

## Bewertung der Verfahren zur Aufteilung des indizierten Mitteldrucks in Hochdruck- und Ladungswechselanteile

Marco Wagner; Kistler Instrumente GmbH  
Hubert Fußhoeller; FKFS

# Inhalt

Motivation	3
Grundlagen	3
Das UT-UT-Verfahren	4
Das pV-Schnittpunktverfahren	5
Das Witt/Shelby-Verfahren	6
Reale Beispiele und Unterschiede der Verfahren	8
Einsatzmöglichkeiten der Verfahren	10
Literaturverzeichnis	11

# Bewertung der Verfahren zur Aufteilung des indizierten Mitteldrucks in Hochdruck- und Ladungswechselanteile

Marco Wagner; Kistler Instrumente GmbH  
Hubert Fußhoeller; FKFS

## Motivation

Der indizierte Mitteldruck stellt einen besonders wichtigen Kennwert im Zusammenhang mit der Verbrennungsanalyse/Indizierung von Verbrennungsmotoren dar. Er beschreibt die abgegebene Arbeit durch die Verbrennung und ermöglicht einen vom Hubvolumen unabhängigen Vergleich verschiedener Motoren untereinander. Da es sich beim  $p_{mi}$  um eine innere Größe handelt (auf Basis des gemessenen Druckverlaufes) ist diese, im Gegensatz zum gemessenen Drehmoment, von der Reibung unabhängig. Darauf basierend kann dann aus der Differenz zwischen dem aus dem Drehmoment berechneten mittleren effektiven Druck  $p_{me}$  und dem  $p_{mi}$  der mittlere Reibdruck  $p_{mr}$  berechnet werden.

Mittels einer Aufteilung des indizierten Mitteldrucks in Hochdruck- und Ladungswechselanteile können in unterschiedlichen Entwicklungsgebieten weitere Rückschlüsse aus dem entsprechenden Teilkennwert erfolgen. Die Aufteilung jedoch kann sehr unterschiedlich durchgeführt werden. Neben den geläufigen Verfahren UT-UT und pV-Schnittpunkt muss in diesem Zusammenhang ebenfalls die Witt-Shelby-Methode erwähnt werden. Aufgrund der in allen Verfahren ebenfalls unterschiedlichen Werte stellt sich generell die Frage, welche davon als richtig bezeichnet werden können. Vor allem durch den zunehmenden Einsatz vollvariabler Ventiltriebe sollte sich der Anwender von Indiziermesstechnik dieser Fragestellung annehmen.

Die folgenden Kapitel beschreiben und bewerten die oben genannten Verfahren und sollen für den jeweiligen Anwendungsfall eine Entscheidungsgrundlage bieten.

## Grundlagen

Die Ermittlung des  $p_{mi}$  aus dem Druckverlauf erfolgt aus der Arbeit des Prozesses dividiert durch das Hubvolumen. Die Arbeit berechnet sich aus dem Kreisintegral  $p dV$  über das Arbeitsspiel.

$$p_{mi} = \frac{W_{ASP}}{V_H} = \frac{\oint p dV}{V_H}$$

Erfolgt eine Aufteilung des  $p_{mi}$  in Hochdruck  $p_{mi_H}$  und Ladungswechsel  $p_{mi_L}$ , ergeben sich je nach Verfahren unterschiedliche Teilwerte. Jedoch ergibt sich in allen Aufteilungsvarianten bei der Summenbildung innerhalb eines Verfahrens immer das gleiche Gesamt  $p_{mi}$ .

$$p_{mi} = p_{mi_H} + p_{mi_L}$$

Folgende Kennwerte können zur detaillierten Beurteilung des Prozesses herangezogen werden:

Der Hochdruckwirkungsgrad

$$\eta_H = \frac{W_H}{Q_{Krst}}$$

zur Bewertung des Hochdruckprozesses. Wobei  $W_H$  durch  $p_{mi_H}$  und  $Q_{Krst}$  (Krst = Kraftstoff) aus dem Produkt der Kraftstoffmasse und dem unteren Heizwert ermittelt werden kann.

Der Ladungswechselwirkungsgrad

$$\eta_L = \frac{\eta_i}{\eta_H} = \frac{W_{ASP}}{W_H} = \frac{p_{mi}}{p_{mi_H}} \quad \text{basierend auf} \quad \eta_i = \eta_L \cdot \eta_H$$

oder üblicherweise eher die Ladungswechselarbeit  $W_L$ , also die Größe der Ladungswechselfläche im pV-Diagramm oder den Ladungswechselmitteldruck  $p_{mi_L}$  zur Bewertung des Ladungswechsels.

## Das UT-UT-Verfahren

Die Aufteilung des pmi nach dem UT-UT-Verfahren entspricht der Aufteilung im klassischen Sinne in

- Kompressionstakt und Expansionstakt
- Ausstoßtakt und Ansaugtakt

Die Berechnung der beiden Anteile Hochdruckteil und Ladungswechselteil erfolgt per Definition (also nicht zwingend der Realität entsprechend) ausgehend vom unteren Totpunkt zum einen über den Kompressions- und Expansionstakt, zum anderen über den Ausstoß- und Ansaugtakt bis zum erneuten Erreichen des unteren Totpunktes.

Im Folgenden die entsprechende Gleichung zur Berechnung der Arbeiten

$$W_{ASP} = \oint_{ASP} p dV = \int_{H_{UT-UT}} p dV + \int_{L_{UT-UT}} p dV = W_{H_{UT}} + W_{L_{UT}}$$

und somit von

$$pmi = \frac{W_{H_{UT}} + W_{L_{UT}}}{V_H} = pmi_{H_{UT}} + pmi_{L_{UT}}$$

Die Hochdruckarbeit und Ladungswechselarbeit beinhalten beide den als Area C bezeichneten Anteil. Dieser ist im Hochdruckteil ein positiver und im Ladungswechselteil ein negativer Anteil. Bei der Addition des Hochdruck- und Ladungswechselteils zur Gesamtarbeit bzw. zum pmi eliminieren sich der positive und der negative Teil der Area C.

Je nach Auslass- bzw. Einlasssteuerzeiten werden in diesem Verfahren z.B. Expansions- oder Blowdownverluste bzw. Ladungswechselarbeiten fehlerhaft interpretiert. Dabei liegt die Ursache eher an einem Zuordnungsproblem zu Hochdruck- bzw. Ladungswechselteil als an einer fehlerhaften Berechnung.

Dies wirkt sich bei Motoren mit variablen Ventilsteuerzeiten während des Betriebs unterschiedlich aus und führt gegebenenfalls zu fehlerhaften Gegenmaßnahmen im Brennverfahren bzw. der Steuergerätekalibrierung.

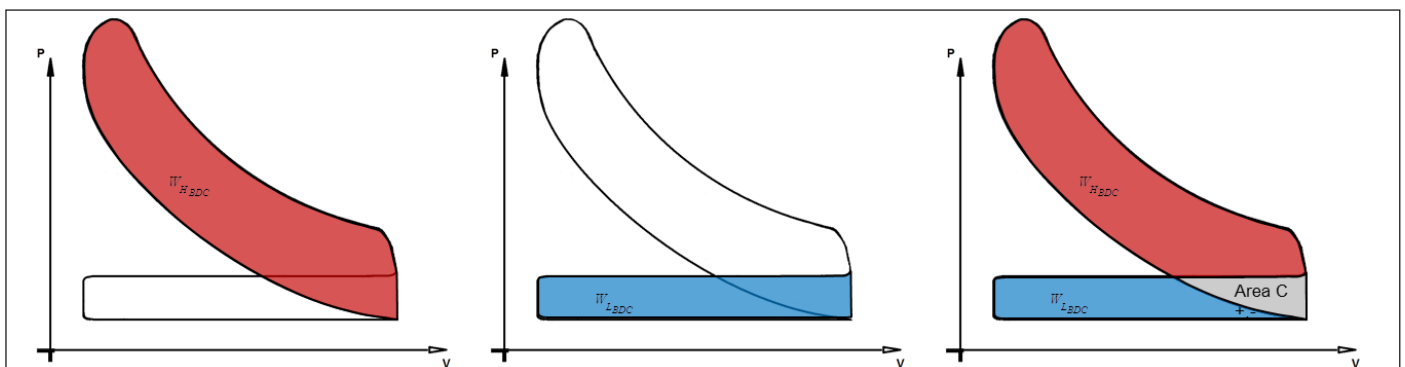


Abbildung 1: Hochdruckarbeit, Ladungswechselarbeit und Gesamtarbeit inklusive Area C beim UT-UT-Verfahren (von links nach rechts)

## Das pV-Schnittpunktverfahren

Beim Schnittpunktverfahren erfolgt die Aufteilung des Prozesses, ausgehend vom Schnittpunkt zwischen der Kompressionslinie und der Ausstoßlinie, in gewinnbare bzw. aufzubringende Arbeit. Im thermodynamischen Sinne liefern rechts herum laufende Prozesse Arbeit  $W^+$  bzw. ist für links herum laufende Prozesse Arbeit  $W^-$  aufzubringen.

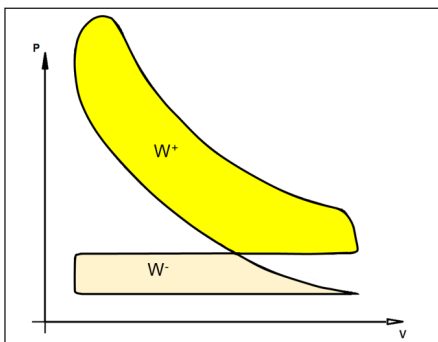


Abbildung 2: Aufteilung der Arbeit im thermodynamischen Sinn in gewinnbare bzw. aufzubringende Arbeit beim pV-Schnittpunktverfahren

Eine Aufteilung in Hochdruck- bzw. Ladungswechselteil findet nicht statt. Ebenso wenig ist der Bezug zu idealen Vergleichsprozessen herstellbar.

Die Berechnung der Arbeiten erfolgt entsprechend

$$W_i = \oint_{0-720} p dV = \int_{S-S_H} p dV + \int_{S-S_L} p dV = W_s^+ + W_s^-$$

und daraus folgend die Berechnung der aufgeteilten Mitteldrücke

$$pmi = \frac{W_s^+ + W_s^-}{V_H} = pmi_{H_s} + pmi_{L_s}$$

Die zur Berechnung der aufgeteilten Arbeiten notwendige Bestimmung des Schnittpunktes erweist sich als schwierig bzw. ist nicht immer eindeutig.

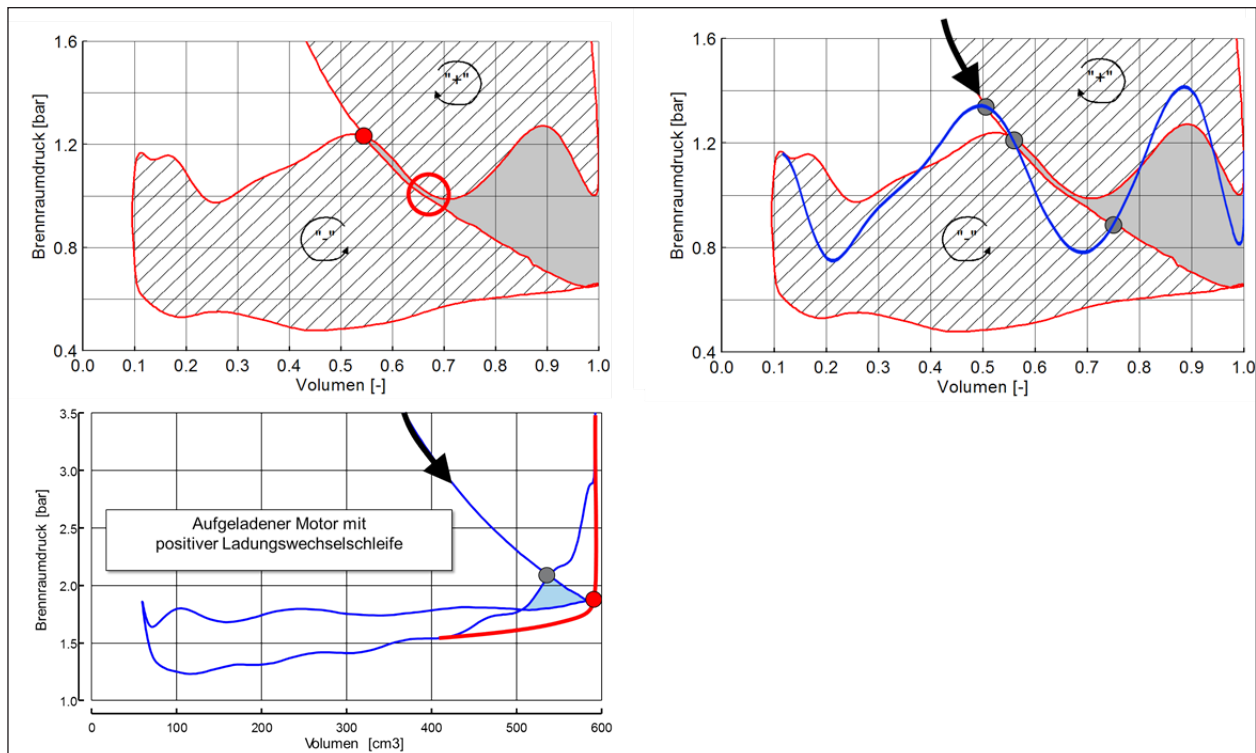


Abbildung 3: Eindeutige und multiple Schnittpunktfindung

Abbildung 3 links zeigt den Ladungswechsel und Teile des Hochdrucks eines typischen Teillastbetriebspunktes. Der rote Punkt zeigt den zu findenden Schnittpunkt. Für den dargestellten Druckverlauf ist der gefundene Schnittpunkt eindeutig. Man erkennt aber, dass in Richtung zunehmenden Volumens, entlang der Kompressionslinie, eine kritische Stelle mit einem "fast" Schnittpunkt zu finden ist. Dieser könnte, bei einer nur geringen Änderung des Druckverlaufes in der Ausstoßphase, zum Finden eines anderen Schnittpunktes führen. Zur Verdeutlichung wird in Abbildung 3 rechts in blau ein kritischer Verlauf der Ausstoßphase eingeblendet. Bei einer etwas größeren Amplitude der Druckschwingung in der Ausstoßphase ergeben sich drei mögliche Schnittpunkte. Auch die Richtungsabhängigkeit des gefundenen Schnittpunktes ist klar erkennbar. Es hat sich hierbei als sinnvoll erwiesen, die Suche von OT Richtung UT entlang der Kompressionslinie durchzuführen.

Hiermit kann die kleinstmögliche Variationsbreite der gefundenen Schnittpunkte sichergestellt werden. Wie in Abbildung 3 unten zu sehen, können bei aufgeladenen Motoren mit positiver Ladungswechselschleife weitere Probleme auftreten. Im blau dargestellten Verlauf stellt sich die Frage, wie die kleine hellblau ausgefüllte Fläche zu bewerten ist. Handelt es sich nun um eine positive oder negative Arbeit? Ist der erste oder der zweite Schnittpunkt zu wählen? Bei Verläufen mit rein positiver Ladungswechselschleife (rot eingezeichnet) wird sinnvollerweise der Schnittpunkt auf UT gefunden werden, wobei die Grenzposition UT beim Findungsalgorithmus Schwierigkeiten bereiten kann. Das Schnittpunktverfahren geht hier idealerweise in das UT-UT-Verfahren über.

Auch bei diesem Verfahren werden bei variablen Steuerzeiten unter Umständen Phänomene, die eigentlich den Ladungswechsel zuzuordnen sind, dem Hochdruckteil zugeschrieben und umgekehrt. Somit können auch hiermit Fehlinterpretationen je nach Betrieb des Motors getätigt werden.

### Das Witt/Shelby-Verfahren

Das Verfahren nach Witt/Shelby ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit unterschiedlicher Prozesse auch bei Verfahren der Steuerzeitenvariation wie Auslass- oder Einlass-Schließt. Selbst Zweitaktverfahren lassen sich hiermit darstellen.

Der Name des Verfahrens Witt/Shelby beruht zum einen auf der Dissertation von Herrn Dr. Andreas Witt aus dem Jahre 1999, zum anderen auf dem SAE Paper 2004-01-1262 von Herrn Michael H. Shelby, Robert Stein und Christopher C. Warren aus dem Jahre 2004.

Das Verfahren nach Witt/Shelby beruht auf dem erweiterten UT-UT-Verfahren. Es ermöglicht eine vollständige Aufteilung des Prozesses in den Hochdruck- und Ladungswechselteil. Der Hochdruckteil nach Witt/Shelby umfasst dabei alle verbrennungsbezogenen Anteile und die ladungswechselbezogenen Anteile wie die Expansionsverluste werden vollständig extrahiert. Somit kann die Verschlechterung der Verbrennung, durch zum Beispiel sich verlaufenden Drall oder verschleppter Verbrennung, gut erkannt werden. Auch die anderweitig schwierig interpretierbaren Verfahren wie frühes Einlass-Schließt (FES) oder spätes Einlass-Schließt (SES) sind gut auswertbar.

Die wesentliche Grundlage des Verfahrens stellt die Extrapolation der Druckverläufe auf der Basis der Polytropengleichung dar.

$$p \cdot V^n = konst$$

Hierfür können unterschiedliche Methoden eingesetzt werden. Zum einen logarithmierte Druckverläufe als Basis und zum andern die differenzierte Form der Gleichung der polytropen Zustandsänderung. Ziel ist jeweils die Bestimmung des idealen Druckverlaufes. Anschließend kann die Berechnung der Arbeit von Öffnet/Schließt Steuerzeit bis UT erfolgen.

1. Numerische Integration über die Stützstellen des idealen Druckverlaufes
2. Berechnung mit der Gleichung zur Berechnung der Arbeit entlang einer Isentropen

$$W = \frac{P_1 \cdot V_1}{n-1} \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

3. Numerisches Integral des realen Verlaufes bilden
4. Bilden der Differenzfläche liefert die Incremental Compression Work (ICW) bzw. die Expansionsarbeit  $W_{Exp}$

Die hier als ICW bezeichnete Arbeit beschreibt bei spätem Einlass-Schließt die in der Hochdruckschleife reduzierte Fläche gegenüber dem Standardprozess.

### Hochdruck $p_{mi}$ nach Witt/Shelby $p_{mi}_{Hw/s}$

Zur Vermeidung der Zuordnung der ladungswechselbezogenen Verluste nach dem Auslassöffnen zum Hochdruckteil werden mit Hilfe der zuvor beschriebenen Methode die Expansionsverluste  $W_{Exp}$  berechnet und zur Hochdruckarbeit nach dem UT-UT-Verfahren hinzuaddiert.

Durch Division mit dem Hubvolumen ergibt sich das Hochdruck pmi nach Witt/Shelby für den Standardprozess ohne ICW

$$pmi_{H_{W/S}} = \frac{W_{H_{UT}} + W_{Exp}}{V_H}$$

Bei Bedarf muss, wie zum Beispiel bei spätem Einlass-Schließt, ebenfalls die Incremental Compression Work berücksichtigt werden. Auch für die Berechnung der ICW ist die Extrapolation des Druckverlaufes von UT bis Einlass-Schließt mit Hilfe des vorab beschriebenen Verfahrens durchzuführen. Anschließend erfolgt

Das Hochdruck pmi ergibt sich dann, wie in Abbildung 4 veranschaulicht, aus

$$pmi_{H_{W/S}} = \frac{W_{H_{UT}} + W_{Exp} + W_{ICW}}{V_H}$$

### Ladungswechsel pmi nach Witt/Shelby

Auch beim Ladungswechselteil des pmi nach Witt/Shelby ist, neben den Expansionsverlusten, bei spätem Einlass-Schließt die ICW zu berücksichtigen.

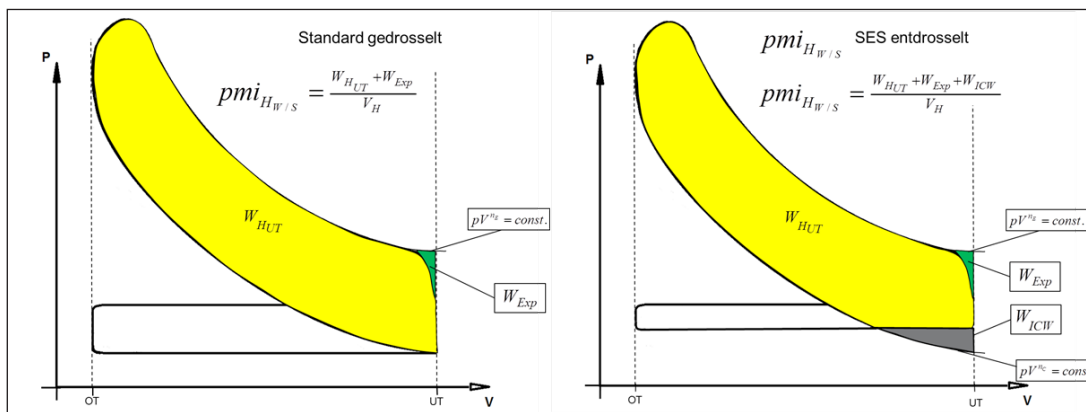


Abbildung 4: Hochdruckteil nach Witt/Shelby beim Standardprozess und bei spätem Einlass-Schließt

die Integration mit anschließender Differenzbildung zum numerischen Integral des realen Druckverlaufes (von UT bis Einlass-Schließt). Es gilt zu beachten, dass die Exponenten spezifisch zu berechnen sind, da diese sich zwischen Expansion und Kompression unterscheiden.

Die Expansionsverluste und die ICW sind hier negativ zur Ladungswechselarbeit nach dem UT-UT-Verfahren zu ergänzen.

$$pmi_{L_{W/S}} = \frac{W_{L_{UT}} - W_{ICW} - W_{Exp}}{V_H}$$

Die grafische Darstellung der Zusammenhänge für den Ladungswechselteil bei SES zeigt Abbildung 5 links.

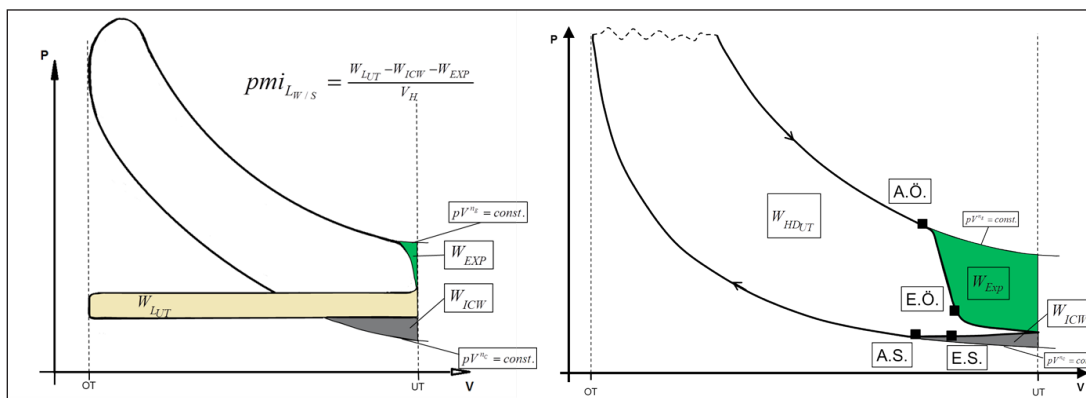


Abbildung 5: Ladungswechselteil nach Witt/Shelby bei spätem Einlass-Schließt und Bewertung des 2-Takt Prozesses

### Analyse von 2-Taktprozessen mit Witt/Shelby

Das Verfahren nach Witt/Shelby ermöglicht ebenfalls die eindeutige Analyse von 2-Taktprozessen. Auch hier werden mit Hilfe der polytropen Verlaufsergänzung die Expansionsverluste und die Incremental Compression Work berechnet. Abbildung 5 rechts zeigt den 2-Taktprozess und die Analyse entsprechend Witt/Shelby.

### Reale Beispiele und Unterschiede der Verfahren

Im Folgenden werden die 3 Verfahren der pmi-Aufteilung zur Verdeutlichung der Vor- und Nachteile bzw. der Abklärung inwieweit die Verfahren sinnvoll zur Analyse eingesetzt werden können anhand von zwei Beispielen miteinander verglichen.

#### Beispiel 1:

#### 1 600 U/min, pmi = 3 bar ; Auslasssteuerzeitenvariation

Als erstes Beispiel ein Betriebspunkt 1 600 U/min, pmi = 3 bar mit einer Restgasvariation durch Spätstellung der Auslassnockenwelle. Durch die damit einhergehende Vergrößerung der Ventilüberschneidung im Gaswechsel OT erhöht sich der Restgasgehalt.

Abbildung 6 zeigt das P-V-Diagramm für drei verschiedenen Auslasssteuerzeiten.

Klar zu erkennen ist die Druckerhöhung in der Ansaugphase mit zunehmendem Restgasgehalt. Die Restgaserhöhung bedingt für die gleiche Last ein Öffnen der Drosselklappe und damit einen Druckanstieg über die Entdrosselung.

Ebenfalls deutlich sichtbar sind die mit der Spätstellung der Auslassnockenwelle abnehmenden Expansionsverluste. Bei starker Spätstellung (rote Linie AS = 15) ist aber auch die Zunahme der Blow-Down-Verluste zu erkennen.

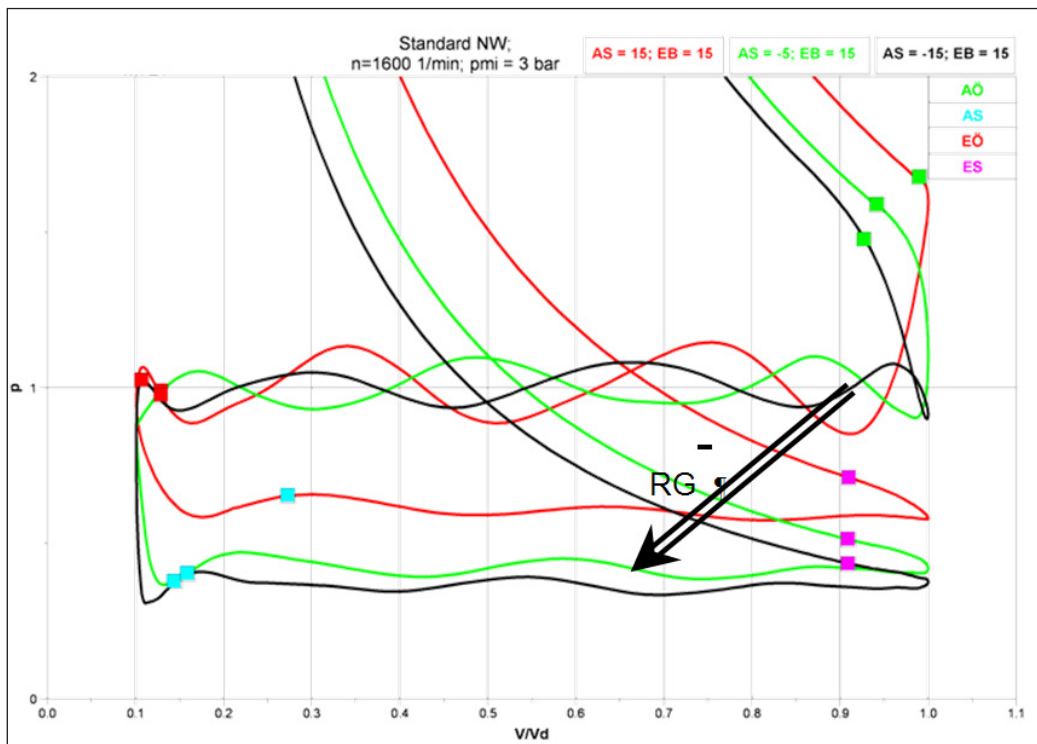


Abbildung 6: Entdrosselung durch Restgasvariation über Phasing der Auslassnockenwelle



Die folgende Tabelle vergleicht die 3 besprochenen Verfahren und deren Auswirkungen:

Stellung Nocken- wellen	Restgas	Witt/Shelby			UT-UT			pV-Schnittpunkt		
		$\eta_{H_{W/S}}$	$pmi_{L_{W/S}}$	$pmi_{H_{W/S}}$	$\eta_{H_{UT}}$	$pmi_{L_{UT}}$	$pmi_{H_{UT}}$	$\eta_{H_S}$	$pmi_{L_S}$	$pmi_{H_S}$
AS = -15 EB = 15	15 %	37,54	-0,630	3,63	37,45	-0,620	3,62	35,21	-0,404	3,404
AS = -5 EB = 15	19 %	37,38	-0,581	3,581	37,36	-0,579	3,579	35,45	-0,397	3,397
AS = 15 EB = 15	35 %	35,65	-0,400	3,4	35,64	-0,398	3,398	34,68	-0,307	3,307

Tabelle 1: Vergleich der Verfahren Witt/Shelby, UT-UT und pV-Schnittpunkt

Tendenziell zeigen alle Verfahren eine Verschlechterung des Hochdruckwirkungsgrades mit zunehmendem Restgasgehalt. Beim Schnittpunktverfahren ist dies jedoch schwächer ausgeprägt. Auch die betragsmäßige Verkleinerung des Ladungswechsel  $pmis$  ist mit zunehmendem Restgasgehalt, und damit der Entdrosselung, in allen Varianten zu verzeichnen.

Der Vergleich des Hochdruckwirkungsgrades zwischen den Verfahren zeigt kaum einen Unterschied zwischen dem Witt/Shelby-Verfahren und dem UT-UT-Verfahren. Lediglich bei der frühen Auslass-Öffnet-Steuerzeit ergibt sich ein kleiner Unterschied. Ursache hierfür sind die beim Witt/Shelby-Verfahren herausgerechneten Expansionsverluste. Recht große Unterschiede sind jedoch zum Schnittpunktverfahren zu verzeichnen.

Die gleiche Tendenz zeigt sich auch im Ladungswechsel  $pmi$ . Die Betrachtung der prozentualen Verbesserung des Ladungswechsel  $pmis$  durch Entdrosselung über Restgaserhöhung zeigt, aufgrund der einbezogenen Expansionsverluste, die größte Verbesserung im Witt/Shelby-Verfahren mit geringem Unterschied zum UT-UT-Verfahren. Wesentlich geringere Verbesserungen treten im Schnittpunktverfahren auf.

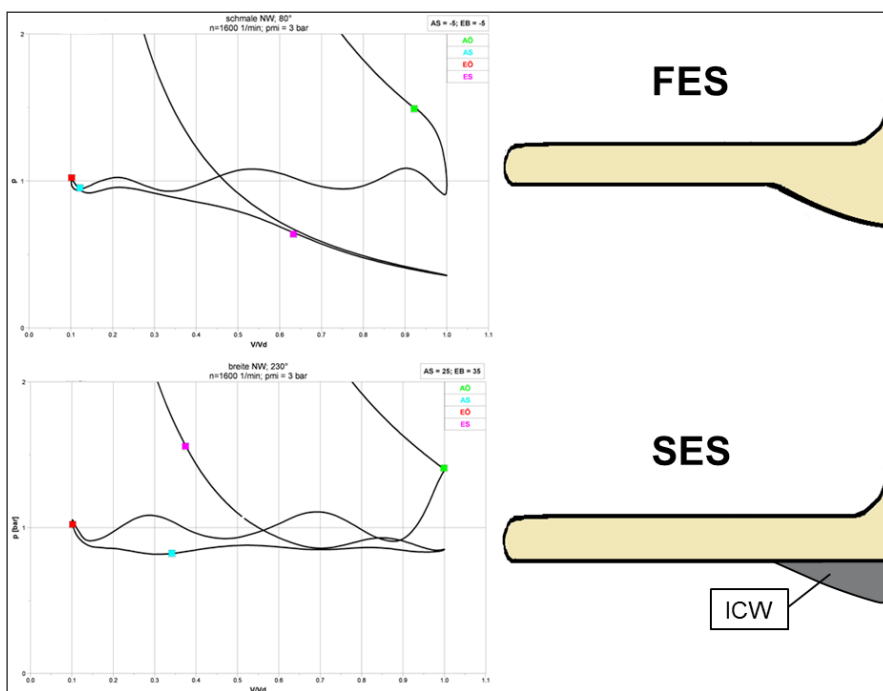


Abbildung 7: Entdrosselung durch frühes und spätes Einlass-Schließt

$$\%pmi_{L_{W/S}} = 36,5 \%$$

$$\%pmi_{L_{UT}} = 35,8 \%$$

$$\%pmi_{L_S} = 24 \%$$

**Beispiel 2:**  
**1 600 U/min, pmi = 3 bar; Entdrosselung durch FES bzw. SES**

Neben der im vorherigen Beispiel beschriebenen Entdrosselung durch Restgaserhöhung wird in diesem Beispiel auf die Entdrosselung durch frühes bzw. spätes Einlass-Schließt eingegangen. Es wurde dabei versucht, den Restgasgehalt näherungsweise gleich zu halten, um Quereinflüsse zu vermeiden. Abbildung 7 zeigt real und schematisch die pV-Diagramme für beide Entdrosselungsverfahren.

Betrachten wir die Arbeit nach dem Schnittpunktverfahren für den Ladungswechsel, d. h. die aufgespannte Fläche von Schnittpunkt bis Schnittpunkt, erscheint diese auf den ersten Blick näherungsweise gleich groß. Die Ladungswechselarbeit nach dem UT-UT-Verfahren ist jedoch, wie in Abbildung 7 schematisch dargestellt, stark unterschiedlich von FES zu SES. Der wesentliche Unterschied ist in der bei SES nicht berücksichtigten ICW zu finden. Kleine Unterschiede können auch noch durch die Berücksichtigung der Expansionsverluste beim Witt/Shelby-Verfahren und frühem Einlass-Schließt auftreten.

Wie die folgende Tabelle zeigt, ist der Restgasgehalt zwischen den beiden Verfahren mit 26 % bei FES und 24 % bei SES nahezu gleich. Das heißt, eine weitere Entdrosselung findet über die Begrenzung der Luftmasse im Zylinder durch die Steuerung des effektiven Volumens über die Ventilsteuerzeiten statt.

		Witt/Shelby			UT-UT			pV-Schnittpunkt		
	Restgas	$\eta_{H_{W/S}}$	$pmi_{L_{W/S}}$	$pmi_{H_{W/S}}$	$\eta_{H_{UT}}$	$pmi_{L_{UT}}$	$pmi_{H_{UT}}$	$\eta_{H_S}$	$pmi_{L_S}$	$pmi_{H_S}$
FES	26	36,8	-0,273	3,273	36,8	-0,270	3,270	34,4	-0,063	3,063
SES	24	36,5	-0,264	3,264	32,5	-0,168	3,168	34,4	-0,096	3,096

Tabelle 2: Vergleich der Verfahren Witt/Shelby, UT-UT und pV-Schnittpunkt, bezogen auf FES und SES

Klar erkennbar ist der beim UT-UT-Verfahren erwartete, wesentlich schlechtere Hochdruckwirkungsgrad für spätes Einlass-Schließt. Eine Analyse einer eventuell schlechter gewordenen Verbrennung durch Gemischinhomogenitäten, verlaufenden Drall, geänderter Schwerpunktlage oder Rückkondensation können hier nicht mehr detektiert werden.

Beim Schnittpunktverfahren sind hingegen gleiche Hochdruckwirkungsgrade zu verzeichnen. Im Vergleich zum Witt/Shelby-Verfahren sind diese jedoch wesentlich niedriger. Der Hochdruckwirkungsgrad nach dem Witt/Shelby-Verfahren ist für FES und SES näherungsweise gleich. Durch Korrektur der ICW und der Expansionsverluste kann der Fehler des UT-UT-Verfahrens ausgeglichen werden.

**Einsatzmöglichkeiten der Verfahren**

Betrachtet man die drei Verfahren der pmi Aufteilung wird ersichtlich, dass alle Verfahren Vor- und Nachteile haben. In einer abschließenden Betrachtung werden diese nochmals zusammengefasst aufgeführt.

**Variante 1 UT-UT**

Wesentlicher Vorteil des UT-UT-Verfahrens ist die einfache Bestimmung der Kennwerte. Für den normal gedrosselten Betrieb ist hierbei auch die Beurteilung des Prozesses mit guter Genauigkeit möglich. Auch aufgeladene Motoren sind einfach auswertbar. Fehler durch mehrfache Schnittpunkte sind dabei irrelevant. Auch der Vergleich mit theoretischen Vergleichsprozessen ist einfach realisierbar, da diese ebenfalls zwischen den Grenzen UT bis UT aufgebaut sind. Eine kritiklose Auswertung von Prozessen mit dem UT-UT-Verfahren ist dennoch nicht möglich. Der Vergleich von Entdrosselungsverfahren auf Basis von variablen Ventilsteuerzeiten ist unmöglich.

Die Gegenüberstellung der beiden Verfahren FES und SES zeigt dies eindeutig. Eine vergleichende Beurteilung der Verbrennung führt zu falschen Schlüssen. Auch die Entdrosselungstiefe kann nicht für verschiedene Steuerzeiten miteinander verglichen werden.

### Variante 2 Schnittpunktverfahren

Das Schnittpunktverfahren eignet sich gut für den schnellen Vergleich von Prozessen. Auch der Vergleich von Verfahren mit frühem oder spätem Einlass-Schließt ist direkt möglich. Absolutwerte dürfen jedoch nicht betrachtet werden. Auch die Übertragung des Hochdruckteils in Vergleichsprozesse kann nicht erfolgen. Als schwierig erweist sich beim Schnittpunktverfahren die Bestimmung des Schnittpunktes in Abhängigkeit von der Suchrichtung sowie Schwingungen im Druckverlauf. Schon bei geringen Änderungen des Druckverlaufes können stark unterschiedliche Schnittpunkte gefunden werden. Auch verrauschte Signale können sporadisch zu variablen Schnittpunkten führen.

Als ebenfalls kritisch erweist sich die Beurteilung bei aufgeladenen Motoren. Im Grenzfall, bei komplett positiver Ladungswechselschleife, geht hierbei das Verfahren in das UT-UT-Verfahren über. Bei wechselnden Ladungswechselschleifen, die z. B. zu Beginn negativ und dann positiv werden, stellt sich die Frage der Zuordnung, da hier mehrfach verschiedenen Schnittpunkte auftreten.

### Variante 3 Witt/Shelby-Verfahren

Das Witt/Shelby-Verfahren ist das aus thermodynamischer Sicht beste Verfahren. Es erfolgt eine saubere Aufteilung in den Ladungswechsel- und Hochdruckteil. Ein Vergleich des Hochdruckteils mit dem idealen Vergleichsprozess ist direkt durchführbar. Unabhängig von variablen Ventilsteuerzeiten können verbrennungsbezogene Effekte direkt aus dem Hochdruckwirkungsgrad abgelesen werden, ohne durch Einflüsse geänderter Steuerzeiten beeinflusst zu werden. Auch die Analyse von 2-Takt-Prozessen ist möglich.

Nachteil des Verfahrens ist, dass es bisher nur auf Basis von Ventilsteuerzeiten verfügbar ist. Eine Online-Ermittlung der groben Steuerzeiten aus dem Druckverlauf erscheint aber realisierbar. Alternativ könnte auch bei Online verfügbaren Steuerzeiten die Berechnung basierend auf diesen erfolgen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Andreas Witt: Analyse der thermodynamischen Verluste eines Ottomotors unter den Randbedingungen variabler Steuerzeiten, Dissertation
- [2] Michael H. Shelby, Robert Stein und Christopher C. Warren: SAE Paper 2004-01-1262
- [3] Prof. Dr. Michael Bargende: Berechnung und Analyse innermotorischer Vorgänge. Vorlesungsmanuskript, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Stuttgart 2012
- [4] Prof. Dr. Michael Bargende: Grundlagen der Verbrennungsmotoren. Vorlesungsmanuskript, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Stuttgart 2011/2012

**Kistler Group**

Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11

Kistler Group includes the Kistler Holding AG and  
all its subsidiaries in Europe, Asia, Americas and Australia.

Find your local contact on  
[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

**KISTLER**

measure. analyze. innovate.

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)