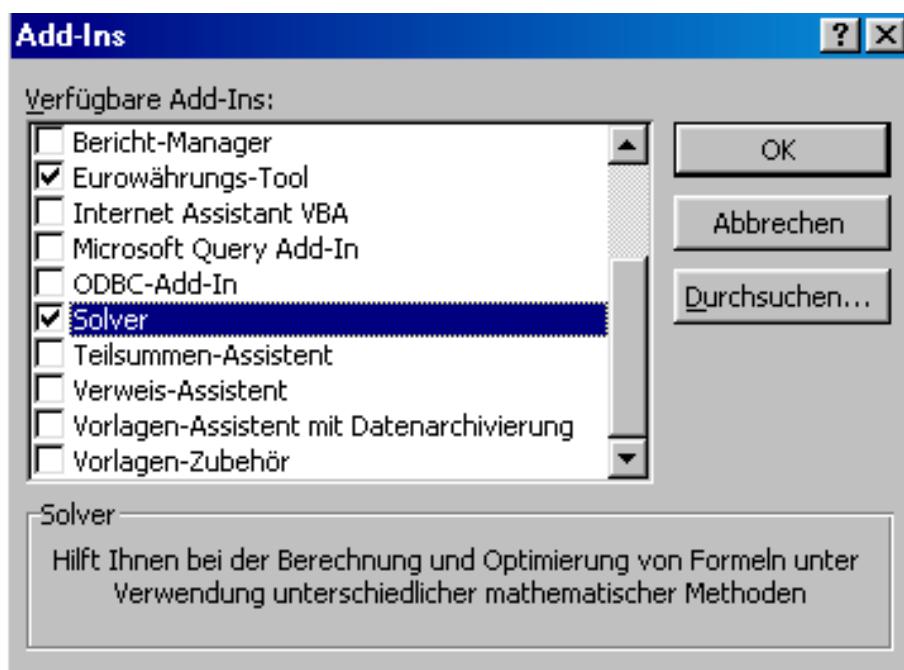


Abbildung 3.3: Der *Add-Ins-Manager*

Der *Solver* ist eines dieser Werkzeuge, welches der *Add-Ins-Manager* aufführt. Er kann zur Lösung multivariabler Probleme eingesetzt werden. Beim Einsatz wird ein Problem dadurch definiert, dass eine Zielzelle, die zu verändernden Zellen und die Nebenbedingungen (optional!) festgelegt werden.

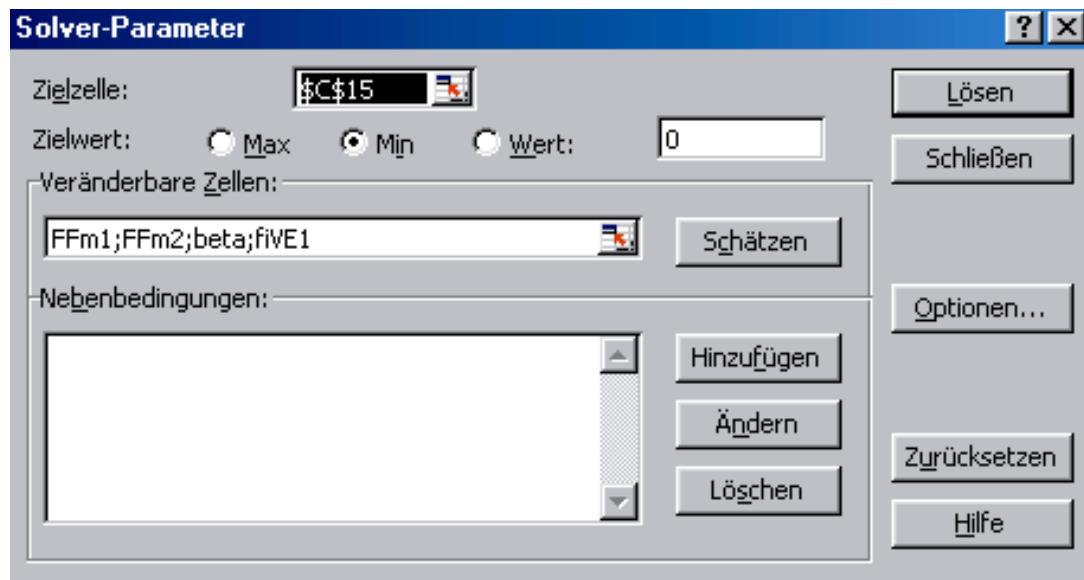


Abbildung 3.4: Der Solver

Über den Button *Optionen* können grundsätzliche Einstellungen, wie z.B. die maximale Iterationszeit, vorgenommen werden.

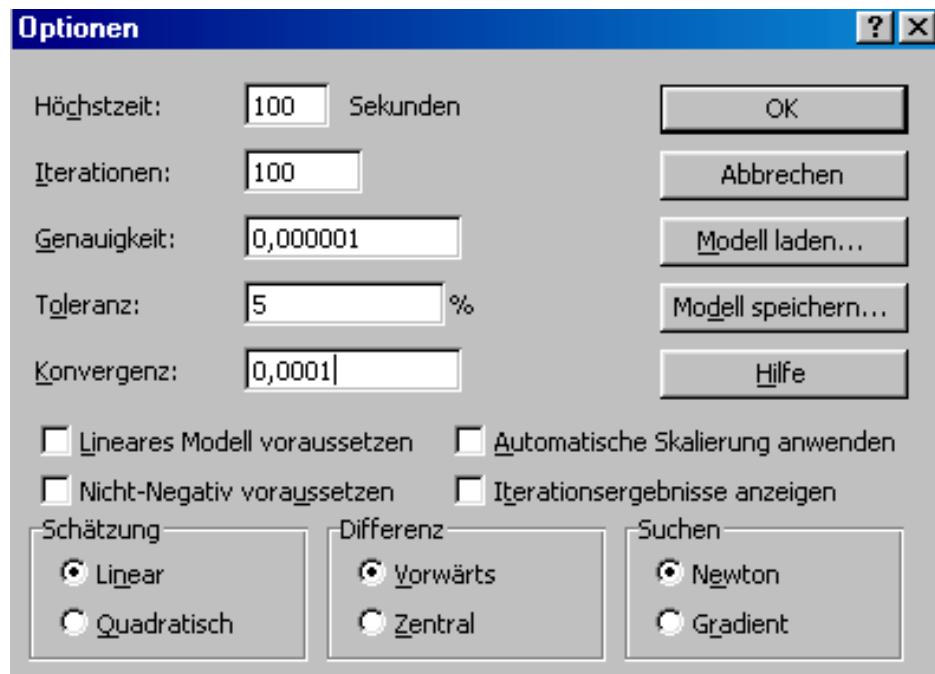


Abbildung 3.5: Options-Dialog des Solvers.

Hat der *Solver* eine geeignete Lösung gefunden, wird diese in einem Dialogfeld angezeigt und kann entweder verworfen oder bestätigt werden.

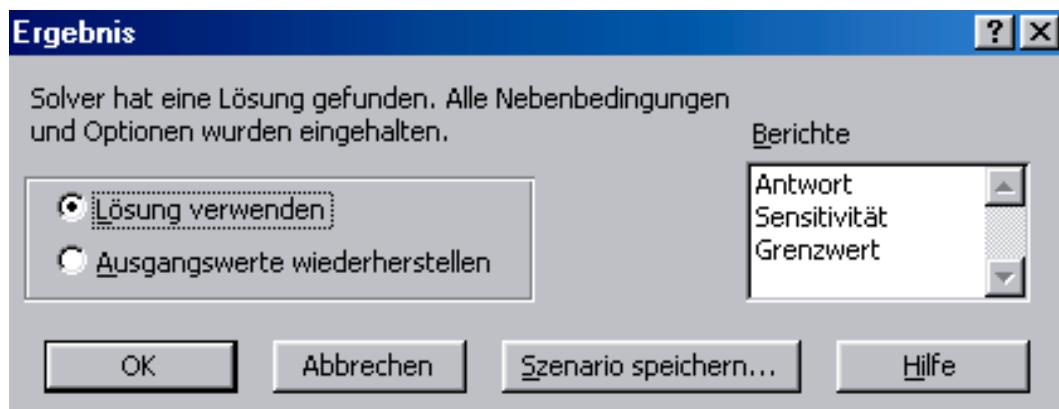


Abbildung 3.6: Dialogfeld mit Lösungsvorschlag

Durch fehlerhafte Einstellungen, Bedienung oder Erreichen der im Optionsfeld festgelegten Grenzen kann es vorkommen, dass keine geeignete Lösung gefunden wird. Eine Alternativ-Lösung kann über folgenden Dialog bearbeitet werden.

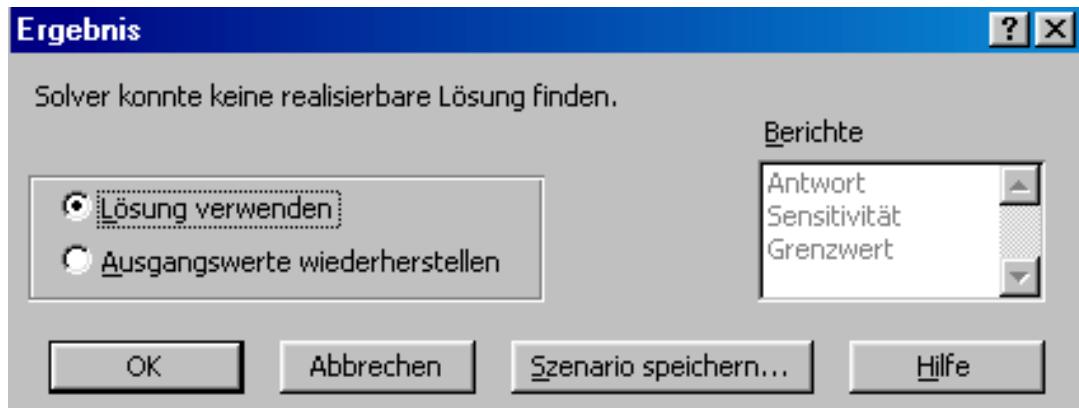


Abbildung 3.7: Dialogfeld mit Alternativ-Lösung.

Der *Solver* wird auch über das Menü *Extras* (siehe Abbildung 3.1.) aufgerufen.

4. Programmaufbau

Der Programm-Code zur Druckverlaufsanalyse ist in mehrere Sub-Prozeduren und Funktionen unterteilt. Diese sind zur besseren Übersicht auf 5 verschiedene Module verteilt. Einen Überblick über die gesamte Programmstruktur wird unter Punkt 4.2 vermittelt. Im Folgenden werden jedoch nur die wesentlichen Schritte und Rechnungen beschrieben.

4.1 Module

4.1.1 Modul *Main1*

Sub - Prozedur *Filtern*

Die Feldvariablen $p(i)$ und $fi(i)$ werden zunächst über eine gewöhnliche *For/Next* - Schleife mit den eingelesenen Druckwerten und den entsprechenden Kurbelwinkelwerten aufgefüllt. Der Druckverlauf wird durch den *Savitzky - Golay Filter* geglättet. Dieses Verfahren beseitigt zufällige Schwankungen von Messwerten, erhält dabei jedoch recht gut lokale Minima und Maxima der Daten.

Zur Kontrolle können diese Werte im Tabellenblatt „*Hilfsgrößen*“ eingesehen werden. Da im Rahmen der Druckverlaufsanalyse nur die Werte im Intervall zwischen „*Einlass schließt*“ und „*Auslass öffnet*“ interessant sind, werden nur diese ausgegeben.

Sub - Prozedur *Hilfsgrößen*

In dieser Sub - Prozedur werden die Motorbetriebsdaten den entsprechenden Variablen zugewiesen und die sogenannten Hilfsgrößen wie zum Beispiel Hubvolumen VH , Kompressionsvolumen VC , mittlere Kolbengeschwindigkeit cm etc. berechnet. Diese Werte können ebenfalls im Tabellenblatt „*Hilfsgrößen*“ kontrolliert werden.

- Sub - Prozedur Volumen

Über eine *For/Next* - Schleife erfolgt die Berechnung des periodisch wechselnden Zylindervolumens $V(i)$ und der Zylinderwandfläche $A3(i)$ nach Gleichung (2 – 06) und (2 – 30), sowie die Übergabe an die entsprechenden Feldvariablen $V(i)$ und $A3(i)$.

Sub – Prozedur *pmiSUB*

Die indizierte Nutzarbeit W_i entspricht der Fläche im indizierten p, V – Diagramm. Die Lösung des Integrals, welches diese Fläche beschreibt, erfolgt über eine Summenbildung innerhalb einer *For/Next* – Schleife. Außerhalb dieser Schleife wird dieses Integral mit Hilfe einer letzten Addition geschlossen und durch Division mit dem Hubvolumen VH der indizierte Mitteldruck pmi bestimmt. Anschließend erfolgt dann die Bestimmung des mittleren Reibdruckes pmr und des mechanischen Wirkungsgrades $Etam$. Innerhalb der Schleife wird zusätzlich der indizierte Mitteldruck der Hochdruckphase (geschlossenes System) $pmiHD$ bestimmt.

Sub – Luftverhältnis

Da die genaue Ladungsmasse und damit auch das Luftverhältnis erst nach Kenntnis des Brennverlaufes errechnet werden kann, werden diese Werte zunächst nur angenommen. Für den Verlauf der Brennstoffmasse wird eine kubische Funktion verwendet²⁶.

²⁶ Lange, W.; Woschni, G.: Thermodynamische Auswertung von Indikator-Diagrammen, elektronisch gerechnet, MTZ 25/7, 1964, S.285

4.1.2 Modul *Main2*

Sub – Arbeit

Die Arbeit $arb(i)$ wird entsprechend Gleichung (2 – 37) in der *For/Next* – Schleife 2 über das Intervall „*Einlass schließt/Auslass öffnet*“ berechnet. In der gleichen Schleife wird die Funktion *RGK1* aufgerufen und mit Hilfe des zurückgegebenen Wertes für die Realgaskonstante die Temperatur T_i nach Gleichung (2 – 24) bestimmt.

In der *For/Next* – Schleife 3 erfolgt ebenfalls über oben genanntes Intervall für jeden Kurbelwinkelwert die Berechnung der für den Brennverlauf fehlenden Größen der Wandwärme dQW nach Gleichung (2 – 31) und der inneren Energie *dutot* nach Gleichung (2 – 29).

Die Berechnung der, zur Bestimmung von *dutot* notwendigen Werte der spezifischen inneren Energie uz , der spezifischen Wärmekapazität cv und der Ableitung $dudL$ erfolgt in der Prozedur „*Sub – Innere_Energie*“ nach Gleichung (2 – 28). Diese Prozedur wird innerhalb von Schleife 3 aufgerufen und liefert die aufgezählten Größen.

Da bis zum Einspritzbeginn keine Energiefreisetzung stattfindet, wird dieser Überlegung entsprechend das Druckniveau korrigiert. Daran anschließend folgt eine Korrektur des Massenverlaufs.

Die Druckniveaukorrektur erfolgt nach der Annahme, dass zum Zeitpunkt des Einspritzbeginns der Summenbrennverlaufswert $SQB(jEB)$ nicht mehr als 1 % der gesamten Brennstoffenergie QBO beträgt²⁷. Wird diese, durch eine *If/Then* – Anweisung realisierte Bedingung nicht erfüllt, wird der Druckniveaum Korrekturfaktor dpn neu belegt und die Berechnung durch die bedingungslose *GoTo1* – Anweisung wiederholt. Hat die Iteration die maximale Anzahl der festgelegten Schritte erreicht, führt dies zum Verlassen von Schleife 3, begleitet von einer entsprechenden Information in Form eines Dialogfeldes. Die Berechnung wird anschließend zwar weitergeführt, allerdings mit ungenauen Werten.

²⁷ Vergl.: Vibe, I.I.: *Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren*, 1970, S.55f

Die genaue Zylindermasse und das Luftverhältnis während der Verbrennung ist erst nach Kenntnis des Brennverlaufs möglich²⁸. Die endgültige Form des Summenbrennverlaufs (siehe Abbildung 2.6) ist erreicht, wenn die Abweichung zweier aufeinanderfolgender Maximalwerte des Summenbrennverlaufs weniger als 1 %o beträgt. Wird dieses, ebenfalls durch eine *If/Then* – Anweisung geprüftes, Kriterium erfüllt, wird die Boolean-Variable *Druck* mit *True* belegt, der Massenverlauf entsprechend des berechneten Brennverlaufes korrigiert und der Brennverlauf ein letztes mal mit Hilfe des neuen Massenverlaufes berechnet. Die Variable *Druck* bestimmt dann das Verlassen der Brennverlaufsiteration. Anschließend erfolgt die Ausgabe der für die Druckverlaufsanalyse wichtigen Werte im Tabellenblatt ‚Ergebnisse‘.

Sub Maxima

Durch gewöhnliche *If/Then* – Anweisungen werden die Maximalwerte, die dazu gehörenden Kurbelwinkelwerte und der 50% Punkt der Energieumsetzung bestimmt.

Sub BV Schwerpunkt

Der Brennverlauf-Schwerpunkt errechnet sich im Bereich Verbrennungsbeginn bis Verbrennungsende durch die Flächenschwerpunktbestimmung²⁹.

$$fisp = \frac{\int \varphi \cdot \frac{dQB}{d\varphi} \cdot d\varphi}{\int \frac{dQB}{d\varphi} \cdot d\varphi} \quad (4-01)$$

Innerhalb einer *For/Next* - Schleife werden die Integrale durch eine Summenbildung ersetzt.

²⁸ Lange, W.; Woschni, G.: Thermodynamische Auswertung von Indikator-Diagrammen, elektronisch gerechnet, MTZ 25/7, 1964, S.285

²⁹ Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.: Technische Mechanik 1, 1988, S.67-71

Hat der normierte Summenbrennverlauf ϕ den Wert 1 erreicht, wird die Schleife verlassen und der Schwerpunkt entspricht dem Quotienten aus f_{isp} und S_{phi} .

Sub – Zündbeginn

Der Kurbelwinkelwert vor der ersten Energiefreisetzung bestimmt grob den Zündbeginn. Der genaue Zündbeginn wird jedoch durch eine gewöhnliche Interpolation festgelegt

4.1.3 Modul Outro

Sub – Ausgabe

Diese Prozedur sorgt für die Ausgabe der berechneten Werte im Tabellenblatt ‚Ausgabe‘:

- Motorgeometrie
- Betriebspunkt
- Wärmeübergang
- Stoffwerte
- Maximal-Werte
- Vibe Daten

Zusätzlich wird noch das Verbrennungsende f_{VE1} innerhalb des Ausgabe-Blockes der Vibe Daten nach Gleichung (2 – 53) bestimmt.

4.1.4 Modul Vibe

Function – Vibe einfache

Um zur Approximation des *Vibe*-Brennverlaufes die Möglichkeiten des *Solvers* (siehe Abschnitt 3.2) nutzen zu können, empfiehlt sich zur Berechnung der *Vibe*-Funktionen die VB-Prozedur *Function*. Die Prozedur wird aus den entsprechenden Excel-Zellen aufgerufen, wobei die nötigen Parameter (siehe Abschnitt 2.4) an die Prozedur übergeben werden. Die Bestimmung der erforderlichen Werte erfolgt nach Gleichung (2 – 49).

Function – Vibe doppelt

Diese Prozedur unterscheidet sich von obiger lediglich in der Anzahl der Parameter und dem doppelten Rechenaufwand, was sich bei modernen PC's jedoch nahezu nicht bemerkbar macht. Die Bestimmung der erforderlichen Werte erfolgt nach den Gleichungen (2 – 55), (2 – 56) und (2 – 57)

4.2 Programmstruktur - Gesamter Überblick

Im Folgenden ein strukturierter Gesamtüberblick über den Programm-Code zur Druckverlaufsanalyse mit allen Objekten, Formularen und Modulen.

4.2.1 Microsoft Excel Objekte

1. Diese Arbeitsmappe

Private Sub Workbook_BeforeClose

Löschen des *Druckverlaufsanalyse* Menüs bei Schließen der Arbeitsmappe.

Private Sub Workbook_Open

Erstellen des Menü-Punktes *Druckverlaufsanalyse*.

4.2.2 Formulare

1. frm_einlesen

SUB BUTTON_OK_CLICK

Einlesen der Daten bei manueller Eingabe des Pfades.

SUB BUTTON_ABBRUCH_CLICK

Abbruch.

SUB BUTTON_SUCHEN_CLICK

Einlesen der Daten mit Hilfe der Suchfunktion

2. frm_druckverlauf

SUB BUTTON_OK_CLICK

Einlesen des Druckverlaufes bei manueller Eingabe des Pfades.

SUB BUTTON_ABBRUCH_CLICK

Abbruch.

SUB BUTTON_SUCHEN_CLICK

Einlesen des Druckverlaufes mit Hilfe der Suchfunktion

3. frm_start

SUB BUTTON_OK

Schließen des Start-Dialogs.

4.2.3 Module

1. Intro

SUB NAMEN

Zuordnen der 'Table' Variablen. Vereinfachung bei Änderung der Tabellenbezeichnungen.

SUB EINLESEN

Formular '*frm_einlesen*' aufrufen.

SUB DRUCKVERLAUF

Formular '*frm_druckverlauf*' aufrufen

SUB KOMPLETTRECHNUNG

Berechnung des Brennverlaufes durch Aufrufen der einzelnen SUB - Prozeduren.

- NAMEN
- FILTERN
- HILFSGRÖSSEN
- VOLUMEN
- PMISUB
- LUFTVERHÄLTNIS
- MAXIMA
- BV_SCHWERPUNKT

SUB LÖSCHEN

Löschen der berechneten Zelleninhalte.

SUB FEHLERMELDUNG

Ausgabe eines Dialogfeldes bei einem Laufzeitfehler mit der Möglichkeit des Abbruchs.

2. Main1

SUB FILTERN

Füllen der Datenfelder $p(i)$ und $fi(i)$. Filtern der Druckdaten und deren Ausgabe im Tabellenblatt 'Gerechnete Daten'.

SUB HILFSGRÖSSEN

Füllen der Variablen, Berechnung der Hilfsgrößen und Ausgabe im Tabellenblatt 'Gerechnete Daten'.

SUB VOLUMEN

Berechnung des Zylindervolumens $V(i)$ und der Kolbenwandfläche $A3(i)$.

SUB PMISUB

Berechnung des indizierten Mitteldrucks pmi und $pmiHD$, des Reibdrucks pmr und $etam$. Zuordnen der Indizes jES, jEB, jVE, jAO .

SUB LUFTVERHÄLTNIS

Berechnung der Masse $gz(i)$ und des Luftverhältnisses $amo(i)$.

3. Main2

SUB ARBEIT

Druckniveaukorrektur, Berechnung der Arbeit, des Brennverlaufs und des Summenbrennverlaufs, Brennverlaufsiteration und Ausgabe im Tabellenblatt 'Ergebnisse'.

FUNCTION RGK

Funktion zur Bestimmung der Realgaskonstante nach den Näherungsgleichungen von *Zacharias F.*³⁰ in Form eines bereits für Fortran V bestehenden Algorythmus³¹.

SUB INNERE_ENERGIE

Berechnung der Inneren Energie u , der spezifischen Wärmekapazität cv und $dudL$.

SUB MAXIMA

Maximale Werte berechnen.

SUB BV_SCHWERPUNKT

Berechnung des Brennverlaufschwerpunktes.

SUB ZÜNDBEGINN

Bestimmung des Zündbeginns.

4. Outro

SUB AUSGABE

Ausgabe im Tabellenblatt 'Ausgabe'.

³⁰ *Zacharias F.*: Mollier-I,S-Diagramme für Verbrennungsgase in der Datenverarbeitung, MTZ 31/7, 1970, S.296-303

³¹ *Betz, A.*: Druckverlaufsanalyse für direkteinspritzende Dieselmotoren, T.U. München, 1984, S.28

5. Vibe

FUNCTION Vibe_einfach

Funktion zur Berechnung des einfachen Vibe-Ersatzbrennverlaufs.

FUNCTION Vibe_doppelt

Funktion zur Berechnung des überlagerten Vibe-Ersatzbrennverlaufs.

5. Anleitung

Grundsätzliche Voraussetzung für den Gebrauch des Programms zur Druckverlaufsanalyse ist das Tabellenkalkulationsprogramm *Excel 2000*³². Weiterhin erfordert die Approximation des Ersatzbrennverlaufs, dass der *Solver* installiert ist. Sollte dies nicht der Fall sein und wird er nicht im Menü *Extras* aufgeführt, muss er über den *Add – Ins - Manager* installiert oder aktiviert werden.

Die beigefügte CD - Rom enthält die Excel Arbeitsmappe „Druckverlaufsanalyse.xls“, die Datei „Daten.xls“ mit Motor - und Druckwerten, die vorliegende schriftliche Ausarbeitung im PDF Format sowie den dazu notwendigen Acrobat Reader©

Wenn durch den Start von Arbeitsmappen VBA aktiviert wird, besteht die Gefahr der Infizierung mit Computerviren. Bei jedem Start eines durch VBA unterstützten Projektes erscheint daher ein Warnhinweis:

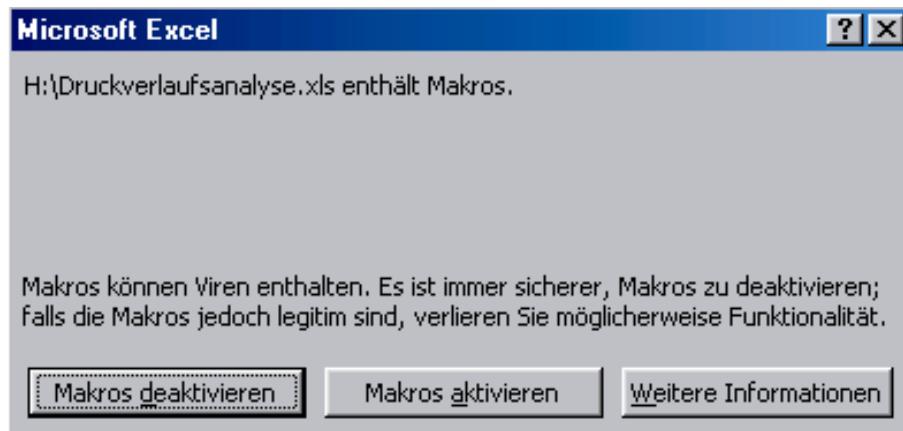


Abbildung 5.1: Excel Warnhinweis

Zur weiteren Ausführung sollte die Möglichkeit „*Makros Aktivieren*“ gewählt werden. Dieser Schutz kann über den Menü-Befehl *Extras/Makros/Sicherheit* (siehe Abbildung 3.1) abgeschaltet oder erhöht werden.

³² Vorgänger der Version 2000 eignen sich nur beschränkt und sollten nicht verwendet werden!

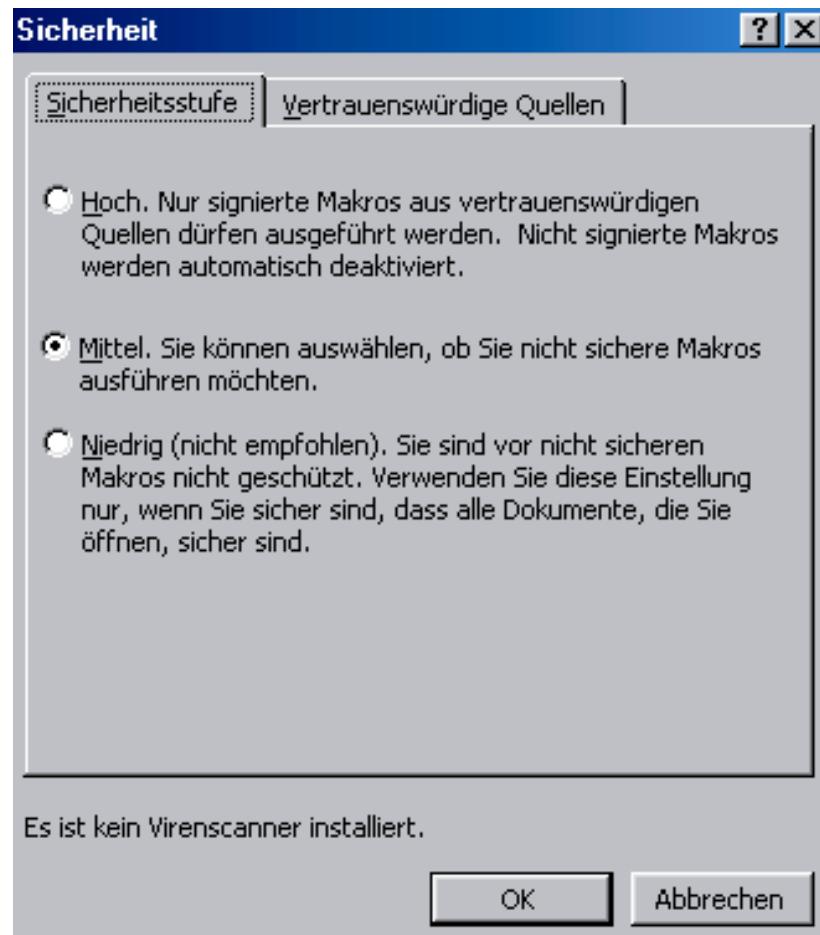


Abbildung 5.2: Menü zur Einstellung der Sicherheitsstufe.

Weitere Informationen zum Schutz vor Makroviren können entsprechender Literatur³³ entnommen werden.

³³Reinke Solution Team, Microsoft Excel 2000

5.1 Die Arbeitsmappe ‚Druckverlaufsanalyse.xls‘

Die Arbeitsmappe verfügt über 8 Tabellenblätter mit jeweils folgenden Funktionen:

- Daten
Tabellenblatt mit den grundlegenden Daten, welche für den Ablauf der Berechnung zur Druckverlaufsanalyse wichtig sind.
- Ergebnisse
Die wichtigen Daten der Druckverlaufsanalyse im Intervall ‚*Einlass schließt / Auslass öffnet*‘ können in diesem Tabellenblatt eingesehen werden.
- Ausgabe
Ausgabe weiterer wichtiger motorspezifischer Einzelgrößen.
- Vibe
Tabellenblatt zur Bearbeitung und Approximation des Vibe – Ersatzbrennverlaufs.
- Vibe 2
Tabellenblatt zur Bearbeitung und Approximation des überlagerten Vibe – Ersatzbrennverlaufs.
- Brennverlauf
Graphische Darstellung des Brennverlaufes.
- Summenbrennverlauf
Graphische Darstellung des Summenbrennverlaufes.
- Hilfsgrößen
Ausgabe der im Verlauf des Programms berechneten und benötigten ‚*Hilfsgrößen*‘.

Im Tabellenblatt „Daten“ werden sowohl Einzeldaten als auch der indizierte Druckverlauf eingelesen. Dies geschieht entweder manuell oder über die eingefügten Menüs *Druckverlaufsanalyse/Daten einlesen* und *Druckverlaufsanalyse/Druckverlauf einlesen*.



Abbildung 5.3: Menü Druckverlaufsanalyse

Im Programm-Code wird das Einlesen der Daten über eine automatische *Copy/Paste* – Anweisung gelöst. Diese relativ einfache Lösung bedingt allerdings, dass die Daten sich im auszulesenden Datenblatt in folgenden festgelegten Zellen befinden müssen:

- Motorbezeichnung: B1
- Motorkenngrößen und Betriebsdaten: B4-B40
- Druckverlauf: E4-F723

The screenshot shows the Microsoft Excel worksheet 'DATEN.xls'. The top part of the screen shows the Excel ribbon and various toolbars. The main area displays a table with the following data:

Motor:		Hatz-Motor Dieselmotor Einzylinder (Pkt. 52)			
Variable	Wert	Bemerkung	Kurbelwinkel KW	Druck p	
lmin	14,57	Mindestluftmasse kg/kg	0,001	1,024	
Hu	43000	Heizwert, kJ	1	0,942	
ka	1,32	AP - Kappa	2	0,836	
Fd	6	Filterdurchgänge	3	0,736	
s	0,085	Kolbenhub, m	4	0,640	
d	0,1	Kolbendurchmesser, m	5	0,627	
eps	20,5	Verdichtungsverhältnis	6	0,763	

Abbildung 5.4: Ausschnitt der Arbeitsmappe DATEN.xls

Sind alle notwendigen Daten eingelesen bzw. manuell eingegeben, wird die Druckverlaufsanalyse über das Menü *Druckverlaufsanalyse/Brennverlauf berechnen* durchgeführt und bei fehlerfreier Rechnung die Zellen der Tabellenblätter *„Ergebnisse“* und *„Gerechnete Daten“* entsprechend mit Daten aufgefüllt.

Die Arbeitsmappe ist für ein maximales Intervall von 260 °KW ausgelegt. Bei Veränderung der Werte für *„Einlass schließt“* und *„Auslass öffnet“* sollten daher vor jeder Neuberechnung die alten Ergebnis - Daten gelöscht werden. Über den Befehl *Druckverlaufsanalyse/Alles Löschen* können alle Werte aus den Zellen entfernt werden.

5.2 Approximation

Die Darstellung und Approximation der Vibe Brennverläufe wird in den Tabellenblättern *Vibe* und *Vibe2* durchgeführt. Durch die Durchführung der Druckverlaufsanalyse werden den Parametern Standardwerte zugewiesen. Diese können manuell verändert werden oder ergeben sich aus der Approximation mit Hilfe des *Solvers*. Da der *Solver* zur Optimierung der beteiligten Parameter Formeln benötigt, werden für die Berechnung der Ersatzbrennverläufe extra programmierte Funktionen verwendet und Zellen-Verknüpfungen erstellt.

Für den fehlerfreien Ablauf ist es daher wichtig, folgende Zellen nicht manuell zu verändern:

Vibe: C8, E4 - E264

Vibe2: C15, E4 - E264

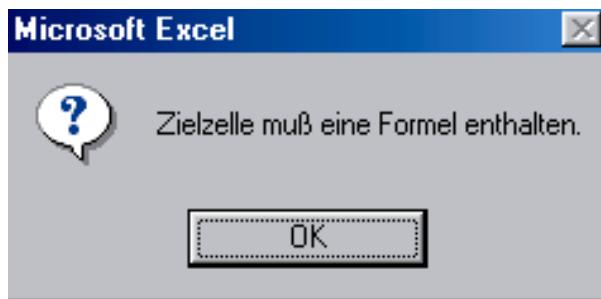


Abbildung 5.5: Fehlermeldung des *Solvers*.

Als Zielwert der Optimierung dient die Quadratsumme der Differenz aus Brennverlauf und Ersatzbrennverlauf. Hat der Zielwert sein Minimum erreicht, erscheint das Dialogfeld „Ergebnis“ (siehe Abbildung 3.5) und der Ersatzbrennverlauf hat die maximale Approximation erreicht. Entsprechend werden die beteiligten, zu verändernden Zellen und die Graphen modifiziert. Die Differenzwerte sind jeweils in der ausgeblendeten Spalte *F* abgelegt und können über den Excel-Befehl *Einblenden* sichtbar gemacht werden.

6. Auswertung

In vorliegender Arbeit wurde mit Hilfe der Datenverarbeitung eine Druckverlaufsanalyse und eine Approximation des Ersatzbrennverlaufes nach Vibe durchgeführt. Ein bereits bestehendes Programm in *Fortran* diente als Vorlage. Aufgrund der integrierten Programmiersprache VBA, den Möglichkeiten der graphischen Darstellung und der weiten Verbreitung des Microsoft Office Paketes, bietet sich *Excel 2000* für diese Arbeit an. Auch die wahlweise installierten zusätzlichen Werkzeuge lassen *Excel 2000* als geeignet erscheinen, in relativ kurzem Zeitrahmen und ohne fundierte Informatikkenntnisse z.B. komplexe multivariable Probleme zu lösen. Die Approximation des Vibe Ersatzbrennverlauf wäre in Sprachen wie *C++* oder *Java* mit erhöhtem Aufwand verbunden. Der *Solver* erleichtert diese Aufgabe um ein Vielfaches. Obwohl der *Solver* Bestandteil von *MS-Excel* ist, wurde er nicht vom *Microsoft*© entwickelt, sondern von der Firma *Frontline Systems*³⁴

Die Berechnung des Brennverlaufs erfolgte nach Kenntnis des Druckverlaufes und der Modellvorstellung des Einzonenmodells. Diese vereinfachten Annahmen ermöglichen frühzeitige Abschätzungen über das spätere Verhalten eines Motors. Doch die Komplexität des Brennverlaufes kann mit dieser Methode nur bedingt beschrieben werden und erfordert eine detailliertere Modellvorstellung. Mehrdimensionale Ansätze, welche die unterschiedlichen Vorgänge wie z.B. Gemischbildung, Hydraulik des Einspritzsystems oder Entflammung beschreiben, ermöglichen genauere Aussagen, sind jedoch mit einem Mehraufwand an Rechnerleistung verbunden. Auch die Kenntnisse der Gesetzmäßigkeiten der Einzelprozesse sind nicht ausreichend bekannt.³⁵.

Obwohl „(...) die nulldimensionalen Ansätze, wie zum Beispiel der allseits bekannte VIBE-Brennverlauf, heute zunehmend als nicht mehr brauchbar.“³⁵ erscheinen, sind diese aber aufgrund der relativ einfachen

³⁴ <http://www.frontsys.com>

³⁵ Chmela F.,et.al.: Die Vorausberechnung des Brennverlaufs von Dieselmotoren mit direkter Einspritzung auf Basis des Einspritzverlaufs. , MTZ 59/7/8, 1998, S.484

Durchführung und durch Anpassung an die heutigen Notwendigkeiten durchaus sinnvoll, und liefern „(...)zumindest auf einem Teilgebiet schnell und einfach brauchbare Antworten(...)“³⁶

Einen weiteren nulldimensionalen Ansatz zur Vorausberechnung des Brennverlaufes liefert die Berechnung auf Basis des Einspritzverlaufs, welcher in MTZ 59/7/8 detaillierter beschrieben wird.

³⁶ Chmela, F.,et.al.: Die Vorausberechnung des Brennverlaufs von Dieselmotoren mit direkter Einspritzung auf Basis des Einspritzverlaufs. , MTZ 59/7/8, 1998, S.484

7. Bibliographie

Betz, A.

Druckverlaufsanalyse für direkteinspritzende Dieselmotoren, Technische Universität München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge, 1984

Cerbe, G.; Hoffman, H.J.

Einführung in die Thermodynamik: Von den Grundlagen zur technischen Anwendung. – 12., verbesserte Auflage – Carl Hanser Verlag, München, et al. 1999

Chmela, F.; Orthaber, G.; Schuster W.

Die Vorausberechnung des Brennverlaufs von Dieselmotoren mit direkter Einspritzung auf der Basis des Einspritzverlaufs. In: MTZ 31/7/8 (1998), S.484-491

Diesel, R.

Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors, Reprint der Ausgabe Springer Verlag, Berlin 1893; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1986

Grobe, H.

Otto- und Dieselmotoren: Arbeitsweise, Aufbau und Berechnung von Zweitakt- und Viertakt-Verbrennungsmotoren. – 11. Auflage – Vogel Buchverlag, Würzburg 1995

Gross; Hauger; Schnell

Technische Mechanik: Band 1 Statik, Springer-Verlag Berlin, et al, 1995

Küttner, K.H.

Kolbenmaschinen – 6. neubearb. Auflage – Teubner Verlag, Stuttgart 1993

Lange, W.; Woschni, G.

Thermodynamische Auswertung von Indikator-Diagrammen, elektronisch gerechnet. In: MTZ 25/7 (1964), S.284-289

Leyhausen, H.J.

Die Meisterprüfung im Kfz-Handwerk 1 – 11., überarb. Aufl. – Vogel Verlag 1989

List, H.; Pischinger, A. [Hrsg.]

Pischinger, R.; Kraßnig, G.; Taučar, G.; Sams, Th.: *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine*, Band 5, Springer, Wien, et al., 1989

Merker, G.P; Schwarz C.

Technische Verbrennung: Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse, B.G.Teubner GmbH, Stuttgart, et al, 2001

Mollenhauer, K.

Handbuch Dieselmotoren, Springer Verlag, Berlin, et al., 1997

Reinke Solution Team

Microsoft Excel 2000: Das Handbuch, Microsoft Press Deutschland 2000

Robert Bosch GmbH [Hrsg.]

Dieselmotor – Management, Vieweg, Wiesbaden, et al., 1998

Urlaub, A.

Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Verfahrenstheorie, Konstruktion – 2., neubearb. Aufl. – Springer Verlag, Berlin, et al., 1997

Vibe, I.I.

Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren, Verlag Technik, Berlin, 1970

Vonhoege, H.; Kraus H.

Das Große Buch: Office 2000, Data Becker GmbH & Co. KG 1999

Wannemacher, H. G.

Brennverlauf und Raussemission eines Vorkammer-Dieselmotors bei unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten, Diss. Kaiserslautern 1986

Zacharias, F.

Mollier-I, S-Diagramme für Verbrennungsgase in der Datenverarbeitung in:
MTZ 31/7 (1970), S.296-303

8. Anhang

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Erster Dieselmotor, entwickelt 1893 – 1897 in Augsburg.....	6
Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Tauchkolbenmotors.....	8
Abbildung 2.2: p, V – Diagramm für den Gleichraumprozess.....	18
Abbildung 2.3: p, V – Diagramm für den Seiligerprozess.....	18
Abbildung 2.4: Realgasfaktor von Luft als Funktion von Druck und Temperatur.....	19
Abbildung 2.5: Verschiedene Brennverläufe.....	25
Abbildung 2.6: Umsetzraten entsprechend Abb. 2.5.....	26
Abbildung 2.7: Vibe-Ersatzabrennverlauf für verschiedene Formparameter.....	29
Abbildung 2.8: Summenbrennverlauf für verschiedene Formparameter.....	29
Abbildung 2.9: Vibe Teil-Brennverläufe und Doppel-Vibe-Funktion.....	31
Abbildung 3.1: Menü Abfolge zum Start des Visual Basic Editors.....	34
Abbildung 3.2: Moduleditor.....	35
Abbildung 3.3: Der <i>Add-Ins-Manager</i>	36
Abbildung 3.4: Der Solver.....	37
Abbildung 3.5: Options-Dialog des Solvers.....	37
Abbildung 3.6: Dialogfeld mit Lösungsvorschlag.....	38
Abbildung 3.7: Dialogfeld mit Alternativ-Lösung.....	38
Abbildung 5.1: Excel Warnhinweis.....	51
Abbildung 5.2: Menü zur Einstellung der Sicherheitsstufe.....	52
Abbildung 5.3: Menü Druckverlaufsanalyse.....	54
Abbildung 5.4: Ausschnitt der Arbeitsmappe DATEN.xls.....	54
Abbildung 5.5: Fehlermeldung des Solvers.....	56

8.2 Verwendete Formelzeichen

a	[--]	Taktzahl
A_1	[m^2]	Zylinderdeckelfläche
A_2	[m^2]	Kolbenbodenfläche
$A_{3,j}$	[m^2]	Zylinderwandfläche
be	[kg/J], [g/kWh]	spezifischer Kraftstoffdurchsatz
cm	[m/s]	mittlere Kolbengeschwindigkeit
cu	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit
cv	[J/Kg/K]	spezifische Wärmekapazität, V Konstant
D	[m]	Zylinderdurchmesser
H_u	[kJ/kg]	Heizwert (unterer)
L_{min}	[kg/kg]	Mindestluftmasse
M	[Nm]	Drehmoment
m	[--]	Formfaktor
m_B	[kg]	Kraftstoffmasse
m_L	[kg]	Über das Einlassventil eingeströmte Luftmasse
m_{sp}	[kg]	Spülmasse
m_{LZ}	[kg]	vorhandene Luftmasse
m_z	[kg]	Masse der Zylinderladung nach Ladungswechsel
n	[min^{-1}], [s^{-1}]	Motordrehzahl
n_a	[min^{-1}], [s^{-1}]	Arbeitspielfrequenz
p	[bar], [Pa]	Druck
P_e	[W]	Nutzleistung
p_e	[0,1 kJ/dm ³]	effektiver Mitteldruck
QB	[J]	Wärme
R	[J/kg/K]	spezifische Gaskonstante
r	[m]	Kurbelradius
s	[m]	Kolbenhub
T	[K]	Temperatur
T_w	[K]	Zylinderwandtemperatur
t, t_0	[s]	Zeit

u	[J/kg]	spezifischer innere Energie
U	[J]	innere Energie
V	[m ³]	Volumen
V _c	[m ³]	Kompressionsvolumen
V _h	[m ³]	Hubvolumen
V _z	[m ³]	Zylindervolumen
V _{be}	[--]	Vibe Funktion
w _e	[J/kg]	spezifische effektive Arbeit
W _e	[J]	effektive Arbeit
W _i	[J]	indizierte Arbeit
x	[--]	Durchbrennfunktion
z	[--]	Anzahl der Zylinder
Z	[--]	Realgasfaktor
Z _K	[m]	Kolbenweg
α	[W/m ² /K]	Wärmeübergangskoeffizient
ε	[--]	Verdichtungsverhältnis
η _e	[--]	effektiver Wirkungsgrad
η _i	[--]	indizierter Wirkungsgrad
η _m	[--]	mechanischer Wirkungsgrad
φ	[°KW]	Kurbelwinkel
φ _{VB}	[°KW]	Kurbelwinkel Verbrennungsbeginn
φ _{VD}	[°KW]	Kurbelwinkel Verbrennungsdauer
φ _{VE}	[°KW]	Kurbelwinkel Verbrennungsende
λ ₁	[--]	Luftaufwand
λ _L	[--]	Liefergrad
λ _{Sp}	[--]	Spülgrad
λ _S	[--]	Schubstangenverhältnis
λ _V	[--]	Luftverhältnis
λ _Z	[--]	Fanggrad
ρ _o	[--]	Dichte der Luft
ω	[s ⁻¹], [min ⁻¹]	Winkelgeschwindigkeit

8.3 Programm-Code

Vorbemerkungen

1. Die nummerierten Objekt und Modul-Überschriften sind **nicht** Bestandteil des Programm-Codes.
2. Der Unterstrich (_) gehört zum VBA Befehlssatz und ermöglicht im Programm-Code einen Zeilenumbruch. Die Vermeidung von Endloszeilen verbessert den Überblick, ist aber nicht zwingend notwendig.
3. Zur besseren Übersicht werden folgende Vereinbarungen getroffen:
Start und Ende der Prozeduren: **Blaue Schrift**
Kommentar: **Grüne Schrift**
Sprungmarken: **Rote Schrift**

1. Diese Arbeitsmappe

Option Explicit

```
Private Sub Workbook_BeforeClose(Cancel As Boolean)
```

```
'Löschen des Menüs.
```

```
' 28.07.2002
```

```
'Stefan Degener
```

```
'-----
```

```
Dim myMenu As CommandBarControl
```

```
On Error Resume Next
```

```
Set myMenu = Application.CommandBars.FindControl(, , _
```

```
"Druckverlaufsanalyse")
```

```
myMenu.Delete
```

```
Set myMenu = Application.CommandBars.FindControl(, , _
```

```
"Druckverlaufsanalyse")
```

```
myMenu.Delete
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Workbook_Open()
'Erstellen des Menüs.
' 28.07.2002
'Stefan Degener
'-----
Dim myMenu As CommandBarPopup, myItem As CommandBarButton

frm_start.Show

Set myMenu = Application.CommandBars(1).Controls. _
    Add(msoControlPopup, , , 3)
myMenu.Caption = "Druckverlaufsanalyse"
myMenu.Tag = "Druckverlaufsanalyse"

Set myItem = myMenu.Controls.Add(msoControlButton)
myItem.Caption = "Daten einlesen"
myItem.OnAction = "Einlesen"

Set myItem = myMenu.Controls.Add(msoControlButton)
myItem.Caption = "Druckverlauf einlesen"
myItem.OnAction = "Druckverlauf"

Set myItem = myMenu.Controls.Add(msoControlButton)
myItem.Caption = "Brennverlauf berechnen"
myItem.OnAction = "Komplettrechnung"

Set myItem = myMenu.Controls.Add(msoControlButton)
myItem.Caption = "Alles löschen!"
myItem.OnAction = "Löschen"

End Sub
```

2. Formulare

2.1 frm_druckverlauf

Option Explicit

```
Private Sub Button2_OK_Click()
```

```
Dim q As Variant
```

```
'Belegung des OK-Buttons.
```

```
' 28.07.2002
```

```
'Stefan Degener
```

```
'-----
```

```
On Error GoTo 1
```

```
Workbooks.Open Filename:=dateiname
```

```
Range("E4:F723").Select
```

```
Selection.Copy
```

```
Application.DisplayAlerts = False
```

```
ActiveWorkbook.Close
```

```
Application.DisplayAlerts = True
```

```
Windows(Dateiname2).Activate
```

```
ActiveWindow.WindowState = xlMaximized
```

```
Worksheets(Table1).Select
```

```
Range("E2").Select
```

```
ActiveSheet.Paste
```

```
Range("E2").Select
```

```
GoTo 2
```

```
1 q = MsgBox("Falsche Eingabe oder Datei nicht vorhanden!", _
```

```
5 + 48 + 256 + 4096, "Fehlermeldung")
```

```
If q = 4 Then
```

```
    Unload frm_druckverlauf
```

```
    druckverlauf
```

```
End If
```

2 Unload frm_druckverlauf

End Sub

Private Sub Button2_ABBRECHEN_Click()

'Belegung des Abbrechen-Buttons.

' 28.07.2002

'Stefan Degener

'-----

Unload frm_druckverlauf

End Sub

Private Sub Button2_SUCHEN_Click()

'Belegung des Suchen-Buttons.

' 28.07.2002

'Stefan Degener

'-----

Dim x As Variant

namen

dateiname = Application.GetOpenFilename("exceldateien(*.xls), *.xls", ,
"Suchen", , False)

If dateiname = False Then

 Unload frm_druckverlauf

 Exit Sub

End If

Workbooks.Open Filename:=dateiname

 Range("E4:F723").Select

 Selection.Copy

 Application.DisplayAlerts = False

```
ActiveWorkbook.Close
Application.DisplayAlerts = True
Windows(Dateiname2).Activate
ActiveWindow.WindowState = xlMaximized
Worksheets(Table1).Select
Range("E2").Select
ActiveSheet.Paste
Range("E2").Select
Unload frm_druckverlauf
```

End Sub

2.2 frm_einlesen

```
Option Explicit
Public Motor1 As String
```

Private Sub Button_OK_Click()

```
Dim q As Variant
'Belegung des OK-Buttons.
' 28.07.2002
'Stefan Degener
'-----
namen
```

On Error GoTo 1

```
Workbooks.Open Filename:=dateiname
Motor1 = Range("B1").Value
Range("B4:B40").Select
Selection.Copy
Application.DisplayAlerts = False
ActiveWorkbook.Close
```

```
Application.DisplayAlerts = True
Windows(Dateiname2).Activate
ActiveWindow.WindowState = xlMaximized
Worksheets(Table1).Select
Range("B3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("B2").Value = Motor1
Range("B2").Select
GoTo 2
1 q = MsgBox("Falsche Eingabe oder Datei nicht vorhanden!", _
5 + 48 + 256 + 4096, "Fehlermeldung")
```

```
If q = 4 Then
    Unload frm_einlesen
    einlesen
End If
```

```
2 Unload frm_einlesen
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Button_ABBRUCH_Click()
'Belegung des Abbruch-Buttons.
' 28.07.2002
'Stefan Degener
'-----
Unload frm_einlesen
End Sub
```

```
Private Sub Button_SUCHEN_Click()
'Belegung des Suchen-Buttons.
' 28.07.2002
'Stefan Degener
'-----
namen
dateiname = Application.GetOpenFilename("exceldateien(*.xls),*.xls", ,
"Suchen", , False)

If dateiname = False Then
    Unload frm_einlesen
    Exit Sub
End If

Workbooks.Open Filename:=dateiname
Motor1 = Range("B1").Value
Range("B4:B40").Select
Selection.Copy
Application.DisplayAlerts = False
ActiveWorkbook.Close
Application.DisplayAlerts = True
Windows(Dateiname2).Activate
ActiveWindow.WindowState = xlMaximized
Worksheets(Table1).Select
Range("B3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("B2").Value = Motor1
Range("B2").Select
Unload frm_einlesen

End Sub
```

2.3 frm_start

Option Explicit

```
Private Sub Button_START_CLICK()
Unload frm_start
Worksheets("Daten").Select
End Sub
```

3. Module

3.1 Intro

Option Explicit

Public Table1, Table2, Table3, Table4, Table5, Table6, FehlerKopf As String

Public Dateiname2 As Variant

Public F As Byte

Sub namen()

'Zuordnen der Tabellen Bezeichnung.

' 01.07.2002

'Stefan Degener

'-----

Table1 = "Daten"

Table2 = "Hilfsgrößen"

Table3 = "Ergebnisse"

Table4 = "Ausgabe"

Table5 = "VIBE"

Table6 = "VIBE 2"

Dateiname2 = ActiveWorkbook.Name

FehlerKopf = "Fehlermeldung!"

End Sub

Sub einlesen()

'Formular zum Einlesen der grundsätzlichen Daten aufrufen.

' 01.07.2002

'Stefan Degener

'-----

frm_einlesen.Show

End Sub

Sub druckverlauf()

'Formular zum Einlesen des Druckverlaufes aufrufen.

' 01.07.2002

'Stefan Degener

'-----

frm_druckverlauf.Show

End Sub

Sub Komplettrechnung()

'Zusammenfassen der einzelnen Prozeduren.

' 01.07.2002

'Stefan Degener

'-----

If F = 2 Then GoTo 1

F = 0

namen

Filtern

Hilfsgrößen

Volumen

pmiSUB

Luftverhältnis

Arbeit

Ausgabe

1 F = 1000

Worksheets(Table3).Select

End Sub

Sub löschen()

'Daten und Druckverlauf löschen.

' 01.07.2002

'Stefan Degener

'-----

namen

F = 0

Worksheets(Table2).Range("A2:B262, G2:G21").ClearContents

Worksheets(Table3).Range("A3:O263").ClearContents

Worksheets(Table4).Range("B1, C4:C9, C12:C25, B28, D28, C31:F33, _
C36:C38, B41:B44, D41:D44, C47:C51, C53").ClearContents

Worksheets(Table5).Range("D4:D264").ClearContents

Worksheets(Table6).Range("D4:D264").ClearContents

End Sub

Sub Fehlermeldung()

'Ausgabe der Fehlermeldung

' 04.08.2002

'Stefan Degener

'-----

If F = 1000 Then GoTo 1

F = MsgBox("Fehler! Bitte überprüfen Sie Ihre Eingabewerte.", _
1 + 48 + 4096, FehlerKopf)

If F = 2 Then Komplettrechnung

1 End Sub

3.2 Main1

Option Explicit

' Zu errechnende Größen

```
Public np, fi(720), p(720), V(720), A3(720), Tb(3), pmi, pmiHD, _
pmr, Etam, boggrd, svh, AU, cm, GLF, GLF1, GB0, QB0, _
GH2o, GLZ, GBR, LAM0, VH, VC, pme, p2, fiEB, fiVE, _
AM0(720), GZ(720), DELFI, FIP3, GB, jES, jEB, jVE, jAO _
As Double
```

' Einzulesende Größen

```
Public s, lp, d, nMOT, mL, zyl, beff, Peff, Pbez, TW(3), SW(3), _
Hu, LamF, x, LamR, Lmin, eps, fiES, fiAO, Kappa, C1, C2, _
A1, A2 As Double
```

Public Motor As String

Sub Filtern()

'1. Filtern der Druckwerte nach Savitzky und Golay

'2. Indizes bestimmen

' 06.06.2002

'Stefan Degener

'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse

' für Dieselmotoren, Unterprogramm Upein.

On Error GoTo Fehler

Dim k, i, j As Integer

Dim Fd As Double

Dim Zelle, Zelle2 as Variant

Worksheets(Table1).Select

Range("E2").Select

For i = 0 To 719

fi(i) = ActiveCell.Offset(i, 0).Value

p(i) = ActiveCell.Offset(i, 1).Value

Next i

np = i - 1

Fd = Worksheets("Daten").Range("B6").Value

Worksheets(Table2).Select

Range("A2").Select

For k = 1 To Fd

For i = 3 To np - 3

```
p(i) = (7 * p(i) _  
+ 6 * (p(i - 1) + p(i + 1)) _  
+ 3 * (p(i - 2) + p(i + 2)) _  
- 2 * (p(i - 3) + p(i + 3)) _  
) / 21
```

Next i

Next k

fiEB = Worksheets(Table1).Range("B29").Value

fiVE = Worksheets(Table1).Range("B30").Value

fiES = Worksheets(Table1).Range("B11").Value

fiAO = Worksheets(Table1).Range("B12").Value

'Indizes bestimmen

For i = 0 To np

Select Case i

Case Is <= fiES

jES = i

Case Is <= fiEB

jEB = i

Case Is <= fiVE

```
jVE = i  
Case Is <= fAO  
    jAO = i  
End Select  
Next i
```

j = 2

```
For i = jES To jAO  
    Zelle = "A" & j  
    Zelle2 = "B" & j  
    Worksheets(Table2).Range(Zelle).Value = i  
    Worksheets(Table2).Range(Zelle2).Value = p(i)  
    j = j + 1  
Next I
```

Ende:

Exit Sub

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

```
Sub Hilfsgrößen()  
'Berechnung der Hilfsgrößen  
' 06.06.2002  
'Stefan Degener  
'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse  
'      für Dieselmotoren, Unterprogramm Upein
```

On Error GoTo Fehler

Const pi = 3.14159265

Dim i As Byte

'---Einlesen-----

```
s = Worksheets(Table1).Range("B7").Value
lp = Worksheets(Table1).Range("B10").Value
d = Worksheets(Table1).Range("B8").Value
nMOT = Worksheets(Table1).Range("B25").Value
mL = Worksheets(Table1).Range("B27").Value
zyl = Worksheets(Table1).Range("B28").Value
beff = Worksheets(Table1).Range("B26").Value
Peff = Worksheets(Table1).Range("B24").Value
Pbez = Worksheets(Table1).Range("B23").Value
Hu = Worksheets(Table1).Range("B4").Value
LamF = Worksheets(Table1).Range("B32").Value
LamR = Worksheets(Table1).Range("B33").Value
x = Worksheets(Table1).Range("B34").Value
Lmin = Worksheets(Table1).Range("B3").Value
eps = Worksheets(Table1).Range("B9").Value
p2 = Worksheets(Table1).Range("B31").Value
Tb(1) = Worksheets(Table1).Range("B17").Value
Tb(2) = Worksheets(Table1).Range("B18").Value
Tb(3) = Worksheets(Table1).Range("B19").Value
SW(1) = Worksheets(Table1).Range("B20").Value
SW(2) = Worksheets(Table1).Range("B21").Value
SW(3) = Worksheets(Table1).Range("B22").Value
Kappa = Worksheets(Table1).Range("B5").Value
C1 = Worksheets(Table1).Range("B13").Value
C2 = Worksheets(Table1).Range("B14").Value
A1 = Worksheets(Table1).Range("B15").Value
A2 = Worksheets(Table1).Range("B16").Value
Motor = Worksheets(Table1).Range("B2").Value
```

'---Rechnen-----

For i = 1 To 3

$$TW(i) = Tb(i) - SW(i) * (1 - Peff / zyl / Pbez)$$

Next i

$$boggrd = 180 / pi$$

$$svh = s * 0.5 / lp$$

$$AU = 0.12793 / (d ^ 0.2)$$

$$cm = (s * nMOT) / 30$$

$$GLF = (mL * 120) / (zyl * nMOT)$$

$$GB0 = beff * Peff / (30 * nMOT * zyl * 1000)$$

$$QB0 = GB0 * Hu$$

$$GLF1 = GLF * LamF$$

$$GH2o = GLF1 * x$$

$$GLZ = GLF1 - GH2o$$

$$GBR = GLZ / (LamR * Lmin)$$

$$LAM0 = GLZ / ((GB0 + GBR) * Lmin)$$

$$VH = (d ^ 2) * pi / 4 * s$$

$$VC = VH / (eps - 1)$$

$$pme = Peff * 1200 / (VH * nMOT * zyl * 1000)$$

'---Ausgabe---

Worksheets(Table2).Range("G2").Value = boggrd

Worksheets(Table2).Range("G3").Value = svh

Worksheets(Table2).Range("G4").Value = AU

Worksheets(Table2).Range("G5").Value = cm

Worksheets(Table2).Range("G6").Value = GLF

Worksheets(Table2).Range("G7").Value = GB0

Worksheets(Table2).Range("G8").Value = QB0

Worksheets(Table2).Range("G9").Value = GLF1

Worksheets(Table2).Range("G10").Value = GH2o

Worksheets(Table2).Range("G11").Value = GLZ

Worksheets(Table2).Range("G12").Value = GBR

Worksheets(Table2).Range("G13").Value = LAM0

```
Worksheets(Table2).Range("G14").Value = VH
Worksheets(Table2).Range("G15").Value = VC
Worksheets(Table2).Range("G16").Value = pme
```

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

Sub Volumen()

```
'Volumen errechnen!
' 13.06.2002
'Stefan Degener
'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse
'      für Dieselmotoren, Unterprogramm Upein.
```

'-----

On Error GoTo Fehler

Dim i, fib, ypsilon As Double

For i = 0 To np

fib = fi(i) / boggrd

ypsilon = (1 - Cos(fib) _
+ (1 - (1 - svh ^ 2 * Sin(fib) ^ 2) ^ (0.5)) / svh)

V(i) = VC + 0.5 * VH * ypsilon

A3(i) = (2 * VH * ypsilon) / d

Next i

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

Sub pmiSUB()

'1. Indizierten Mitteldruck errechnen!

' 07.06.2002

'Stefan Degener

'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse

' für Dieselmotoren, Unterprogramm Upaus.

'-----

On Error GoTo Fehler

Dim i, j As Integer

pmi = 0

pmiHD = 0

For i = 0 To np - 1

 pmi = pmi + (p(i + 1) + p(i)) * 0.5 * (V(i + 1) - V(i))

 If fi(i) >= fiES And fi(i) <= fiAO Then

 pmiHD = pmiHD + (p(i + 1) + p(i)) * 0.5 * (V(i + 1) - V(i))

 End If

Next i

pmi = (pmi + (p(0) + p(np)) * 0.5 * _

$$\text{pmiHD} = (\text{pmiHD} + (\text{p}(0) + \text{p}(\text{np})) * 0.5 * \frac{(\text{V}(0) - \text{V}(\text{np}))}{(\text{VH})})$$

$$\text{pme} = \text{Peff} * 1.2 / (\text{VH} * \text{zyl} * \text{nMOT})$$

$$\text{pmr} = \text{pmi} - \text{pme}$$

$$\text{Etam} = \text{pme} / \text{pmi}$$

$$\text{Worksheets(Table2).Range("G17").Value} = \text{pmi}$$

$$\text{Worksheets(Table2).Range("G18").Value} = \text{pme}$$

$$\text{Worksheets(Table2).Range("G19").Value} = \text{pmr}$$

$$\text{Worksheets(Table2).Range("G20").Value} = \text{Etam}$$

$$\text{Worksheets(Table2).Range("G21").Value} = \text{pmiHD}$$

Ende:

Exit Sub

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

Sub Luftverhältnis()

'1. Luftverhältnis

'2. Masse bestimmen

' 06.06.2002

' Stefan Degener

'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse
 für Dieselmotoren, Unterprogramm DVA.

On Error GoTo Fehler

Dim i As Integer

Worksheets(Table3).Select

Range("A3").Select

'Rechnung bis Einspritzbeginn

For i = 0 To jEB

AM0(i) = LamR

GZ(i) = GLZ + GH2o + GBR

Next i

'Rechnung Verbrennungsphase

DELFI = fiVE - fiEB

For i = jEB + 1 To jVE

FIP3 = (1 - (fiVE - fi(i)) / DELFI) ^ 3

GB = FIP3 * GB0

GZ(i) = GLZ + GH2o + GBR + GB

AM0(i) = (GLZ / (GB + GBR)) / Lmin

Next i

'Expansionsphase nach Verbrennung

For i = jVE + 1 To jAO

AM0(i) = LAM0

GZ(i) = GLZ + GB0 + GH2o + GBR

Next i

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

3.3 Main2

Option Explicit

Public fiAO1, fiAO2, RGK, T(720), PLV, SQB(720), arb(720), Qmax, _
 QmaxA, dmZ, TmZ, dLam, BZ, p11, T11, V11, Tm, pm, Vm, dp, _
 alpha(720), Dfi(720), dQKO, dQDE, dQBUE, dQW, uz, cv, dudL, dutot, _
 DQB(720), ITER, phi(720), SARB(720), SDU(720), SdQW(720), _
 cw(720), QB(720), dQBr(720), dQmax, pmax, Tmax, dQKW, i50, pKW, _
 TKW, fisp, Sphi, dphi, jsp, iZB, am, ab, fiZB, dfiZV, EGB As Double

Sub Arbeit()

'1. Druckniveaukorrektur

'2. Berechnung der Arbeit

'3. Berechnung des Brennverlaufs

'4. Berechnung des Summenbrennverlaufs

'5. Brennverlaufsiteration

' 06.06.2002

' Stefan Degener

'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse

' für Dieselmotoren, Unterprogramm Upbvi.

On Error GoTo Fehler

Dim i, j As Integer

Dim IRECHN, IRECHNmax, dpn As Double

Dim DRUCK, Abbruch As Boolean

DRUCK = False

IRECHN = 0

```
IRECHNmax = Worksheets(Table1).Range("B35").Value
Abbruch = False
QmaxA = 0
dpn = p2 - p(jES)
```

For i = 0 To jAO

 T(i) = 300

Next i

V11 = (V(jES) + V(jES + 1)) * 0.5

1 IRECHN = IRECHN + 1

If IRECHN >= IRECHNmax Then

'---Dialogfeld bei Abbruch durch max. iteration-----

```
MsgBox "Maximale Anzahl der Iterationsschritte erreicht!", _
0 + 48, "Keine Iteration!"
```

Abbruch = True

GoTo **100**

End If

'----Schleife 1----

For i = jES To jAO

 p(i) = p(i) + dpn

 SARB(i) = 0

 arb(i) = 0

 SDU(i) = 0

 SdQW(i) = 0

Next i

'----Ende Schleife 1-

'-----Berechnung der Arbeit-----

6 arb(jES) = 0

'----Schleife 2----

For i = jES To jAO

arb(i + 1) = -(p(i) + p(i + 1)) * 0.5 * (V(i + 1) - V(i)) * 100

RGK = RGK1(AM0(i), p(i), T(i))

T(i) = p(i) * V(i) / (GZ(i) * RGK / 100)

SARB(i) = SARB(i - 1) + arb(i)

Next i

'----Ende Schleife 2----

SQB(jES) = 0

Qmax = 0

dmZ = 0

dLam = 0

BZ = 0

p11 = (p(jES) + p(jES + 1)) * 0.5

T11 = (T(jES) + T(jES + 1)) * 0.5

PLV = 0

'----Schleife 3----

For i = jES + 1 To jAO

PLV = i

Tm = (T(i) + T(i - 1)) * 0.5

If Tm < 0 Then Tm = T(jES)

pm = (p(i) + p(i - 1)) * 0.5

If pm < 0 Then pm = p(jES)

Vm = (V(i) + V(i - 1)) * 0.5

If i > jEB Then GoTo 2

dp = 0

GoTo 3

$$2 \quad dp = (pm / p11) - (V11 / Vm) \wedge Kappa$$

'Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten

$$3 \quad \begin{aligned} alpha(i) &= AU * (pm \wedge 0.8) / (Tm \wedge 0.53) * (C1 * cm + C2 * T11 * VH / V11 * dp) \wedge 0.8 \\ Dfi(i) &= fi(i) - fi(i - 1) \\ dQKO &= A1 * (Tm - TW(1)) \\ dQDE &= A2 * (Tm - TW(2)) \\ dQBUE &= (A3(i) + A3(i - 1)) * 0.5 * (Tm - TW(3)) \\ dQW &= -alpha(i) * (dQKO + dQDE + dQBUE) * Dfi(i) / (6 * nMOT) \end{aligned}$$

Innere_Energie

If (i >= jEB) Then

$$\begin{aligned} BZ &= (GZ(i) - GLF1) \wedge 2 \\ dmZ &= GZ(i) - GZ(i - 1) \\ TmZ &= (T(i) - T(i - 1)) \\ \text{If } (BZ > 0) \text{ Then } dLam &= -GLZ * dmZ / (Lmin * BZ) \end{aligned}$$

$$dutot = uz * dmZ + GZ(i) * (cv * TmZ + dLam * dudL)$$

Else

$$dutot = cv * (T(i) - T(i - 1)) * GZ(i)$$

End If

$$dutot = dutot / 1000$$

$$DQB(i) = dutot - dQW - arb(i)$$

$$SQB(i) = DQB(i) + SQB(i - 1)$$

$$SDU(i) = SDU(i - 1) + dutot$$

$$SdQW(i) = SdQW(i - 1) + dQW$$

$$cw(i) = cv$$

$$QB(i) = SQB(i) / QB0$$

$$dQBr(i) = DQB(i) / Dfi(i)$$

If i = jEB Then

```
If (Abs(SQB(jEB) / QB0)) > 0.001 Then
    dpn = 2 * p(jES) * SQB(jEB) / QB0
    GoTo 1
End If
End If
```

100 If Qmax < SQB(i) Then Qmax = SQB(i)

Next i

'----Ende Schleife 3----

```
If DRUCK = True Then GoTo 4
If (Abs((QmaxA - Qmax) / Qmax)) <= 0.001 Then
    DRUCK = True
End If
```

QmaxA = Qmax

```
For i = jES To jAO
    phi(i) = SQB(i) / Qmax
    If i < jEB Then phi(i) = 0
    If phi(i) < 0 Then phi(i) = 0
Next i
```

'Korrektur des Massenverlaufs

```
For i = jEB To jVE
    GZ(i) = phi(i) * GB0 + GBR + GLF1
    If GZ(i) < GZ(i - 1) Then GZ(i) = GZ(i - 1)
```

AM0(i) = GLZ / (GZ(i) - GLF1) / Lmin

If Abbruch = True Then GoTo 4

Next i

GoTo 6

'---Ausgabe der Werte im Tabellenblatt "Ergebnisse"---

4 Worksheets(Table3).Select

Range("A3").Select

j = 0

For i = jES To jAO

ActiveCell.Offset(j, 0).Value = i

ActiveCell.Offset(j, 1).Value = V(i) * 1000

ActiveCell.Offset(j, 2).Value = p(i)

ActiveCell.Offset(j, 3).Value = T(i)

ActiveCell.Offset(j, 4).Value = DQB(i)

ActiveCell.Offset(j, 5).Value = -SARB(i)

ActiveCell.Offset(j, 6).Value = SDU(i)

ActiveCell.Offset(j, 7).Value = SdQW(i)

ActiveCell.Offset(j, 8).Value = SQB(i)

ActiveCell.Offset(j, 9).Value = AM0(i)

ActiveCell.Offset(j, 10).Value = GZ(i) * 1000

ActiveCell.Offset(j, 11).Value = alpha(i)

ActiveCell.Offset(j, 12).Value = cw(i) / 1000

ActiveCell.Offset(j, 13).Value = phi(i)

ActiveCell.Offset(j, 14).Value = QB(i)

j = j + 1

Next i

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

Function RGK1(AM0x, px, Tx) As Double
 'Bestimmung der Gaskonstante
 ' 06.06.2002
 'Stefan Degener
 'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse
 ' für Dieselmotoren, Funktion RGK.

Dim am, P1, R, A, B, C As Double

am = AM0x
 P1 = px / 0.980685
 If am < 1.001 Then am = 1.001
 R = (am - 1) / (0.0698 + am)

A = 0.35 - 0.05 * R ^ 0.765
 B = 16.1 + 14.3 * R ^ 0.51
 C = 0.352 + 0.102 * R ^ 0.401

RGK1 = (29 + A + (B / Tx ^ C - A) * P1 / 100) * 9.80685 / 1000

If RGK1 > 0.35 Then RGK1 = 0.35
 End Function

Sub Innere_Energie()
 'Bestimmung der Inneren Energie
 ' 06.06.2002
 'Stefan Degener
 'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse
 ' für Dieselmotoren, Unterprogramm upu.

On Error GoTo Fehler

Dim C0, C02, help, Lambda, B1, B2, B3, D1, D2, D3 As Double

Const D4 = 196082.7008

Lambda = AM0(PLV)

C0 = T(PLV) - 273.15

C02 = C0 ^ 2

If Lambda > 1 Then

 help = Application.WorksheetFunction.Ln(Lambda)

 B1 = 0.0000070091472 * C02 / Exp(0.75 * help)

 B2 = 0.048558216 * C0 / Exp(0.8 * help)

 B3 = 67.056584 / Exp(0.75 * help)

Else

 Lambda = 1

 B1 = 0.0000070091472 * C02

 B2 = 0.048558216 * C0

 B3 = 67.056584

End If

D1 = -0.000014090553 * C02 - B1

D2 = 0.11226197 * C0 + B2

D3 = 707.56257 + B3

uz = (D1 + D2 + D3) * C0 + D4

cv = 3 * D1 + 2 * D2 + D3

dudL = (0.75 * B1 - 0.8 * B2 - 0.93 * B3) * C0 / Lambda

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

Sub Maxima()

'Bestimmung der Maximalwerte

' 26.06.2002

'Stefan Degener

'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse

' für Dieselmotoren, Unterprogramm Upaus.

'-----

On Error GoTo Fehler

Dim i As Integer

Worksheets(Table4).Select

dQmax = 0

pmax = 0

Tmax = 0

dQKW = 0

i50 = 0

pKW = 0

TKW = 0

For i = jES To jAO

If dQBr(i) > dQmax Then

 dQmax = dQBr(i)

 dQKW = fi(i)

End If

If phi(i) <= 0.5 Then

 i50 = i

End If

If p(i) > pmax Then

 pmax = p(i)

 pKW = fi(i)

End If

```
If T(i) > Tmax Then
    Tmax = T(i)
    TKW = fi(i)
End If
```

Next i

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

Sub BV_Schwerpunkt()

'Genaue Bestimmung des Brennverlauf-Schwerpunktes

' 26.06.2002

'Stefan Degener

'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse

' für Dieselmotoren, Unterprogramm Upaus

'-----

On Error GoTo Fehler

Dim i As Integer

fisp = 0

Sphi = 0

For i = jEB To jAO - 1

dphi = SQB(i + 1) - SQB(i)

jsp = i

fisp = fisp + (fi(i) * dphi)

Sphi = Sphi + dphi

If phi(i + 1) = 1 Then GoTo 1

Next i

1 fisp = fisp / Sphi

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

Sub Zündbeginn()

'Bestimmung des Zündbeginns

' 26.06.2002 Stefan Degener

'Vergl.: Fortran-Programm Thermodynamische Druckverlaufsanalyse

' für Dieselmotoren, Unterprogramm Upaus.

'-----

On Error GoTo Fehler

Dim i As Integer

For i = 1 To jVE

If (DQB(i) <= 0 And fi(i) < 365) Then iZB = i

Next i

am = (DQB(iZB + 1) - DQB(iZB)) / (fi(iZB + 1) - fi(iZB))

ab = DQB(iZB + 1) - (am * fi(iZB + 1))

fiZB = -ab / am

dfiZV = fiZB - fiEB

EGB = Qmax / QB0

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

3.4 Outro

Option Explicit

Sub Ausgabe()

'Ausgabe

' 26.06.2002

'Stefan Degener

'-----

On Error GoTo Fehler

Dim fiVE1, i, j As Double

Dim Zelle As Variant

Maxima

BV_Schwerpunkt

Zündbeginn

'---Motor-----

Worksheets(Table4).Range("B1").Value = Motor

'-----

'---Motorgeometrie-----

Worksheets(Table4).Range("C4").Value = s

Worksheets(Table4).Range("C5").Value = d

Worksheets(Table4).Range("C6").Value = eps

Worksheets(Table4).Range("C7").Value = lp

Worksheets(Table4).Range("C8").Value = fiES

Worksheets(Table4).Range("C9").Value = fiAO

'-----

'---Betriebspunkt-----

Worksheets(Table4).Range("C12").Value = Peff
Worksheets(Table4).Range("C13").Value = nMOT
Worksheets(Table4).Range("C14").Value = Etam
Worksheets(Table4).Range("C15").Value = pme
Worksheets(Table4).Range("C16").Value = pmi
Worksheets(Table4).Range("C17").Value = pmiHD
Worksheets(Table4).Range("C18").Value = beff
Worksheets(Table4).Range("C19").Value = GB0 * 1000000
Worksheets(Table4).Range("C20").Value = mL
Worksheets(Table4).Range("C21").Value = GLF1 * 1000
Worksheets(Table4).Range("C22").Value = LamF
Worksheets(Table4).Range("C23").Value = LamR
Worksheets(Table4).Range("C24").Value = LAM0
Worksheets(Table4).Range("C25").Value = x

'-----

'---Wärmeübergang-----

Worksheets(Table4).Range("B28").Value = C1
Worksheets(Table4).Range("D28").Value = C2
Worksheets(Table4).Range("C31").Value = A1
Worksheets(Table4).Range("C32").Value = A2
Worksheets(Table4).Range("D31").Value = SW(1)
Worksheets(Table4).Range("D32").Value = SW(2)
Worksheets(Table4).Range("D33").Value = SW(3)
Worksheets(Table4).Range("E31").Value = Tb(1)
Worksheets(Table4).Range("E32").Value = Tb(2)
Worksheets(Table4).Range("E33").Value = Tb(3)
Worksheets(Table4).Range("F31").Value = TW(1)
Worksheets(Table4).Range("F32").Value = TW(2)
Worksheets(Table4).Range("F33").Value = TW(3)

'-----

'---Stoffwerte-----

Worksheets(Table4).Range("C36").Value = Hu
Worksheets(Table4).Range("C37").Value = Lmin
Worksheets(Table4).Range("C38").Value = Kappa

'-----

'---Max_Werte-----

Worksheets(Table4).Range("B41").Value = pmax
Worksheets(Table4).Range("D41").Value = pKW
Worksheets(Table4).Range("B42").Value = Tmax
Worksheets(Table4).Range("D42").Value = TKW
Worksheets(Table4).Range("B43").Value = dQmax
Worksheets(Table4).Range("D43").Value = dQKW
Worksheets(Table4).Range("B44").Value = Qmax
Worksheets(Table4).Range("D44").Value = fi(jsp + 1)

'-----

'--Schwerpunkt Brennverlauf und Zünddaten---

Worksheets(Table4).Range("C47").Value = fisp
Worksheets(Table4).Range("C48").Value = i50
Worksheets(Table4).Range("C49").Value = fiEB
Worksheets(Table4).Range("C50").Value = fiZB
Worksheets(Table4).Range("C51").Value = dfiZV
Worksheets(Table4).Range("C53").Value = EGB

'-----

'---Default Daten für VIBE-Einfach-----

Worksheets(Table5).Range("C4").Value = 1
Worksheets(Table5).Range("C5").Value = QB0
Worksheets(Table5).Range("C6").Value = fiZB
Worksheets(Table5).Range("C7").Value = fiVE

j = 4

For i = jES To jAO

Zelle = "D" & j

Worksheets(Table5).Range(Zelle).Value = i

j = j + 1

Next i

'Default-Daten für VIBE-Doppelt
---Festlegung des Verbrennungsendes durch Symmetrie---
fiVE1 = dQKW + (dQKW - fiZB)
Worksheets(Table6).Range("C4").Value = 2
Worksheets(Table6).Range("C10").Value = 0.5
Worksheets(Table6).Range("C14").Value = QB0
Worksheets(Table6).Range("C5, C11").Value = fiZB
Worksheets(Table6).Range("C6").Value = fiVE1
Worksheets(Table6).Range("C12").Value = fiVE
Worksheets(Table6).Range("C7").Value = 0.1

j = 4
For i = jES To jAO

Zelle = "D" & j
Worksheets(Table6).Range(Zelle).Value = i
j = j + 1

Next i

'-----

Ende:

Exit Sub

'-----

Fehler:

Fehlermeldung

End Sub

3.5 Vibe

Option Explicit

Function VIBE_einfach(m, fiZB, fiVE, QB0_Vibe, GKW As Double) As Double
'Bestimmung des Vibe-Ersatzbrennverlaufs

' 06.06.2002

'Stefan Degener

'Vergl.: Mollenhauer, K.; Handbuch für Dieselmotoren, 1997, S.37ff

'-----

Dim fiVD, fiD, help, mm As Double
fiD = GKW - fiZB

fiVD = fiVE - fiZB

mm = m + 1

If fiD < 0 Then fiD = 0

mm = m + 1

help = -6.908 * (fiD / fiVD) ^ (mm)

VIBE_einfach = (QB0_Vibe / fiVD) * 6.908 * mm * (fiD / fiVD) ^ m * Exp(help)

End Function

Function Vibe_doppelt(m1, m2, QB0_Vibe2, beta, fiZB, fiVE1, fiVE2, GKW)

'Bestimmung des überlagerten Vibe-Ersatzbrennverlaufs

' 06.06.2002

'Stefan Degener

'Vergl.: Mollenhauer, K.; Handbuch für Dieselmotoren, 1997, S.37ff

'-----

Dim fiVD, fiD, help, mm1, mm2, QB01, QB02, Vibe1, Vibe2 As Double

QB01 = beta * QB0_Vibe2

QB02 = (1 - beta) * QB0_Vibe2

'----VIBE 1-----

mm1 = m1 + 1

fiVD = fiVE1 - fiZB

fiD = GKW - fiZB

If fiD < 0 Then fiD = 0

help = -6.908 * (fiD / fiVD) ^ (mm1)

Vibe1 = (QB01 / fiVD) * 6.908 * mm1 * (fiD / fiVD) ^ m1 * Exp(help)

'----VIBE 2-----

mm2 = m2 + 1

fiVD = fiVE2 - fiZB

fiD = GKW - fiZB

If fiD < 0 Then fiD = 0

help = -6.908 * (fiD / fiVD) ^ (mm2)

Vibe2 = (QB02 / fiVD) * 6.908 * mm2 * (fiD / fiVD) ^ m2 * Exp(help)

'----Vibe doppelt-----

Vibe_doppelt = Vibe1 + Vibe2

End Function

8.4 Variablen Liste

A	Hilfs-Variable zur Berechnung des Realgasfaktors.
A1	Kolbenbodenfläche
A2	Zylinderdeckelfläche
A3(720)	Fläche der Zylinderseitenwand.
ab	Hilfs-Variable zur Berechnung des Zündbeginns.
alpha(729)	Aktueller Wärmeübergangskoeffizient.
am	Hilfs-Variable zur Berechnung des Zündbeginns.
AMO(720)	Aktuelles Luftverhältnis.
arb(720)	Arbeit
AU	Hilfs-Variable zur Berechnung des Wärmeübergangs.
B	Hilfs-Variable zur Berechnung des Realgasfaktors.
B1	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
B2	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
B3	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie
beta	Energieanteil der überlagerten <i>Vibe</i> -Funktion.
boggrd	Faktor zur Umrechnung Grad in Bogenmaß.
BZ	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
C	Hilfs-Variable zur Berechnung des Realgasfaktors.
C0	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
C02	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
C1	Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangs.
C2	Koeffizient zur Berechnung des Wärmeübergangs.
cm	Mittlerer Kolbengeschwindigkeit.
cv	Spezifische Wärmekapazität.
cw(720)	Aktuelle spezifische Wärmekapazität.
d	Zylinderdurchmesser
D1	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
D2	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
D3	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
DELFI	Zeitraum zwischen Einlass Brennstoff und Verbrennungsende in °KW
Dfi(720)	Hilfs-Variable zur Berechnung des Wärmeübergangs.

dfiZV	Zündverzug in °KW.
dLam	Ableitung $\frac{d\lambda}{d\varphi}$.
dmZ	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
dp	Hilfs-Variable für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten.
dphi	Hilfs-Variable zur Berechnung des Brennverlauf-Schwerpunktes.
dpn	Druckdifferenz zur Druckniveaukorrektur.
DQB(720)	Durch die Verbrennung freigesetzte Energie.
dQBR(720)	Durch die Verbrennung freigesetzte Energie pro °KW.
dQBUE	Wärmeübergang an der Zylinderseitenwand.
dQDE	Wärmeübergang am Zylinderdeckel.
dQKO	Wärmeübergang am Kolben.
dQKW	Kurbelwinkel des maximalen Brennverlaufs.
dQmax	Maximum des Brennverlaufes.
dQW	Gesamter Wärmeübergang.
dudL	Ableitung $\frac{du}{d\varphi}$.
dutot	Gesamte („totale“) innere Energie.
EGB	Energiebilanz.
eps	Verdichtungsverhältnis.
Etam	Mechanischer Wirkungsgrad
Fd	Filterdurchgänge.
fi(720)	Kurbelwinkel
fiAO	Auslass öffnet in °KW.
fiAO1	Hilfs-Variable.
fiAO2	Hilfs-Variable.
fib	Kurbelwinkel im Bogenmaß.
fiD	Aktuelle Verbrennungsdauer in °KW.
fiEB	Einlass Brennstoff in °KW
fiES	Einlass schließt in °KW
FIP3	Faktor zur Bestimmung der aktuellen Kraftstoffmasse.
fisp	Schwerpunkt Brennverlauf in °KW

fiVD	Verbrennungsdauer in °KW
fiVE	Verbrennungsende in °KW
fiVE1	Hilfs-Variable zur Berechnung der <i>Vibe1</i> – Funktion.
fiZB	Zündbeginn in °KW.
GB	Aktuelle Kraftstoffmasse.
GB0	Gesamte Kraftstoffmasse.
GBR	Brennstoffmasse des Restgases.
GH2O	Wassermasse in der Frischluft.
GLF	Theoretische Gesamtluft pro Arbeitsspiel.
GLF1	Tatsächliche Gesamtluft pro Arbeitsspiel.
GLZ	Tatsächliche Gesamtluft pro Arbeitsspiel mit Wasseranteil.
GZ(720)	Korrigierte aktuelle Brennstoffmasse.
help	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie und der <i>Vibe</i> -Funktion.
Hu	Heizwert.
i50	50% Punkt in °KW.
IRECHN	Anzahl der Iterationsschritte.
iZB	Hilfs-Variable zur Berechnung des Zündbeginns.
jAO	Hilfs-Variable für Auslass öffnet in °KW.
jEB	Hilfs-Variable für Einlass Brennstoff in °KW.
jES	Hilfs-Variable für Einlass schließt in °KW.
jVE	Hilfs-Variable für Verbrennungsende in °KW
jsp	Hilfs-Variable für die Berechnung des Brennverlauf-Schwerpunktes.
Kappa	Isentropenexponent.
LAM0	Anfangswert des Luftverhältnisses.
Lambda	Luftverhältnis zur Berechnung der inneren Energie.
LamF	Fanggrad.
LamR	Luftverhältnis des Restgases.
Lmin	Mindestluftverhältnis.
lp	Länge der Pleuelstange.
m	Formfaktor.
m _L	Mindestluftmasse.

mm	Hilfs-Variable für die Berechnung des <i>Vibe</i> -Ersatzbrennverlaufes.
mm1	Hilfs-Variable für die Berechnung des <i>Vibe1</i> -Ersatzbrennverlaufes.
mm2	Hilfs-Variable für die Berechnung des <i>Vibe2</i> -Ersatzbrennverlaufes.
nMOT	Motordrehzahl.
np	Anzahl der Druckwerte.
p(720)	Druckwerte.
p11	Mittlere Druck bei Einlass schließt.
p2	Anfangsdruck
Pbez	Bezugsleitung
Peff	Effektivleistung.
phi(720)	Normierte, dimensionslose Summenbrennverlauf.
pKW	Kurbelwinkelwert des maximalen Druckes.
PLV	Hilfs-Variable für die Berechnung der inneren Energie und des Realgasfaktors.
pm	Mittlerer Druck zweier aufeinanderfolgender Druckwerte.
pmax	Maximaler Druck.
pme	Effektiver Mitteldruck.
pmi	Indizierter Mitteldruck.
pmiHD	Indizierter Mitteldruck während der Hochdruckphase.
pmr	Mittlerer Reibdruck.
QB(720)	Quotient aus Summenbrennverlauf und theoretischer Brennstoff-energie.
QB0	Theoretische Brennstoffenergie
QB01	Anteil der theoretischen Brennstoffenergie für die <i>Vibe1</i> -Funktion.
QB02	Anteil der theoretischen Brennstoffenergie für die <i>Vibe2</i> -Funktion.
Qmax	Tatsächliche maximale Brennstoffenergie.
QmaxA	Hilfs-Variable für die Berechnung der maximalen Brennstoff-energie.
RGK	Realgaskonstante.

s	Hub.
SARB(720)	Aufsummierte Arbeit.
SdQW(720)	Aufsummierte Wandwärme.
SDU(720)	Aufsummierte innere Energie.
Sphi	Hilfs-Variable zur Berechnung des Brennverlauf-Schwerpunktes.
SQB(720)	Aktueller Summenbrennverlaufswert.
svh	Schubstangenverhältnis.
SW(3)	Temperatur zur Korrektur von Tb(1-3).
T(720)	Aktuelle Temperatur.
T11	Mittlere Temperatur bei Einlass schließt.
tb(3)	Temperatur zur Berechnung des Wärmeübergangs.
TKW	Kurbelwinkelwert der maximalen Temperatur.
Tm	Mittlere Temperatur zweier aufeinanderfolgender Temperaturwerte.
Tmax	Maximale Temperatur.
TmZ	Hilfs-Variable zur Berechnung der inneren Energie.
TW(3)	Korrigierte Temperatur zur Berechnung des Wärmeübergangs.
uz	Innere Energie.
V(720)	Aktuelles Zylindervolumen.
V11	Mittleres Volumen bei Einlass schließt.
VC	Kompressionsvolumen.
VH	Hubvolumen.
Vibe1	Vibe1-Funktion zur Berechnung der überlagerten Vibe-Funktion.
Vibe2	Vibe2-Funktion zur Berechnung der überlagerten Vibe-Funktion.
Vm	Mittleres Volumen zweier aufeinanderfolgender Volumenwerte.
x	Wasseranteil
psilon	Kolbenweg.
zyl	Anzahl der Zylinder.