

Verfahren und Ausrüstung zur Zylinderdruckmessung in Kolbenmaschinen

PicopV 1.0

zum Erstellen von p-V-Diagrammen mit DiaW - Diagramm für Windows

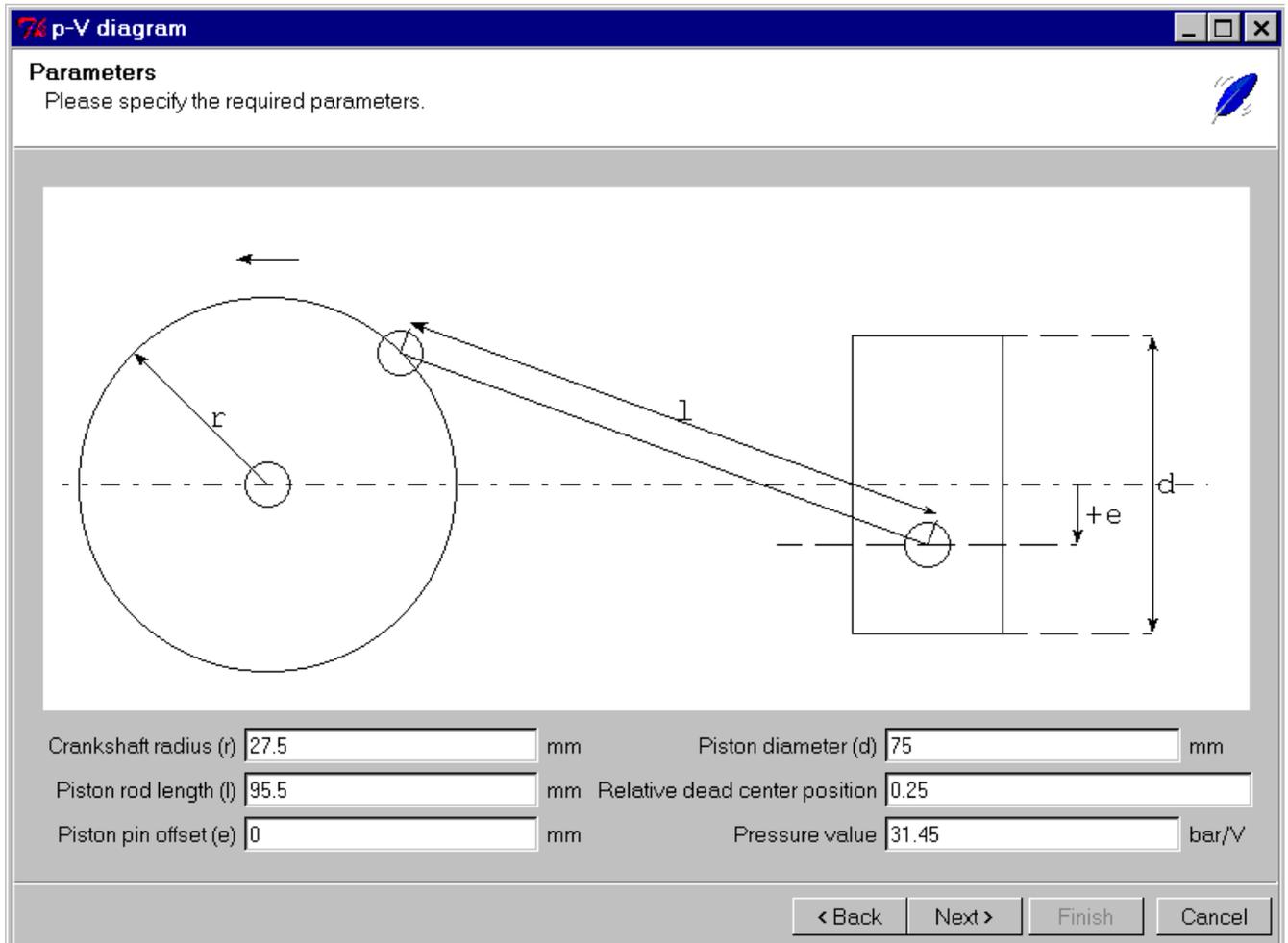


Bild 1

Anwendungsbereich

In Kolbenmaschinen wie Pumpen, Kompressoren und Motoren mit innerer oder äußerer Verbrennung drückt ein Druckmedium (Gas oder Flüssigkeit) auf einen oder mehrere Kolben. Wenn ein Kolben sich bewegt, leistet oder verbraucht er Arbeit. Verfahren und Ausrüstung zur Bestimmung dieser Arbeit werden nachfolgend beschrieben.

Während eines Arbeitszyklus einer Kolbenmaschine geht der Kolben ein- oder zweimal hin und her, macht also zwei oder vier Hübe. Die Kolbenbewegung verändert das Volumen der von Zylinder und Kolben gebildeten Kammer und somit des darin eingeschlossenen Gases.

In der Wissenschaft von der Thermodynamik wird das Verhalten einer bestimmten konstanten Gasmasse während der Veränderung ihres Volumens mit dem p-V - Diagramm beschrieben, das den Gasdruck abhängig vom Gasvolumen zeigt:

$$p = f(V)$$

Diese Funktion hängt von weiteren Bedingungen ab, vor allem vom Fluss von Wärme in das Gas oder aus diesem heraus während der Veränderung des Volumens.

...

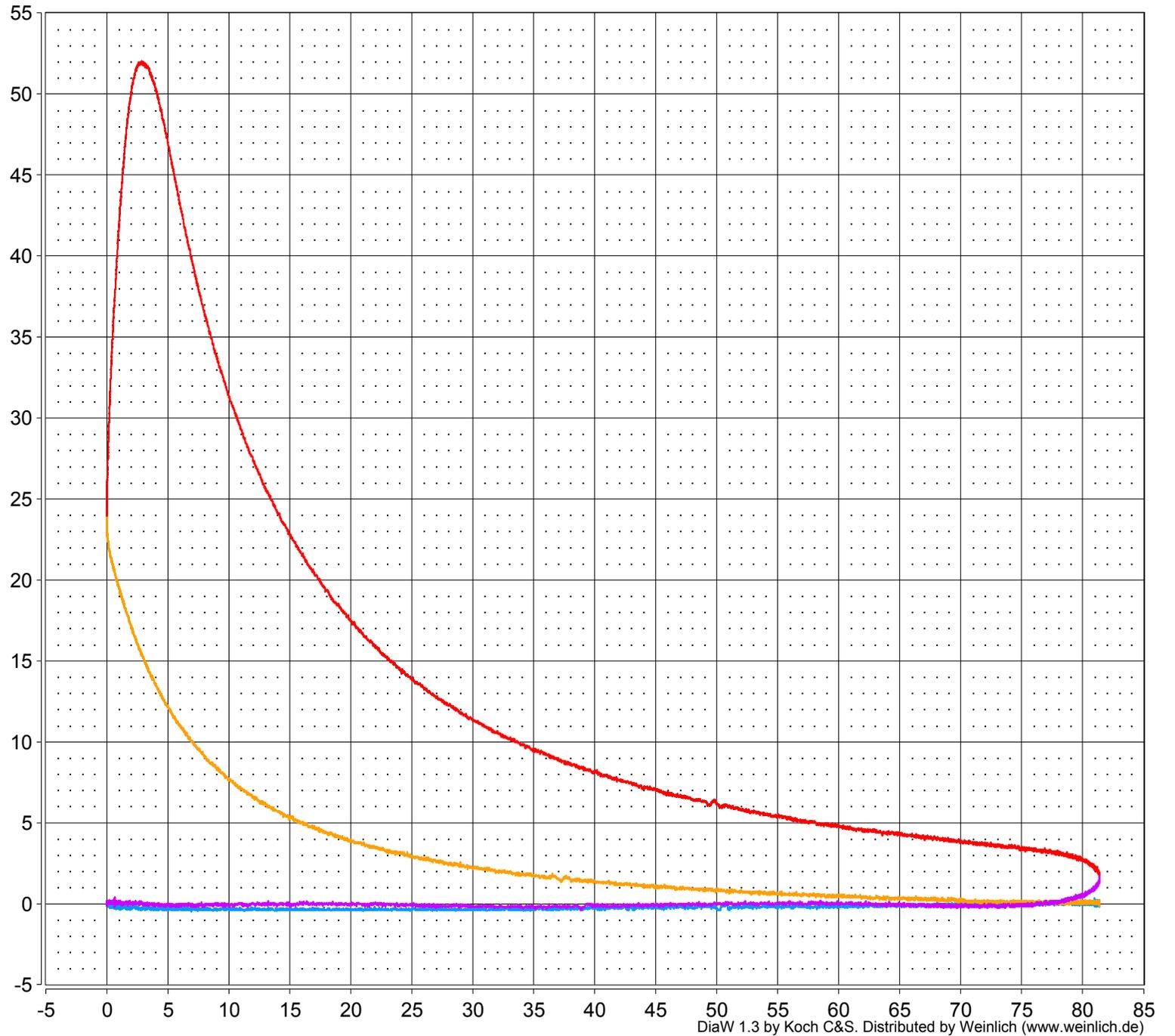
10.851/3 d Bild 2
F:\diawdata\picopv\ltoff...\10851b2n.dwd
Ottomotor

p-V diagram

Crankshaft radius: 40.7 mm
Piston rod length: 137.0 mm
Piston pin offset: 0.0 mm
Piston diameter: 79.0 mm
Pressure value: 29.94 bar/V
Relative dead center position: 0.5683

Computed Work (this measurement): :
406.6 J
Average Work (last 47 measurements):
402.1 J

10851b2n
10851b2n X: s/mm Piston position
— 1: p/bar Ansaugen
— 2: p/bar Verdichten
— 3: p/bar Verbrennen, Entspannen
— 4: p/bar Auspuff



Wird das Gasvolumen verringert (das Gas komprimiert), nimmt das Gas mechanische Arbeit auf.

Wird das Gas komprimiert und expandiert danach wieder auf sein ursprüngliches Volumen, ist aber der Druck z. B. während der Kompression niedriger als während der anschließenden Expansion, dann sind die Funktionslinien $p = f(V)$ für Kompression und Expansion unterschiedlich und bilden eine offene Schleife.

Allerdings beschreibt ein p - V - Diagramm das thermodynamische Verhalten eines Gases nur so lange, wie die Masse des Gases im betrachteten Volumen konstant bleibt, also der Zylinder geschlossen bleibt, z. B. in Bild 2 nur während der Verdichtung und während der Verbrennung und Expansion nur bis zum Öffnen des Auspuffventils, also nicht während des Gaswechsels durch Ein- und Auslassventil.

Weil in einer Kolbenmaschine der Kolben der sich bei Kompression und Expansion bewegende Teil der Wand ist, die das Gas einschließt, gibt er bei Kompression Arbeit an das Gas ab und nimmt bei Expansion Arbeit vom Gas auf.

In der Praxis wird der Zylinderdruck abhängig von der Kolbenposition „ s “ gemessen (siehe Bild 2).

Der Druck p multipliziert mit der Kolbenfläche A ergibt die Kraft F auf den Kolben:

$$p \times A = F,$$

und die Änderung der Kolbenposition s multipliziert mit der Kraft F ergibt die vom Kolben aufgenommene oder abgegebene Arbeit W :

$$F \times \Delta s = W$$

Andererseits ergibt die Änderung der Kolbenposition s multipliziert mit der Kolbenfläche A die Volumenänderung

$$\Delta s \times A = \Delta V,$$

und die Volumenänderung multipliziert mit dem Druck ergibt die vom Kolben aufgenommene oder abgegebene Arbeit W :

$$\Delta V \times p = W$$

Da der Druck p nicht konstant ist, sondern vom Volumen abhängt, muss das Integral von $p = f(V)$ über V ermittelt werden.

Da die Kolbenfläche A konstant ist, kann zu diesem Zweck das Integral von $p = f(s)$ über s

ermittelt und dann mit der Kolbenfläche A multipliziert werden.

Daraus folgt:

Auf einem Blatt mit dem Diagramm $p = f(s)$ kann man die Fläche unter der Druckkurve bestimmen und dann mit den Maßstäben des Diagramms und der Kolbenfläche multiplizieren und erhält die Arbeit.

In Bild 2 ist die Fläche unter der Kurve „Verdichten“ proportional zur vom Kolben an das Gas gelieferten Arbeit und die Fläche unter der Kurve „Verbrennen, Entspannen“ proportional zur vom Gas an den Kolben gelieferten Arbeit.

Die Fläche zwischen den beiden Kurven ist die Differenz zwischen den beiden o. g. Flächen und somit proportional zur an den Kolben gelieferten Arbeit während des Zyklus aus den beiden Kolbenhüben „Verdichten“ und „Verbrennen, Entspannen“.

Entsprechend ist die kleine Fläche zwischen den Kurven für Auspuff und Ansaugen proportional zur Arbeit, die für diesen Zyklus erforderlich ist.

Beide offenen Schleifen sind an ihren Enden miteinander verbunden und bilden zusammen das 4-Takt - Verfahren.

Das 2-Takt - Verfahren besteht nur aus 2 Funktionskurven für $p = f(s)$ in einer geschlossenen Schleife.

Der Einfachheit halber wird nachfolgend auch ein Diagramm mit Funktionskurven für $p = f(s)$ proportional ΔV als „ p - V - Diagramm“ bezeichnet.

Messtechnik

An langsam laufenden Kolbenmaschinen, an denen die Bewegung der Kolben direkt gemessen werden kann, wurde und wird z. T. noch heute der Zylinderdruck abhängig von der Kolbenposition von Koordinatenschreibern aufgezeichnet, die direkt von der Kolbenbewegung und dem Druck betätigt werden. Diese Schreiber werden „Indikator“ genannt; das vom Schreiber produzierte Diagramm $p = f(s)$ entsprechend „Indikatorgramm“ und die am Kolben wirksamen Größen „indizierter Druck“, „indizierte Leistung“ und „indizierte Arbeit“.

Mehrere Gründe lassen heute die Anwendung dieser mechanischen Indikatoren in den meisten Fällen nicht mehr zu:

Die Kolbenbewegungen und Druckänderungen sind zu schnell. Die Frequenz der zu erfassenden Druckänderungen ist zudem viel stärker angestiegen als die Frequenz der Kolbenbewegungen, weil die innere Verbrennung Druckschwankungen hoher Frequenz erzeugen kann („Klopfen“).

Der Schrieb eines Indikators eignet sich schlecht für die automatische Datenverarbeitung.

Heutige Kolbenmaschinen formen die Kolbenbewegung fast immer in die Drehung einer Kurbelwelle um, aber die Kolben selbst sind im Betrieb nur noch selten direkt zugänglich.

Aus obigen Gründen unterscheiden sich heutige Einrichtungen zur Bildung des p-V - Diagramms vom überwiegend historischen Indikator wie folgt:

Der Druck wird von einem piezoelektrischen Drucksensor erfasst.

Anstelle der Kolbenposition wird die Drehposition der Kurbel von einem ausreichend hoch auflösenden inkrementalen Drehmelder (Resolver) erfasst.

Es ist üblich, mit jedem oder jedem n-ten Drehschritt des Resolvers die Speicherung des Druckmesswertes auszulösen.

Dieser Stand der Technik hat Nachteile:

1. Die Drehposition der Kurbel muss auf die Kolbenposition umgerechnet werden.
2. Es ist aufwendig und kann schwierig sein, den erforderlichen Resolver mit der Kurbel zu verbinden.
3. Die Abtastrate der Messwertspeicherung ist der Kurbeldrehzahl proportional. Dies ist ungünstig für die Untersuchung von Schwingungen, deren Frequenz nicht von der Drehzahl abhängt, denn wenn eine bestimmte Anzahl von Messungen pro Umdrehung fest steht, kann im niedrigeren Drehzahlbereich die Abtastrate im Verhältnis zur Frequenz der interessierenden Schwingung zu langsam werden.

Indiziersteuerung und Benutzerprogramm „PicopV“

Nachteil 1 hat allgemein durch automatische Datenverarbeitung an Bedeutung verloren. Auch das hier beschriebene Benutzerprogramm „PicopV“ formt die gespeicherte Funktion $p = f(\text{Drehwinkel } \varphi)$ in die Funktion $p = f(s \text{ proportional } \Delta V)$ um und berechnet die indizierte Arbeit. Hierzu kann der Benutzer die erforderlichen Daten über Geometrie und Zylinderdruckmesskette eingeben (siehe Bild 1).

Darüber hinaus gibt die automatische Ausgabe der Ergebnisse von „PicopV“ an das Benutzerprogramm „DiaW - Diagramm für Windows“ dem Benutzer komfortable Möglichkeiten der Präsentation auf dem Bildschirm und der Gestaltung gedruckter Berichte (siehe Bild 2).

Nachteile 2 und 3 werden durch die Kombination der Indiziersteuerung mit dem Benutzerprogramm „PicopV“ vermieden.

Diese Kombination ermöglicht es, anstelle eines Resolvers eine viel größere Teilung, in der Regel die Verzahnung am Schwungrad, zu benutzen. Bei ausreichend hoher Abtastrate und entsprechender Speicherkapazität der Registriereinrichtung entsteht hierdurch keine Genauigkeitseinbuße der Drehpositionsinformation.

Statt des Resolvers genügen zwei einfache Sensoren, von denen einer eine Marke für den oberen Totpunkt der Kurbel und der andere in der Regel die Verzahnung am Schwungrad abtastet.

Wenn gewünscht oder nötig, kann aber auch ein üblicher Resolver statt der zwei Sensoren verwendet und an die Indiziersteuerung angeschlossen werden.

Das PC - Benutzerprogramm „PicopV“ steuert im Zusammenwirken mit der Indiziersteuerung die laufende Aufnahme von Messwerten einzelner Arbeitszyklen, bildet daraus p-V - Diagramme, wertet diese aus und bildet einen Mittelwert der indizierten Arbeit der ausgewerteten Arbeitszyklen. Diese Mittelwertbildung ist wichtig wegen möglicher Unterschiede zwischen einzelnen Arbeitszyklen auch bei konstanter Belastung eines Verbrennungsmotors.

„PicopV“ zeigt zu den ausgewerteten Zyklen auf dem PC - Bildschirm grafisch an:
über der Zeit Signale für Zylinderdruck und zugehörige Informationen zur Kurbelwellendrehposition,
das p-V - Diagramm hierzu und
Schwankungen der indizierten Arbeit der ausgewerteten Zyklen.

Die Häufigkeit, in der Arbeitszyklen von „PicopV“ aufgenommen und ausgewertet werden, ist durch die Arbeitsgeschwindigkeit des PCs bestimmt.

Der Bericht in Bild 2 ist mit „PicopV“ erstellt.

Version 1.0 von „PicopV“ ist für einen Zylinder einer 4 - Takt - Kolbenmaschine mit einfachem Kurbeltrieb, auch mit versetztem Kolben- oder Kreuzkopfbolzen, geeignet. Andere Versionen sind mit Verzögerung lieferbar.