

Verfahren und Ausrüstungen zur Zylinderdruckmessung in Kolbenmaschinen

p-V 1.0 und PicopV 1.0

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

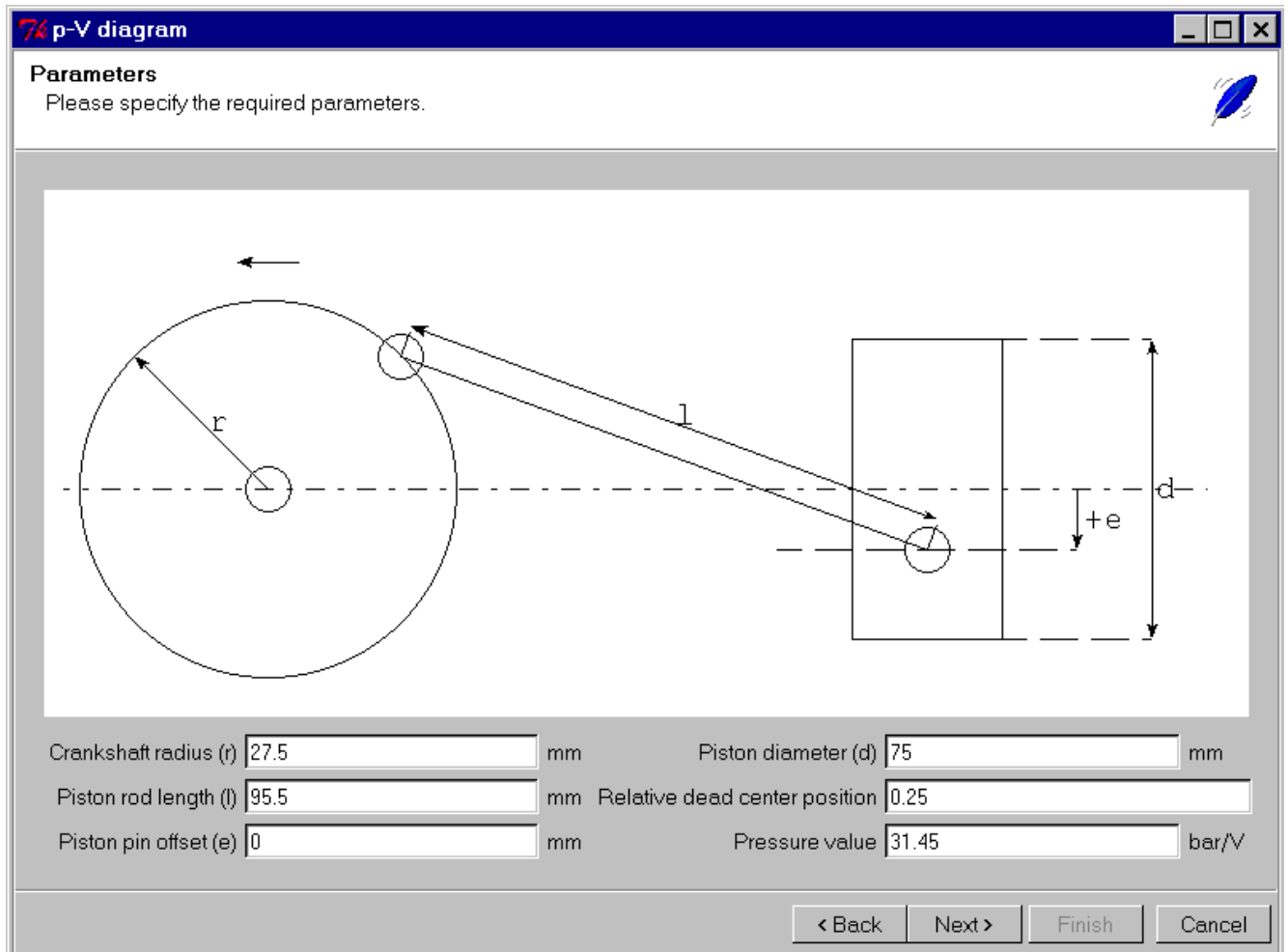


Bild 1

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.

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.

Wird z. B. 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 Schleife. In diesem Beispiel verbraucht das Gas während der Kompression weniger mechanische Arbeit, als es während der Expansion abgibt, d. h. es bleibt ein Überschuss mechanischer Arbeit, den der Zyklus aus Kompression und Expansion nach seinem Ende an die das Gas einschließende Kammerwand abgegeben hat.

Die Schleife aus den beiden Funktionskurven für $p = f(V)$ beschreibt den Zyklus aus Kompression und Expansion im angenommenen Beispiel. Die Fläche unter jeder der beiden Funktionskurven zeigt die vom Gas verbrauchte oder aufgenommene Arbeit. Demzufolge zeigt die Differenz beider Flächen, also die von der Schleife eingeschlossene Fläche, die am Zyklusende vom Gas verbrauchte oder abgegebene Arbeit.

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 diejenige Arbeit ab und nimmt bei Expansion diejenige Arbeit auf, die das p-V - Diagramm als Flächen unter den jeweiligen Funktionskurven zeigt. Deshalb zeigt das p-V - Diagramm mit der Differenz dieser beiden Flächen, nämlich der von den Funktionskurven eingeschlossenen Fläche, diejenige mechanische Arbeit an, die von der Kolbenmaschine im gemessenen Zylinder im betrachteten Arbeitszyklus geleistet oder verbraucht wurde.

Mit anderen Worten:

Wenn der Druck im Zylinder und dementsprechend die Kraft auf den Kolben während eines Kolbenhubes anders als während des nachfolgenden Hubes sind, oder genauer:

wenn der Druck während zweier aufeinander folgender Kolbenhübe unterschiedlichen Funktionen von der Kolbenposition folgt,

hat der Kolben am Ende eines aus den beiden Hüben bestehenden Zyklus Arbeit vom Druckmedium Gas oder Flüssigkeit aufgenommen oder er hat Arbeit abgegeben.

Bei einem Zweitaktverfahren besteht das p-V - Diagramm aus zwei Funktionskurven, die eine Schleife bilden; im Falle eines Viertaktverfahrens gibt es vier Funktionskurven, die zwei Schleifen bilden.

Allerdings beschreibt das p-V - Diagramm das thermodynamische Verhalten eines Gases nur, so lange die Masse des Gases im betrachteten Volumen konstant bleibt, also der Zylinder geschlossen ist.

Deshalb kann das p-V - Diagramm während des Gaswechsels eines Verbrennungsmotors oder im Falle einer Pumpe mit praktisch inkompressibler Flüssigkeit nicht das vom Druckmedium verdrängte Volumen, sondern nur die Kolbenposition anzeigen.

Das gleiche gilt für einen Motor mit innerer Verbrennung, wenn nicht das fertige Gemisch von Treibstoff und Verbrennungsluft ansaugt wird, sondern der Treibstoff nach dem Beginn der Verdichtung der Verbrennungsluft eingespritzt wird.

In der Praxis wird der Zylinderdruck abhängig von der Kolbenposition gemessen:

$$p = f(s \text{ proportional } \Delta V)$$

Multiplikation der Kolbenpositionsänderung mit der Kolbenfläche ergibt die Volumenänderung.

Dementsprechend ergibt die von den Funktionskurven $p = f(s)$ eingeschlossene Fläche multipliziert mit der Kolbenfläche die Arbeit, die der von den Kurven beschriebene Arbeitszyklus geliefert oder verbraucht hat.

Andererseits ergibt der Zylinderdruck multipliziert mit der Kolbenfläche die auf den Kolben drückende Kraft.

Der Einfachheit halber wird im folgenden auch ein Diagramm mit Funktionskurven für $p = f(s \text{ proportional } \Delta V)$ als „p-V - Diagramm“ bezeichnet.

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 „Indikatordiagramm“ 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 Benutzerprogramme „p-V“ und „PicopV“

Nachteil 1 hat allgemein durch automatische Datenverarbeitung an Bedeutung verloren. Auch die hier beschriebenen Benutzerprogramme „p-V“ und „PicopV“ formen die gespeicherte Funktion $p = f(\text{Drehwinkel } \varphi)$ in die Funktion $p = f(s \text{ proportional } \Delta V)$ um und berechnen 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 „p-V“ bzw. „PicopV“ an das Benutzerprogramm „DiaW - Diagramm für Windows“ dem Benutzer komfortable Möglichkeiten der Präsentation auf dem Bildschirm und der Gestaltung gedruckter Berichte (siehe Bilder 2 und 3).

Nachteile 2 und 3 werden durch die Kombination der Indiziersteuerung mit den Benutzerprogrammen „p-V“ bzw. „PicopV“ vermieden.

Diese Kombinationen ermöglichen es, anstelle eines Resolvers eine viel gröbere 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.

Die Registriereinrichtung kann entsprechend den Anforderungen aus dem Angebot an Speicheroszillografen und Messwerterfassungsausrüstungen für PCs ausgewählt werden.

Das p-V - Diagramm in Bild 2 beruht z. B. auf der Aufzeichnung mit einem Speicheroszilloskop mit geringer Speichertiefe und geringer Messwertauflösung.

Allgemein bietet ein Oszilloskop, das den Messwert wahlweise entweder direkt analog anzeigen oder digital speichern und den gespeicherten Wert anzeigen kann, den Vorteil, dass der Benutzer im direkten Analogbetrieb kontrollieren kann, ob Druckschwingungen aufgrund zu langsamer Messwertabtastung verloren gehen oder zu stark verfälscht werden können. Natürlich kann man zu diesem Zweck auch ein analoges Oszilloskop zu den Eingängen einer PC-gestützten digitalen Messwerterfassung parallel schalten.

Im Gegensatz zu Bild 2 beruht das p-V - Diagramm in Bild 3 auf der Aufzeichnung mit einem PC mit Messwerterfassungsausrüstung mit großer Speichertiefe und hoher Messwertauflösung.

Das PC - Benutzerprogramm „p-V“ bildet aus einer in einem PC gespeicherten Datei mit Druckmesswerten und mit Informationen zur Drehposition der Kurbelwelle (diese Informationen werden bei der Messwertaufnahme von der Indiziersteuerung gebildet) das p-V - Diagramm und errechnet aus diesem die Arbeit, die der mit dem p-V - Diagramm dargestellte Arbeitszyklus geliefert oder verbraucht hat.

Mit diesem Programm können demnach Messwerte ausgewertet werden, die bereits in einem vorangegangenen Messvorgang gespeichert wurden. Eine solche Auswertung kann auch zusätzlich zu verschiedenen traditionellen Verfahren ohne Zuhilfenahme der automatischen Datenverarbeitung geschehen und somit Teil einer Übung sein. Eine Demonstrationsausrüstung mit „p-V“ ist demnach für die Ausbildung zu empfehlen, weil Studenten einzelne Verarbeitungsschritte erkennen und zum Teil alternativ selbst ausführen können.

Zur Zeit ist „p-V“ in einer Version lieferbar, die Dateien des zum Lieferumfang gehörenden Speicheroszilloskops verarbeitet.

Der Bericht in Bild 2 ist mit „p-V“ aufgrund von Messwerten erstellt, die in einem solchen Speicheroszilloskop gespeichert und danach an einen PC übertragen wurden.

Anders als „p-V“ steuert das PC - Benutzerprogramm „PicopV“ 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.

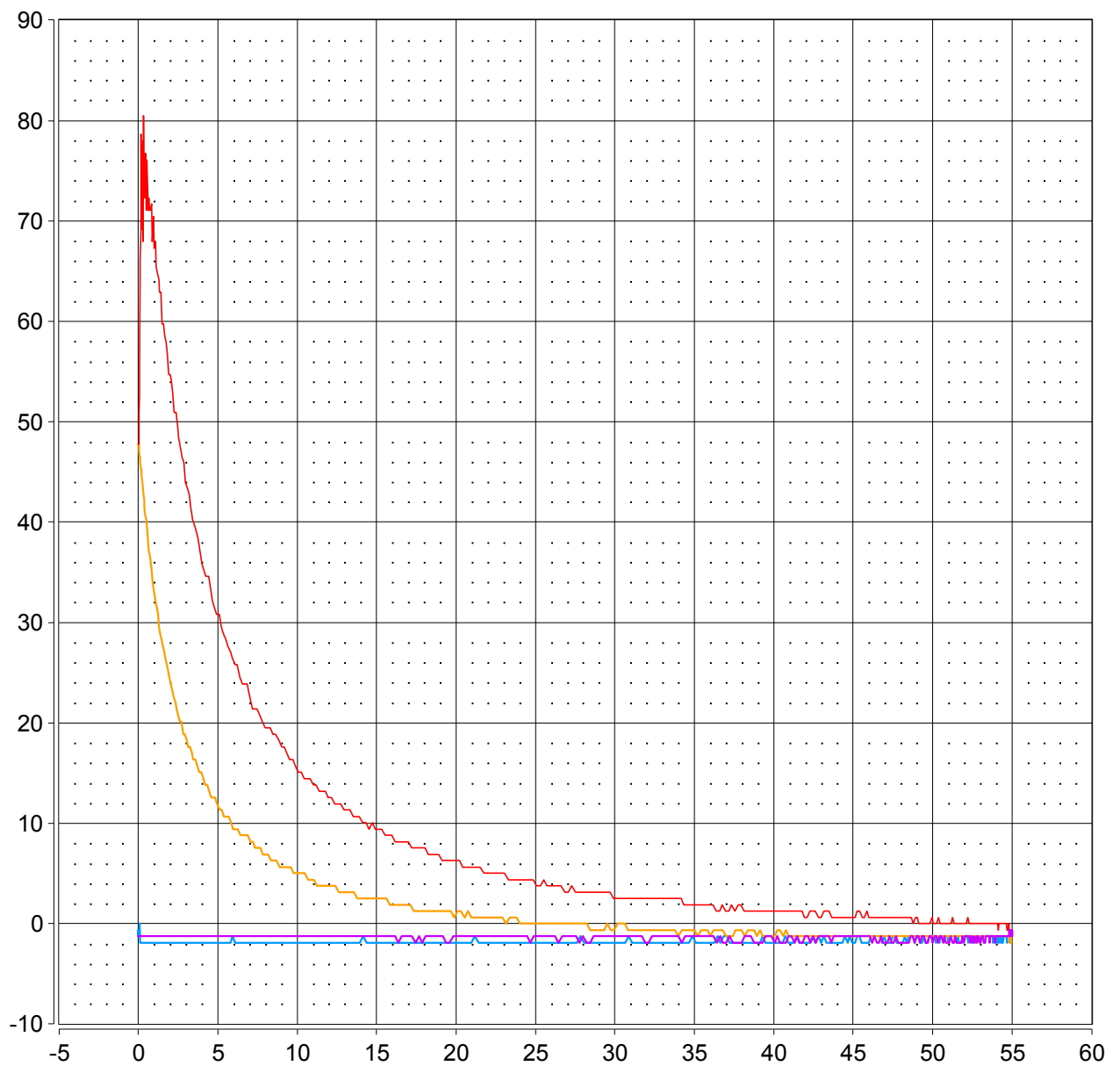
Die Häufigkeit, in der Arbeitszyklen von „PicopV“ aufgenommen und ausgewertet werden, ist durch die Arbeitsgeschwindigkeit des PCs bestimmt.

Aufgrund dieser Funktionen ist „PicopV“ nicht auf Anwendungen in der Ausbildung beschränkt, sondern ermöglicht zeitsparende Versuchsdurchführung und -dokumentation.

Zur Zeit ist „PicopV“ in einer Version lieferbar, die die zum Lieferumfang gehörende an einen PC anzuschließende Messwerterfassungsausrüstung mit hoher Abtastrate, großer Speicherkapazität und hoher Messwertauflösung steuert.

Der Bericht in Bild 3 ist mit „PicopV“ erstellt.

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



10.851/2 d Bild 2
Dieselmotor

p-V diagram

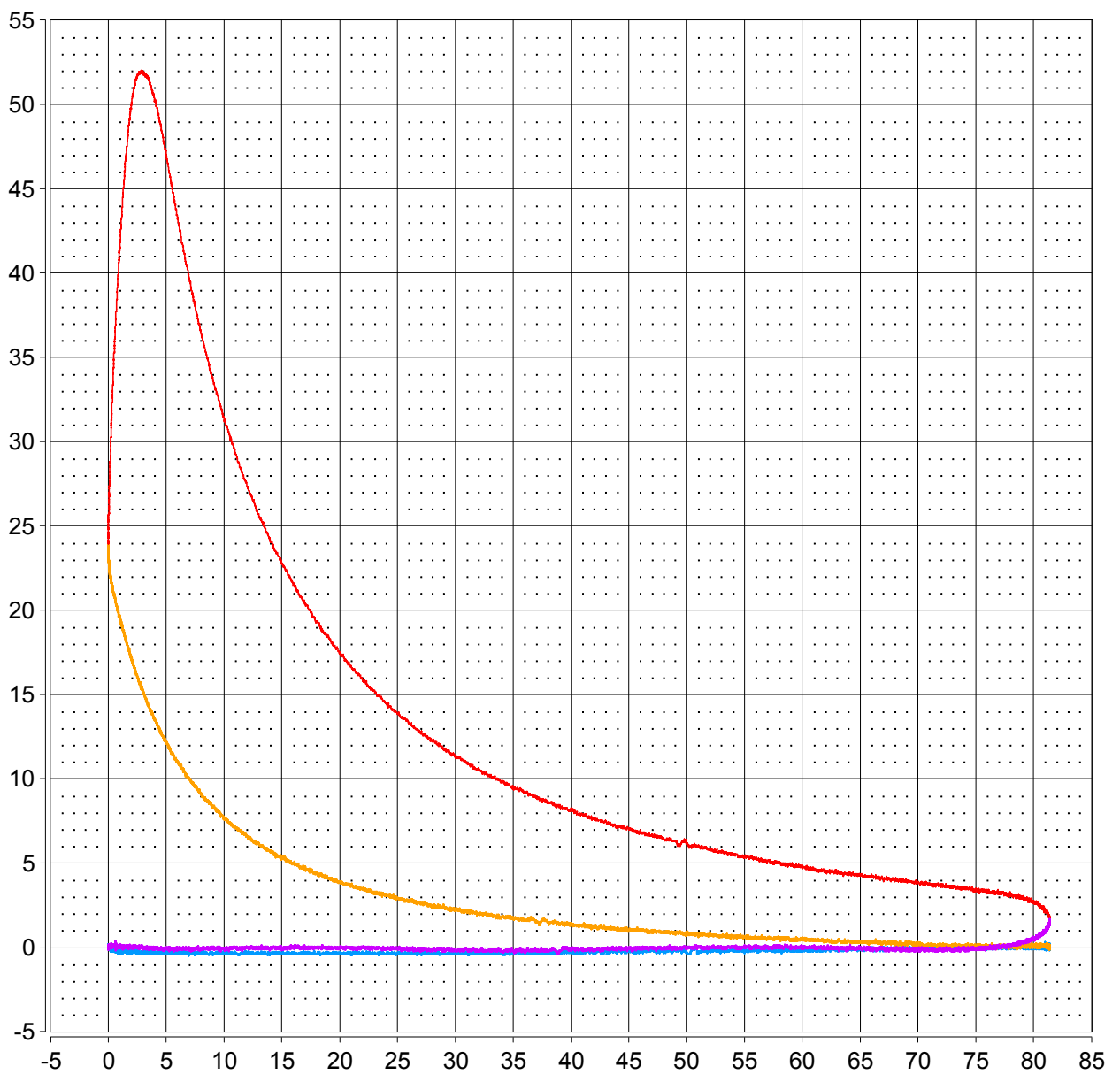
Crankshaft radius: 27.5 mm
 Piston rod length: 95.5 mm
 Piston pin offset: 0 mm
 Piston diameter: 75 mm
 Pressure value: 31.45 bar/V
 Relative dead center position: 0.25

Work: 150.7 J

10851b2

10851b2 X: s/mm Piston position

- 1: p/bar Ansaugen
- 2: p/bar Verdichten
- 3: p/bar Verbrennen, Entspannen
- 4: p/bar Auspuff



10.851/2 d Bild 3
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

10851b3
 10851b3 X: s/mm Piston position
 — 1: p/bar Ansaugen
 — 2: p/bar Verdichten
 — 3: p/bar Verbrennen, Entspannen
 — 4: p/bar Auspuff