

14

Der Motor

Verständnis für das Ganze

Kurt Kirsten



Einleitung

Die Entwicklung des Automobils und damit auch der Antriebssysteme wurde in der Vergangenheit vielfach durch die Anwendung neuester Technologien geprägt und vorangetrieben. Damit war es den Marktteilnehmern möglich, in einen im Allgemeinen wachsenden Markt ihre Position bzw. die ihrer Produktmarken durch gezielte Differenzierung auszuprägen.

Das heutige Marktszenario ist geprägt durch:

- kürzer werdende Produktlebenszyklen
- stärkere Segmentierung
- hohen Kostendruck
- anspruchsvolle Kundenerwartungen
- hohe Gesellschaftserwartungen

Die Situation ist außerdem gekennzeichnet durch:

- verschärfte gesetzliche Vorgaben
- wachsende Wahrnehmung der Begrenzung von Ressourcen
- deutliche Produktionsüberkapazitäten
- unterschiedliche regionale und marktsegment-spezifische Anforderungen

Die Summe all dieser Anforderungen und Herausforderungen erfordert einen gesamtheitlichen An-

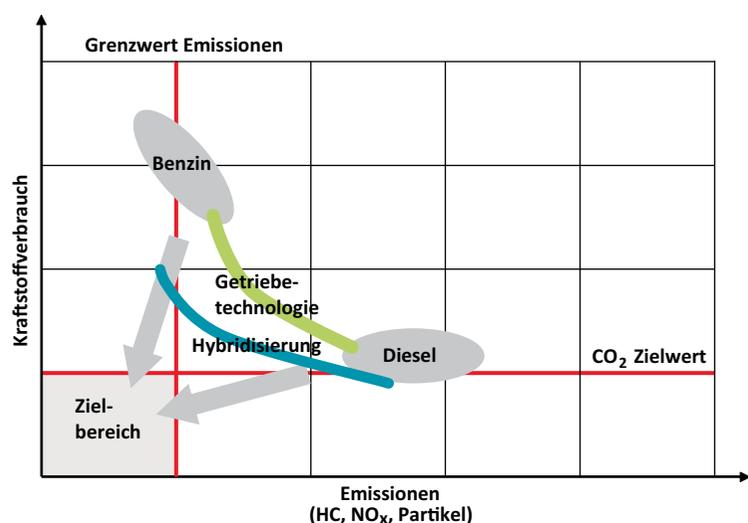


Bild 1 Kraftstoffverbrauch/Emissionen

satz, damit mit neuen Technologien ein Mehrnutzen gegenüber dem heutigen Serienstand erreicht werden kann. Die Ausprägung dieses Mehrnutzens kann den Kunden, die Gesellschaft, den Gesetzgeber oder den Produzenten betreffen. Die Beherrschung bzw. Steuerung dieser Komplexität ist die eigentliche Herausforderung in der heutigen Zeit.

Kernthemen der heutigen Antriebssystementwicklung

Das Kernthema der Pkw-Antriebssystementwicklung ist der Zielkonflikt zwischen der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs (CO₂-Emission) einerseits und den limitierten Schadstoffemissionen andererseits (Bild 1).

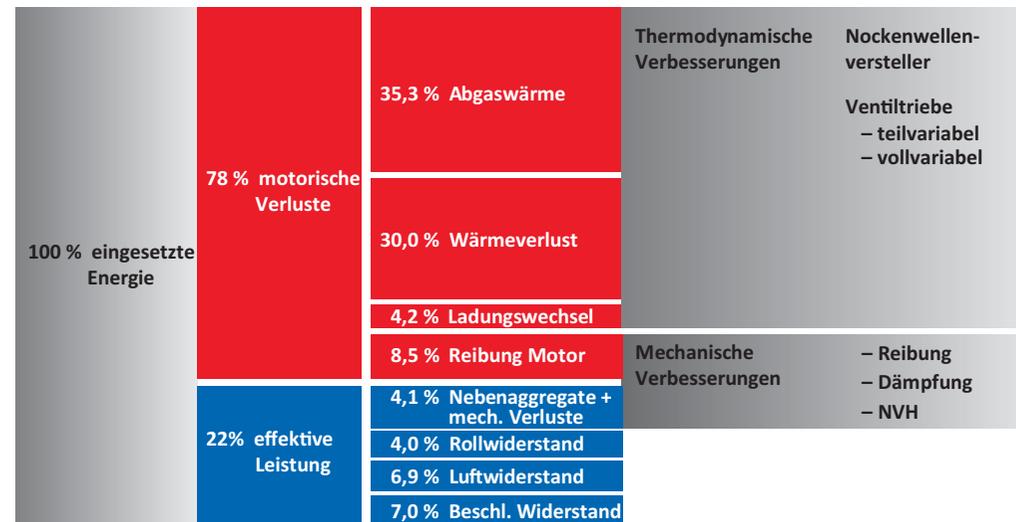
Dabei müssen aber die Randbedingungen wie Kosten, Markenimage, Fahrspaß, Komfort, Geräusch und Zuverlässigkeit mit betrachtet und berücksichtigt werden.

Im Zielkonflikt zwischen Verbrauch und Emissionen sind die Otto- und Dieselmotoren völlig unterschiedlich positioniert.

Der Ottomotor ist aufgrund seiner effizienten Abgasnachbehandlung stark emissionsarm positioniert. Der Dieselmotor hingegen ist durch seinen thermodynamisch günstigen Wirkungsgrad und die vorteilhafte Drehmomentcharakteristik stark verbrauchsarm positioniert. Die weiteren Betrachtungen in diesem Artikel beziehen sich vorwiegend auf den Ottomotor.

In Bild 2 ist eine Verlustanalyse exemplarisch für den Ottomotor, bezogen auf den NEFZ Zyklus, dargestellt. Die Ansatzpunkte für eine Verbesserung liegen in der Anwendung der Variabilitäten im Nockenwellentrieb. Dies sind:

Wirkungsgradkette moderner Ottomotor



bezogen auf NEFZ
Quelle: Prof. Leohold, U. Kassel

Bild 2 Wirkungsgradkette Ottomotor im NEFZ

Die weiteren Betrachtungen in diesem Artikel beziehen sich vorwiegend auf den Ottomotor.

- Nockenwellenphasensteller
- Teilvariable Ventiltriebssysteme
- Vollvariable Ventiltriebssysteme

Durch die Variabilitäten im Ventiltrieb wird derart in den thermodynamischen Prozessablauf eingegriffen, dass im Bereich des Niederdruckprozesses die Ladungswechselarbeit positiv beeinflusst wird und im Bereich des Hochdruckprozesses der Verbrennungsprozess in seinem Ablauf optimiert wird. Diese Eingriffe haben auch einen direkten Einfluss auf die Emissionsentstehung im Verbrennungsmotor und sind somit ein Bestandteil mit unmittelbarer Emissionsrelevanz.

Die mechanischen Verbesserungen beziehen sich auf die Verlustminimierung in der Reibung bzw. der Reduzierung von parasitischen Verlusten der Nebenaggregateantriebe. Die Größenordnung der mechanischen Verluste liegt bei etwa 10 % bis 12 % der eingesetzten Kraftstoffenergie. D. h. Detailoptimierungen mit einem Verbesserungsbeitrag von 10 % bis 20 % bezogen auf die mechanischen Verluste erbringen einen Gesamtbeitrag von etwa 1 % bis 2 % im Fahrzyklus.

Thermodynamische Verbesserungen

Das wesentlich größere Verbesserungspotenzial liegt in der Verringerung der thermodynamischen Verluste. Die thermodynamischen Verbesserungen zielen dabei auf die Darstellung eines drosselfreien Lastbetriebes ab. Anstelle der heute üblichen Drosselklappe im Ansaugtrakt wird die Regelung der Mengenzuordnung in die Ventile verlegt. Durch das Anheben des Saugrohrdruckes verringert sich die aufzuwendende Ladungswechselarbeit. Die notwendige Zuordnung der Frischgasmasse erfolgt dann primär durch Variation des Einlassschließzeitpunktes bzw. durch die Gestaltung der Ventilhubkurve in Form der Nockenkontur.

Gleichzeitig kann mit dem Einsatz von variablen Ventilsteuerungen die Ladungsbewegung im Brennraum gezielt beeinflusst werden. Die durch die Kolbenbewegung aufgezwungene Einströmbewegung wird durch die Gestaltung der Einlasskanäle in eine Drall- oder Tumble-Bewegung umgesetzt. Öffnen die Ventile zu unterschiedlichen Zeitpunkten, ist auch die erzeugte Zylinderinnenströmung stark beeinflussbar. Im Zusammenspiel mit der Zündkerzenlage und der allgemeinen Brennraumgestaltung eröffnet sich ein weites Feld zur Optimierung.

Durch die Gestaltung der Ventilüberschneidung bzw. durch die Phasenlage der Ventilöffnung kann direkt Einfluss auf den Restgasanteil genommen werden, der im Zylinderraum verbleibt. Durch die gezielte Zumischung von heißem Restgas zur Frischgasmasse ist die Temperatur der Ladungsmasse zu Verdichtungsbeginn beeinflussbar. Damit lässt sich indirekt auch die Temperatur bei Verdichtungsende beeinflussen. Für moderne Selbstzündungsverfahren wird durch diese Variabilität eine neue Optimierungsvariante erschlossen.

Zusammenfassend können folgende Einflussmöglichkeiten beschrieben werden:

- drosselarter Teillastbetrieb (Ladungswechsel)
- Frischgasmasse im Brennraum (Lastregelung)
- Ladungsbewegung im Brennraum
- Restgasanteil im Brennraum
- Temperatur bei Verdichtungsbeginn

Für die Optimierung im Motorenkennfeld (Bild 3) ergeben sich je nach Last und Drehzahl verschiedene Anforderungen:

A Im Bereich der Volllast bei Nenndrehzahl wird ein breiter Einlass- und Auslasshub mit breiter

Ventilüberschneidung gewünscht, um das „freie Atmen“ des Motors sicher zu stellen (später Einlassschluss).

- B Im Bereich der niedrigen Drehzahlen und hohen Lasten sollten zur Optimierung des Liefergrades die Ein- und Auslasszeiten verkürzt sein. Die Ventilüberschneidung ist ebenfalls geringer auszulegen als bei Nenndrehzahl.
- C Im mittleren Kennfeldbereich sollte durch ein frühes Einlassschließen die Ladungswechselarbeit reduziert werden.
- D Im Niedriglastbereich bedarf es der zusätzlichen Beeinflussung der Zylinderinnenströmung und der Temperierung der Ladungszusammensetzung, um den Verbrennungsablauf positiv zu beeinflussen. Eine Zylinderabschaltung kann weitere Potenziale erschließen.
- E Für den Bereich des Motorstarts sind gesonderte Maßnahmen zur Sicherstellung einer möglichst hohen effektiven Verdichtung zum verbesserten Anspringverhalten wünschenswert. Für erleichterten Wiederstart bei Stopp-Start Funktionalitäten bewährt sich auch ein begrenzter Ladungsdurchsatz durch geringe Ventilhube bzw. geschlossene Ventile.

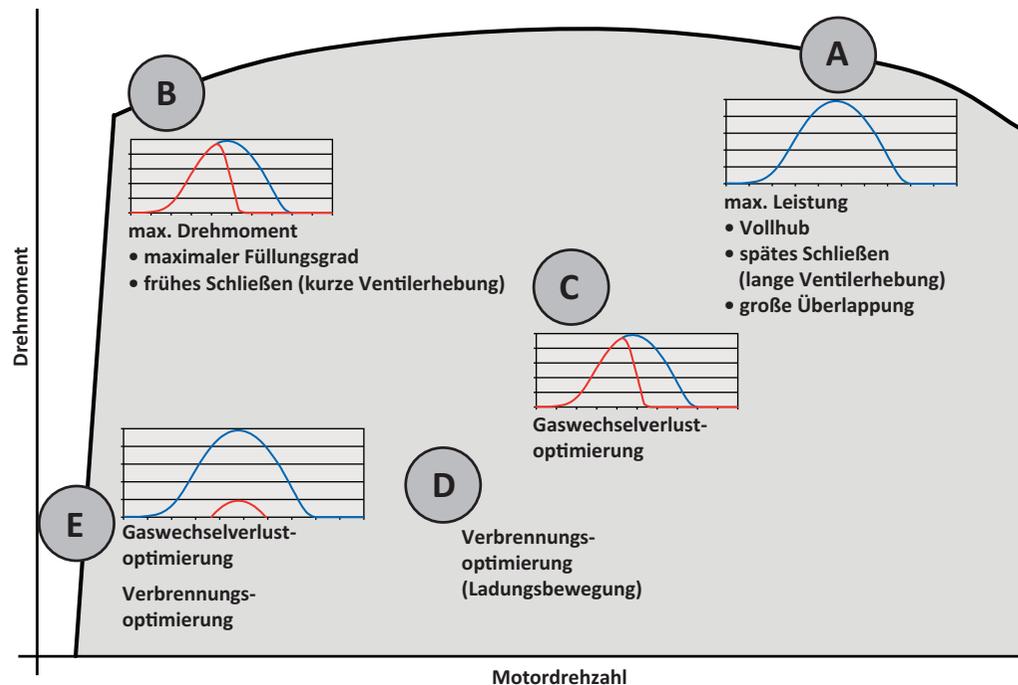


Bild 3 Anforderungen aus dem Motorenkennfeld

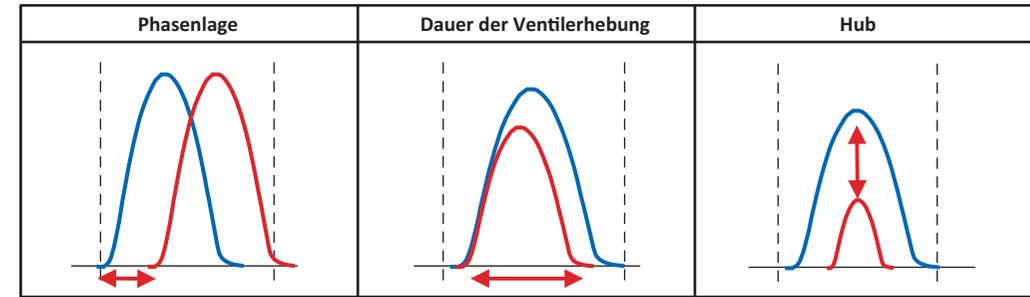


Bild 4 Einteilung der Variabilität im Ventiltrieb

Einteilung der Variabilitäten im Ventiltrieb

Zur Charakterisierung der Variabilitäten im Ventiltrieb (Bild 4) dienen:

- Phasenlage der Ventilerhebung
- Dauer der Ventilerhebung
- Maximalhub der Ventilerhebung

In Bild 5 sind die Variabilitäten hinsichtlich Phase und Ventilhub nach der Eigenschaft der diskreten bzw. kontinuierlichen Verstellung aufgegliedert. Der Grad der Variabilität nimmt in der Darstellung von links nach rechts entsprechend zu.

Um den Einfluss der Entdrosselung auf das motorische Betriebsverhalten darzustellen ist im Bild 6 ein stationäres Kennfeld mit vier exemplarischen

Betriebspunkten dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Einfluss einer Entdrosselung durch die verschiedenen Maßnahmen

- nur Einlassphasensteller
- Einlass- und Auslassphasensteller
- Doppelphasensteller & variabler Ventilhub

sich im Besonderen im unteren Kennfeldbereich zeigt und eine Größenordnung von bis zu 12 % Verbrauchseinsparung im Stationärbetriebspunkt ausmachen kann.

Die Verbrauchsverbesserungspotenziale im Fahrzyklus liegen zwischen 4 % und 6 % je nach gewählter Variabilität gegenüber einem Motor mit Standardventiltrieb.

Für das transiente Betriebsverhalten der Systeme kommen dem Regelungskonzept und dem dynamischen Ansprechverhalten eine besondere Bedeutung zu.

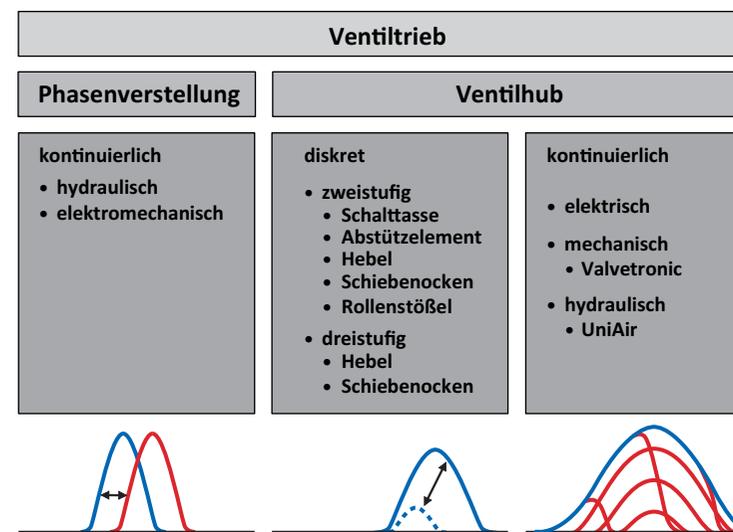


Bild 5 Grad der Variabilität im Ventiltrieb

zu. Für die Regelung des Luft-, Brennstoff- und Zündpfades ist ein betriebssicheres Erkennen der momentanen zylinderindividuellen Zustandsgrößen von besonderer Bedeutung. Deshalb erschließen die „dynamischeren“ Ventiltriebssysteme auch ein größeres Verbrauchspotenzial im Zyklusverbrauch.

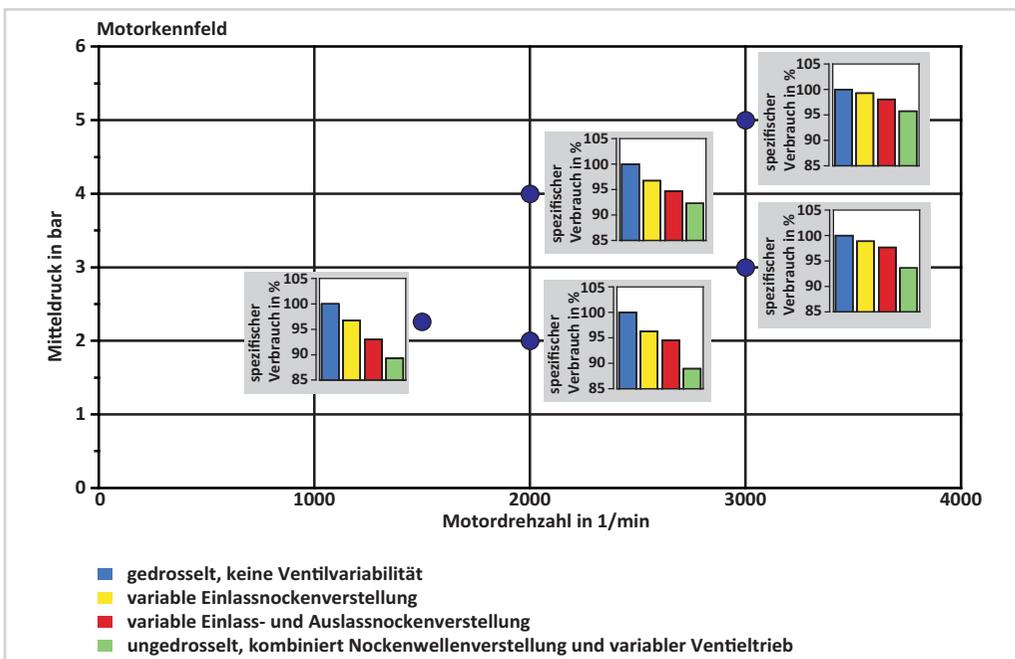


Bild 6 Verbrauchsverbesserung durch Entdrosselung

	NW-Versteller	NW-Versteller + elektrohydr. Tasse	NW-Versteller + Schiebennocke + elektronischer Aktuator	NW-Versteller + elektromechan. Welle	Elektro-Hydraulik (nur Einlass)
Ersparnis*:	ca. 4 %	ca. 7 %	ca. 8 %	ca. 8 %	ca. 8 % bis 15 %
Steuerung:	per Zylinderbank	per Zylinderbank	per Zylinder	per Zylinderbank	Ventil individuell Zylinder individuell
Dynamik der Reaktion:	langsam	langsam	mittel	langsam	schnell
Charakteristik:	kontinuierlich	zweistufig	zweistufig (evtl. dreistufig)	kontinuierlich	kontinuierlich
Serie seit:	1997 (Ford, BMW, VW, Audi, GM, Fiat, Opel, Porsche, Ferrari, SAIC, Chrysler, Volvo, ...)	1989, 1999, ... (Porsche, Honda, ...)	2006 (Audi, ...)	2001 (BMW, PSA)	2009 (FIAT)

*nach NEFZ, bezogen auf Standardventiltrieb

Bild 7 Vergleich verschiedener, variabler Ventiltriebssysteme

Ausführungsbeispiele und Einfluss auf das motorische Betriebsverhalten von variablen Ventiltrieben

Einen Überblick zu heute ausgeführten variablen Ventiltriebssystemen und deren Markteinführung gibt die Darstellung in Bild 7.

Zur Bewertung der verschiedenen Systeme werden herangezogen:

- Kraftstoffverbrauch im Fahrzyklus
- Regelungskonzept
- dynamisches Ansprechverhalten
- Verstellcharakteristik

Eine bewertende Darstellung der Variabilitäten im Ventiltrieb für die Brennverfahrenbeeinflussung wird vorgenommen anhand der fünf Kriterien:

- Ladungswechsel
- Restgasanteil
- Temperatur bei Verdichtungsbeginn
- Ladungsbewegung
- Frischgasmasse

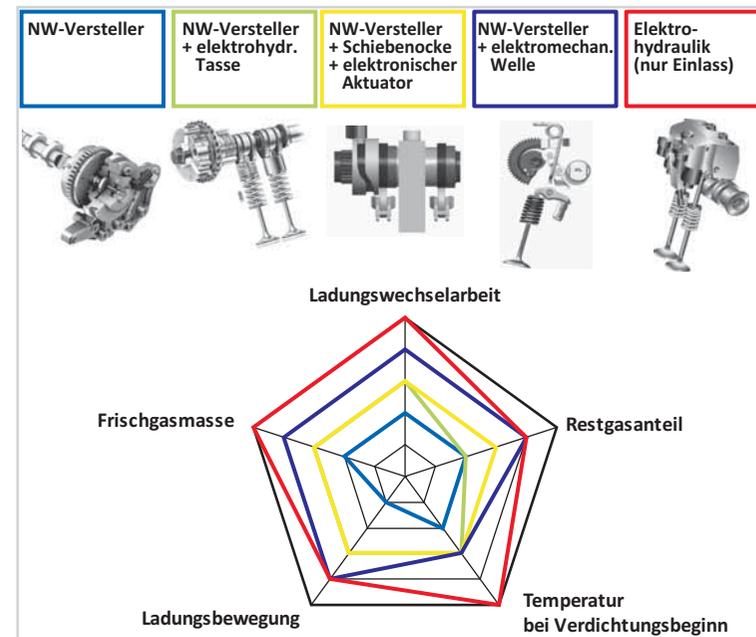


Bild 8 Bewertung verschiedener variabler Ventiltriebssysteme

Bild 8 zeigt die bewerteten Ausführungsbeispiele anhand eines Spinnendiagramms. Mit steigendem Grad der Variabilität nimmt auch der „Fülligkeitsgrad“ des Spinnendiagramms zu.

Zusammenfassend kann mit Blick auf die thermodynamischen Verbesserungen folgendes festgehalten werden:

- Variabilitäten im Ventiltrieb sind nicht nur zur Reduktion der Ladungswechselverluste sinnvoll, sondern erschließen auch Verbrauchs- und Emissionsreduktionspotenziale in der Verbrennung (speziell bei Direkteinspritzern Otto und Diesel).
- Downsizing und Downspeeding erhöhen die Anforderungen an die Grundauslegung des Steuertriebs.

- Stopp-Start Funktionalitäten verändern das Belastungsprofil für Steuertriebe.
- Schnelle und zyklustreue Variabilitäten verbessern die Ausschöpfung der Potenziale im transienten Betriebsbereich, erhöhen damit den Komfort von Stopp-Start Funktionalitäten und verbessern die Ansatzpunkte für eine Hybridisierung.
- Ein guter Steuertrieb ist nicht die Summe guter Einzelkomponenten, sondern eine in sich geschlossene Gesamtauslegung.

Mechanische Verbesserungen

Wie bereits in Bild 2 ausgeführt, beziehen sich die mechanischen Verbesserungen auf die Verlustbereiche Reibung und parasitische Verluste der Nebenaggregate. Insgesamt zu betrachtende Optimierungskriterien sind:

- Reibung
- Dämpfung
- NVH-Verhalten

Neben der Herausforderung die Antriebsleistung zu übertragen, ergeben sich weitere Anforderungen an die Grundauslegung der Bauteile im Synchronisations- und Aggregatetrieb:

- Vorspannungen so gering wie möglich (kleine Lagerkräfte geringe Reibung)
- Eingriffsgeräusche der Synchronisation minimieren
- Dynamische Spitzen vermeiden

Ausführungsbeispiele sind in Bild 9 zu sehen.

Das Potenzial der Verbesserung kann aus Bild 2 abgeleitet werden. Der Anteil der Verluste an mechanischer Reibung im Motor und der Antriebsleistung

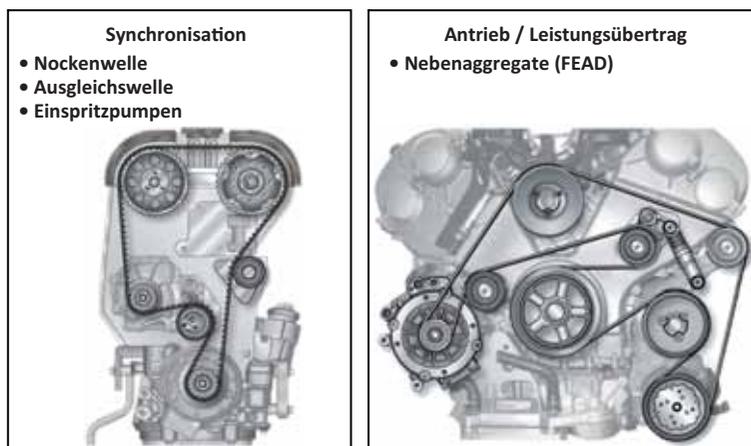


Bild 9 Aggregate- und Synchronisationstriebwerke von Verbrennungsmotoren

für die Nebenaggregate beträgt im NEFZ etwa 12 % bis 13 % der eingesetzten Primärenergie.

In Bild 10 sind die Bauteile dargestellt, welche die Schaeffler Gruppe als typische Motorkomponenten bzw. Module zuliefert. Es ist zu erkennen, dass es sich bei den meisten Bauteilen um Komponenten handelt, die einer Gleit- oder Drehbewegung ausgesetzt sind.

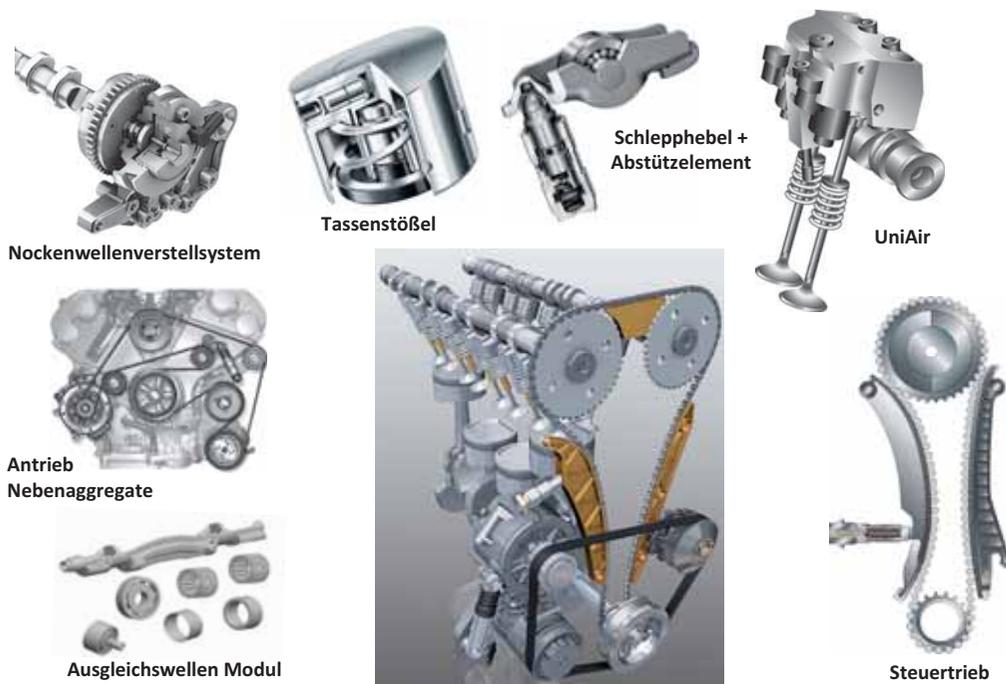


Bild 10 Typische Bauteile für die Anwendung im Motor

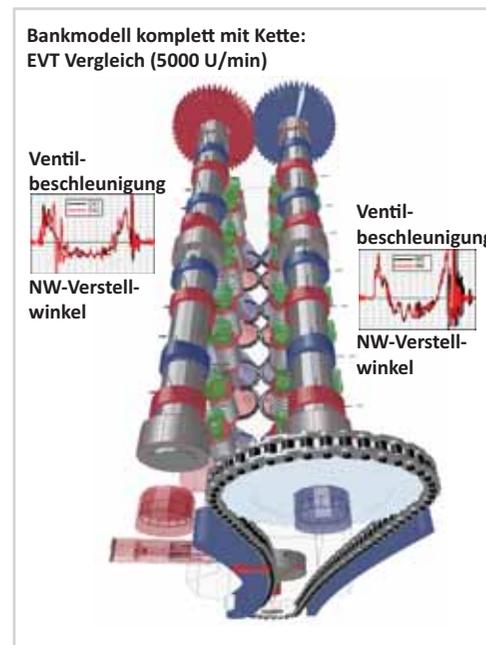


Bild 11 Gesamtsystemsimulation

Der Verlustminimierung kommt damit eine besondere Bedeutung zu. Darüber hinaus handelt es sich bei den Komponenten um Elemente von schwingungsfähigen Systemen, die nur im begrenzten Maße eine Einzeloptimierung erlauben, sondern in einer Gesamtsystembetrachtung optimiert werden müssen.

Das Bild 11 soll diesen Zusammenhang exemplarisch am Beispiel eines kettengetriebenen Nockenwellenantriebs eines Vierzylindermotors darstellen. Die geschlossene Dynamiksimulation geht von einer Anregung in der Kurbelwelle aus und betrachtet sowohl das Verhalten von

- Kette
- Spannschienen
- Hydraulikspanner
- Schlepphebel
- Ventiltfeder
- Ventil

und stellt somit eine Gesamtsystems simulation dar. Die gegenseitige Beeinflussung von reibungsreduzierenden Maßnahmen und gleichzeitig notwendigen Dämpfungsgliedern ist die Herausforderung der Abstimmung. Dazu ist es notwendig kalibrierte und validierte Simulationsmodelle aufzubauen, die den Gesamtzusammenhang abbilden.

Zusammenfassende Betrachtung

In Bild 12 sind die einzelnen Verbesserungspotenziale heutiger Verbrennungsmotoren in einer Gesamtübersicht dargestellt. Durch Maßnahmen im thermodynamischen Bereich ist erkennbar, dass bei Dieselmotoren nur noch ein geringes Verbesserungspotenzial besteht. Bei den Ottomotoren sind noch Verbesserungen von 10 % bis 12 % erreichbar.

Darüber hinaus können durch Maßnahmen bei der Motormechanik Gesamtpotenziale von 3 % bis 5 % erschlossen werden. Die Potenziale durch Stopp-Start Funktionalitäten, das Downsizing und das Thermomanagement runden die Gesamtverbesserungspotenziale ab.

Mit dem aufgezeigten Baukasten an Bauteilen und den vorhandenen Engineering-Dienstleistungsangeboten ist der Bereich Schaeffler Motorsysteme gut gerüstet, um einen Beitrag zu Erschließung dieser Verbrauchsverbesserungspotenziale zu leisten.

Diesel < 3 % Optimierung des Verbrennungssystems	Benzin < 7 %	1 – 2 % bedarfsgesteuerte Nebenaggregate
4 – 6 % Drosselverluste Benzin		2 – 3 % Reibungsminderung
3 – 5 % Stopp-Start Funktion		1 – 2 % Thermomanagement
Thermodynamische Verbesserung		5 – 8 % Downsizing
Mechanische Verbesserung		
Weitere Verbesserungen		

Bild 12 Gesamtübersicht Verbesserungspotenziale