15. Symposium Energieinnovation, 14. bis 16. Februar 2018, Technische Universität Graz, www.EnInnov.TUGraz.at
ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

BETRIEBSSTRATEGIEENTWICKLUNG VON OTTOMOTOREN FÜR KWK-ANLAGEN IM KONTEXT VON POWER-TO-GAS KONZEPTEN

Jens STEINMILL, Amir POURSHAHIDZADEH

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren, Universitätsstr.150
D-44780 Bochum, Tel. +49(0)234/32-27404, Fax. +49(0)234/32-07404,
jens.steinmill@rub.de, http://www.lvm.rub.de

Kurzfassung:

KWK-Anlagen ermöglichen bei Betrachtung im Kontext von Power-To-Gas Konzepten eine zeitgleiche Rückverstromung und eine sektorübergreifende Erzeugung von Wärme aus dem regenerativ erzeugten Brenngas.

Die Steuerung und Regelung von Verbrennungsmotoren, bei Einsatz in KWK-Anlagen, hat den Stand der Technik, welcher in der Automobilbranche üblich ist, noch nicht erreicht. Häufig werden die Motoren stationär in einem Betriebspunkt, ohne Anpassung des Brennverfahrens betrieben.

Zur Darstellung variabler Anteile von erzeugter Wärme und erzeugtem Strom wird eine leistungsgeführte Motorsteuerung dargestellt, die thermische und mechanische Leistungsanforderungen umsetzt. Die Leistungsanforderungen werden relativ auf die Gesamtsystemleistung (thermische und mechanische Leistung) bezogen. Es wird ein Leistungsstrukturdiagramm eingeführt, anhand dessen der Betriebsbereich von Verbrennungsmotoren in KWK-Anlagen in Bezug auf die Variabilität von mechanischer und thermischer Leistungsabgabe dargestellt werden kann (Abbildung 1).

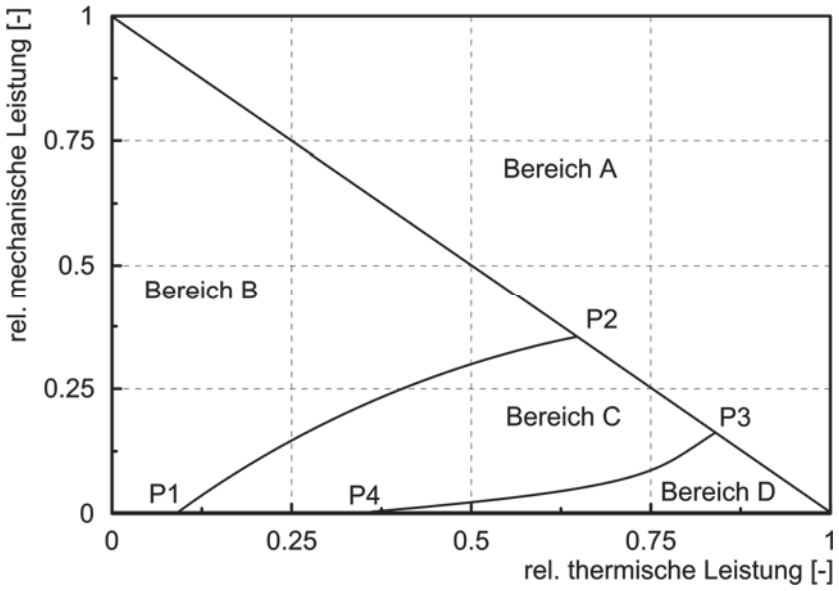

Abbildung 1: Betriebsbereiche der leistungsgeführten Motorsteuerung (schematische Darstellung)

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

P1 entspricht einem Betriebspunkt ohne mechanischer Leistungsabgabe. Die Reibleistung des Motors entspricht hier der indizierten Leistung.

In Punkt P2 wird die mechanische Nennleistung erreicht. Der Luftmassenstrom ist auf der Grenze (P2;P3) maximal. Da die maximale Luftfüllung nur in geringem Maße von der Verbrennung beeinflusst wird, kann die Grenze (P2;P3) annähernd linear dargestellt werden.

Im Punkt P3 entspricht die thermische Belastung den maximal tolerierbaren Parametern. Entsprechend ist die Grenze (P4;P3) durch thermische Belastung und Verbrennungsstabilität definiert. Der Bereich D kann durch Stabilisierung des Brennverfahrens und durch eine höhere thermische Belastbarkeit verkleinert werden. Dies kann z. B. durch die Auswahl von thermisch resistenteren Werkstoffen umgesetzt werden.

P4 stellt den Betriebspunkt mit höchster thermischer Leistung dar, bei dem keine mechanische Leistung produziert wird. Die Grenzen des Betriebskennfeldes ergeben sich aufgrund des maximal erreichbaren effektiven Wirkungsgrads, der Verbrennungsstabilität und der thermischen Belastbarkeit des Motors.

Der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors wird aus thermischen und mechanischen Leistungsanforderungen sowie dem gewünschten Betriebsmodus abgeleitet.

Zur Entwicklung der Motorsteuerungsfunktionen wird ein Motorprüfstand genutzt, der in Bezug auf die Messdatenerfassung- und Verarbeitung für den Betrieb mit einem Rapid-Control-Prototyping Steuergerät optimiert ist.

Die Steuerungsalgorithmen werden dargestellt und exemplarisch anhand des Prüfstandsmotors parametriert. Nach Applikation der Funktionen werden die Betriebsbereiche im Leistungsstrukturdiagramm dargestellt.

Die entwickelten Funktionen erweitern das Potential von KWK-Anlagen in Bezug auf eine variable, sektorübergreifende Nutzung von regenerativ erzeugtem Erdgas.

Keywords: Kraft-Wärme-Kopplung; Rapid-Control-Prototyping; Verbrennungsmotor; Power-To-Gas; Betriebsstrategie; Leistungsstruktur

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende wird es nach verschiedenen Szenarien zu einer Diversifizierung der Energieproduktion kommen. Durch den Ausbau von erneuerbaren Energiequellen soll im Rahmen der Energiewende der Anteil nicht fossiler Energieträger deutlich erhöht werden. Bis 2020 soll der Anteil 35 % des Bruttostromverbrauchs betragen. Da die Produktion der erneuerbaren Energiequellen kurz- und mittelfristigen Schwankungen unterliegt, müssen Speichertechnologien verwendet werden, die diese Schwankungen ausgleichen. Kurzfristige Änderungen der Produktionsleistung können z. B. durch Pumpspeicherkraftwerke oder Ansätze wie Vehicle-to-grid mit hohen Wirkungsgraden ausgeglichen werden. Zum Ausgleich von mittelfristigen Schwankungen kommt die elektrolytische Erzeugung von Synthesegasen und deren Nutzung in Frage. Dieses Energiespeicherkonzept, welches erhebliche Mengen an Energie aufnehmen und speichern kann, wird als Power-to-Gas Konzept bezeichnet [1].

In Abbildung 2 ist der Aufbau einer Power-to-Gas Infrastruktur dargestellt. Regenerativ hergestellte elektrische Energie wird mittels Wasserelektrolyse in Wasserstoff und optional,

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

mit Wirkungsgradeinbußen unter Verwendung von CO2, in Methan umgewandelt. Methan kann direkt in das Erdgasnetz eingespeist werden. Da der Wirkungsgrad durch die Methanisierung des Wasserstoffs geringer wird, ist eine direkte Nutzung von Wasserstoff angestrebt.

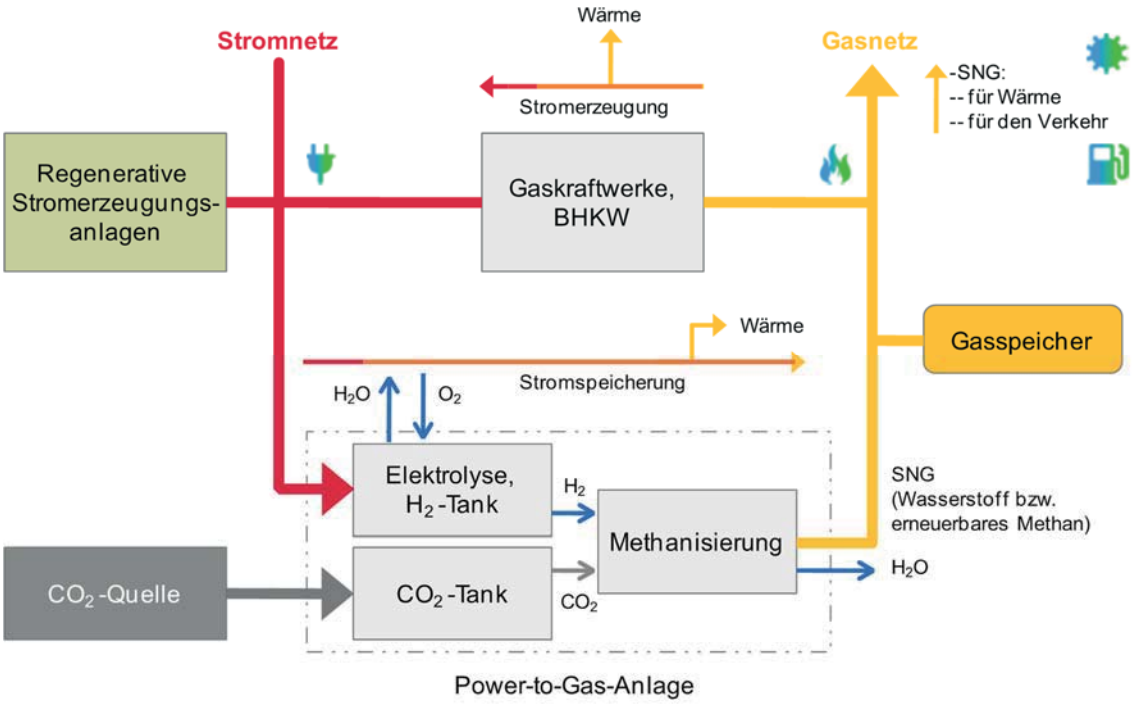

Abbildung 2: Power-to-Gas Konzept [2]

Es wird eine Betriebsstrategie für Verbrennungsmotoren dargestellt, die den Motor wahlweise mit höchstem effektiven Wirkungsgrad betreibt, oder die Anteile von sektorübergreifender Wärmeerzeugung zur elektrischen Rückeinspeisung variabel darstellt. Hierbei werden mechanische (elektrische) und thermische Leistungsanforderungen, innerhalb des möglichen Betriebsbereiches des Verbrennungsmotors beantwortet.

Dies wird erreicht, indem regelungstechnische Ansätze aus dem automobilen Sektor weiterentwickelt und auf die energietechnische Anwendung übertragen werden. Im Automobilbereich stellt die Momentenstruktur den Stand der Technik dar. Das Fahrerwunschmoment, welches aus der Fahrpedalstellung abgeleitet wird, wird zusammen mit anderen Momentenanforderungen koordiniert und letztendlich, im einfachsten Fall, in eine Soll-Füllung, Zündwinkel und Kraftstoffmenge umgerechnet. Die Aktorik am Verbrennungsmotor, z. B. Drosselklappe, Zündung und Injektoren, werden entsprechend angesteuert.

2 Darstellung der leistungsgeführten Motorsteuerung

2.1 Vorbetrachtung zur leistungsgeführten Motorsteuerung

Die Eingangswerte der leistungsgeführten Motorsteuerung sind relative mechanische und thermische Leistungsanforderungen. Wenn nur eine Anforderung gegeben wird, muss definiert

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

sein, unter welchen Randbedingungen die andere Leistungsanforderung beantwortet werden soll. Sind beide Anforderungen bekannt, ist das Verhältnis von thermischer zu mechanischer Leistung und somit der effektive Wirkungsgrad definiert. Wenn der gewünschte Wirkungsgrad nicht im Betriebskennfeld bei optimalem Wirkungsgrad beantwortet werden kann, muss der effektive Wirkungsgrad entsprechend gestellt werden.

Der effektive Wirkungsgrad kann bei Ottomotoren mit dem Zündwinkel beeinflusst werden. Bei drehmomentgeführten Motorsteuerungen wird die Zündwinkelwirkungsgradkennline genutzt, um den Zündwinkel bei gegebenem Wirkungsgrad zu bestimmen. Da sich Leistung linear aus Drehmoment und Drehzahl ergibt, kann die Zündwinkelwirkungsgradkennlinie auch für Leistungsberechnungen verwendet werden.

$$M_e = M_{opt} \cdot \eta_{ZW} \tag{1}$$

$$P_e = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_{opt} \cdot \eta_{ZW} \tag{2}$$

Grenzen der Zündwinkelverstellung sind durch Verbrennungsstabilität und thermische Belastbarkeit bestimmt. [4] [6]

2.1.1 Definition der Betriebsarten

Für Verbrennungsmotoren, die in einem stationären Betriebspunkt betrieben werden, kann folgende Energiebilanz aufgestellt werden:

$$\dot{Q}_{Kr} = \dot{m}_{Kr} \cdot H_u = P_e + \dot{H}_w \tag{3}$$

$$\dot{H}_w = \dot{H}_{Abg} + \dot{Q}_{KW} + \dot{Q}_{Um} \tag{4}$$

Der Kraftstoffmassenstrom, der dem Motor zugeführt wird, wird mit Luft verbrannt und in mechanische Leistung, Abgasenthalpie, dem Kühlmittelwärmestrom und einem Wärmestrom umgesetzt, der direkt in die Umgebung abgegeben wird. Letzterer ist zu Wärmestrahlung, -leitung, und Konvektion differenzierbar. Es wird angenommen, dass der gesamte Enthalpiestrom, der neben der mechanischen Leistung entsteht, nutzbar ist. Entsprechend wird dieser im Weiteren als thermische Leistung bezeichnet.

$$\dot{Q}_{Kr} = \dot{m}_{Kr} \cdot H_u = P_e + \dot{H}_w = P_e + P_{th} \tag{5}$$

In Abbildung 3 sind die Betriebsbereiche der leistungsgeführten Motorsteuerung dargestellt. Die relative mechanische Leistung ist über der thermischen Leistung aufgetragen. Beide Größen sind mit der maximalen Systemleistung, welche durch den maximal umsetzbaren Kraftstoffmassenstrom definiert ist, normiert.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

$$\frac{P_{th,max} + P_{e,max}}{\dot{Q}_{Kr,max}} = 1 \quad (6)$$

$$P_{th,rel} = \frac{P_{th}}{\dot{Q}_{Kr}} \quad (7)$$

$$P_{e,rel} = \frac{P_e}{\dot{Q}_{Kr}} \quad (8)$$

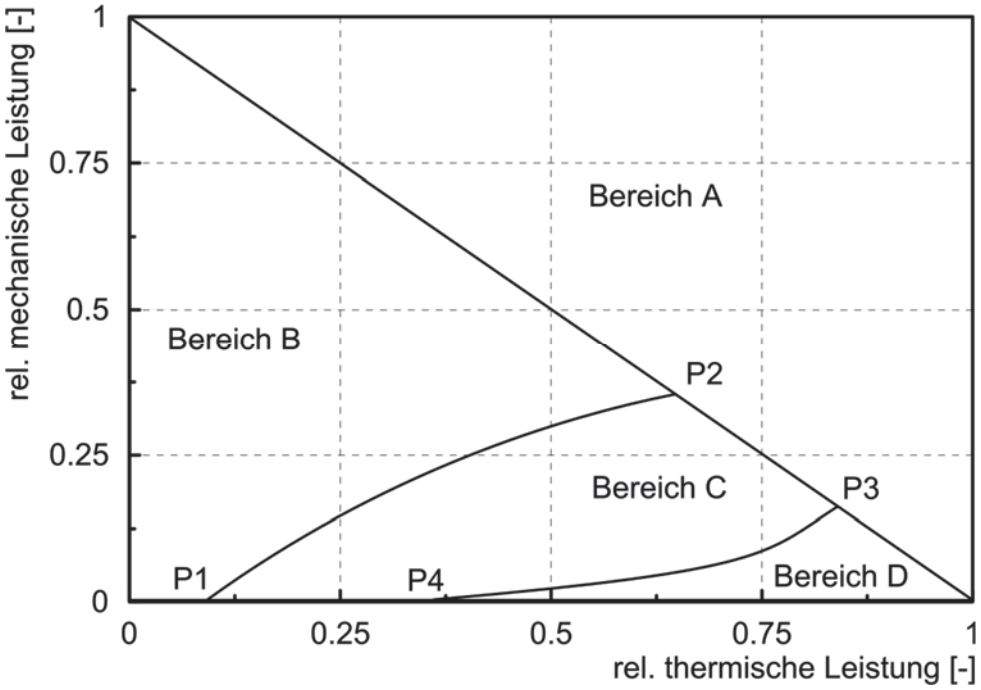

Abbildung 3: Betriebsbereiche der leistungsgeführten Motorsteuerung

Der Betriebsbereich C ist durch Bereiche begrenzt, welche nicht anfahrbar sind. Die Grenze (P1;P2) ist durch den maximal erreichbaren effektiven Wirkungsgrad bestimmt, der bei gegebener thermischer bzw. mechanischer Leistung erzielbar ist. Der Betriebsbereich C kann an der Grenze (P1;P2) durch wirkungsgradoptimierende Maßnahmen am Verbrennungsmotor oder durch Waste-Energy-Recovery Maßnahmen erweitert werden. Luft- und Kraftstoffmassenstrom sind direkt mit dem Kraftstoff-Luftverhältnis verknüpft.

P1 entspricht einem Betriebspunkt ohne mechanische Leistungsabgabe. Die Reibleistung des Motors entspricht hier der indizierten Leistung. P1 ist ein Leerlaufpunkt bei kleinstmöglichem Luftmassenstrom.

In Punkt P2 wird die mechanische Nennleistung erreicht. Der Luftmassenstrom ist auf der Grenze (P2;P3) maximal. Da die maximale Luftfüllung nur in geringem Maße von der Verbrennung beeinflusst wird, kann die Grenze (P2;P3) annähernd linear dargestellt werden.

Im Punkt P3 entspricht die thermische Belastung den maximal tolerierbaren Parametern. Entsprechend ist die Grenze (P4;P3) durch thermische Belastung und Verbrennungsstabilität definiert. Der Bereich D kann durch Stabilisierung des Brennverfahrens und durch eine höhere

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

thermische Belastbarkeit verkleinert werden. Dies kann z. B. durch die Auswahl von thermisch resistenteren Werkstoffen umgesetzt werden.

P4 stellt den Betriebspunkt mit höchster thermischer Leistung dar, bei dem keine mechanische Leistung produziert wird.

Die Linien konstanten effektiven Wirkungsgrades, gestrichelt dargestellt in Abbildung 4, verlaufen linear durch den Ursprung. Der effektive Wirkungsgrad ist durch Formel 9 gegeben.

$$\eta_e = \frac{P_{e,rel}}{P_{e,rel} + P_{th,rel}} \tag{9}$$

Da die Summe von relativer mechanischer und relativer thermischer Leistung auf der Verlängerung der Geraden von (P2;P3) den Wert eins beträgt, entspricht hier die relative mechanische Leistung dem effektivem Wirkungsgrad. Der höchste effektive Wirkungsgrad des Systems liegt in dem Punkt, an dem eine Gerade maximalen Wirkungsgrads die Grenze (P1;P2) tangiert.

Die durchgezogene graue Gerade in Abbildung 4 tangiert die Grenze (P1;P2) in einem Punkt bei ca. 22 % mechanischer und 36 % thermischer Leistung. Der maximale effektive Wirkungsgrad beträgt 38 %.

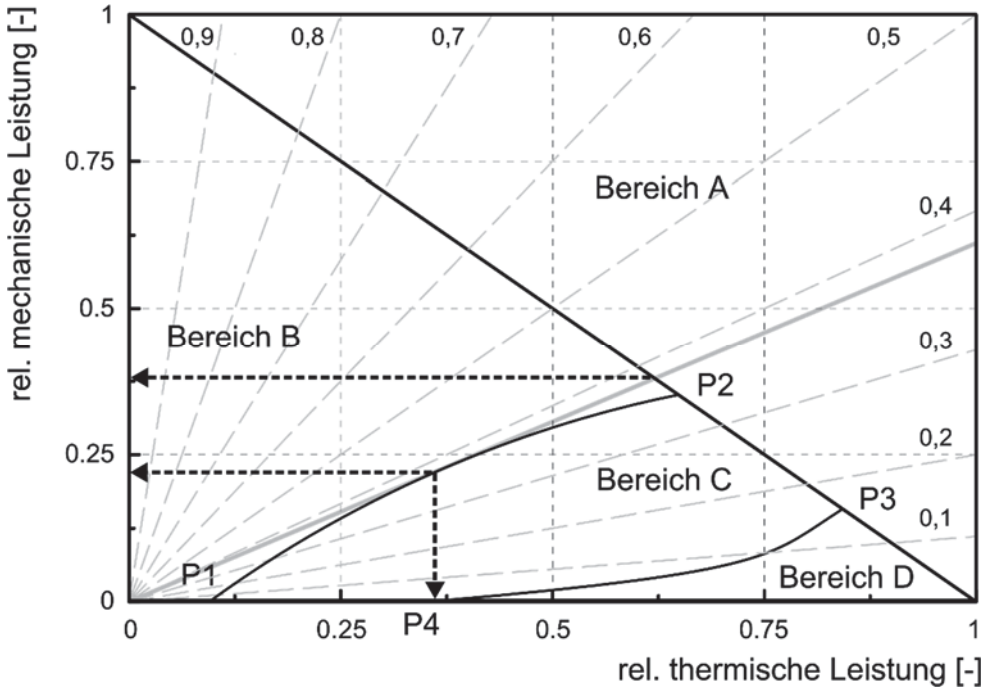

Abbildung 4: Linien konstanten Wirkungsgrades im Leistungsstrukturdiagramm

Die Betriebsmodi der leistungsgeführten Motorsteuerung sind in Tabelle 1 dargestellt.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Tabelle 1: Betriebsmodi der leistungsgeführten Motorsteuerung

Nr.	Anforderung	Randbedingung	Betriebsbereich
1	Mechanisch	Thermisches Minimum	Betrieb auf (P1;P2)
2	Mechanisch	Thermisches Maximum	Betrieb auf (P3;P2)
3	Thermisch	Mechanisches Minimum	Betrieb auf (P1;P4;P3)
4	Thermisch	Mechanisches Maximum	Betrieb auf (P1;P2;P3)
5	Mech. & therm.	Priorität Mechanisch	Betrieb in Bereich C
6	Mech. & therm.	Priorität Thermisch	Betrieb in Bereich C

Betriebsmodus 1 beantwortet eine mechanische Anforderung unter der Randbedingung einer minimalen thermischen Leistungsabgabe. Dies wird erreicht, indem der Verbrennungsmotor mit optimalem effektivem Wirkungsgrad bei definierter mechanischer Leistung betrieben wird. Gewöhnlich existiert für jede mechanische Leistungsanforderung ein Betriebspunkt, der dieses Kriterium erfüllt. In Abbildung 5 ist ein Wirkungsgradkennfeld mit Betriebskennlinie für Modus 1 dargestellt.

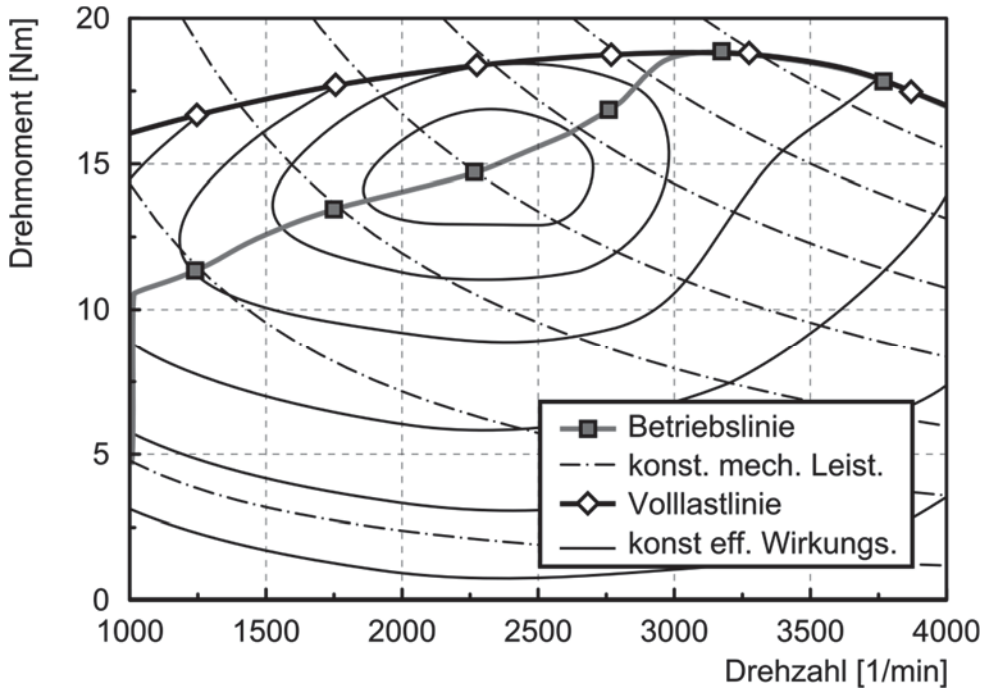

Abbildung 5: Betriebsmodus 1 der leistungsgeführten Motorsteuerung

Betriebsmodus 2 beantwortet eine mechanische Leistungsanforderung unter der Randbedingung einer maximalen thermischen Leistungsabgabe. Um eine höhere thermische Leistungsabgabe als in Punkt 2 darzustellen, muss der effektive Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors gestellt werden. Der erforderliche Wirkungsgrad kann durch die Systemgesamtleistung und mit der gewünschten thermischen Leistung berechnet werden.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

$$\eta_W = 1 - \frac{P_{therm}}{P_{Ges}} \tag{10}$$

Um den notwendigen Zündwinkel zu bestimmen, wird der erforderliche Zündwinkelwirkungsgrad bestimmt.

$$\eta_{ZW} = \frac{\eta_W}{\eta_e} \tag{11}$$

Mit der Zündwinkelwirkungsgradkennlinie kann die Zündwinkeldifferenz zum Zündwinkel bei maximalem Wirkungsgrad und somit auch der absolute Zündwinkel bestimmt werden.

$$\Delta ZW = f(\eta_{ZW}) \tag{12}$$

$$ZW_W = ZW_{opt} + \Delta ZW \tag{13}$$

Die maximale thermische Leistung wird in P3 erreicht. Eine weitere Spätverstellung des Zündwinkels ist nicht möglich, da die thermische Belastung des Verbrennungsmotors in P3 die tolerierbaren Werte erreicht hat. Ist die mechanische Leistungsanforderung größer als in P3, wird der Betriebspunkt zurück Richtung P2 verschoben. Eine höhere mechanische Leistungsabgabe als in P2 ist nicht erreichbar.

In Betriebsmodus 3 wird eine thermische Leistungsanforderung unter der Randbedingung minimaler mechanischer Leistungsabgabe beantwortet. Auf der Betriebskennlinie zwischen P1 und P4 wird keine mechanische Leistung erzeugt. Auf der Betriebslinie von P4 zu P3 muss mechanische Leistung erzeugt werden, da entweder die Verbrennungsstabilität nicht gegeben ist oder die thermische Belastung zu hoch wird.

Betriebsmodus 4 entspricht bezüglich der Regelung Betriebsmodus 1 mit der Erweiterung um die Betriebslinie (P2;P3), da eine Absenkung des effektiven Wirkungsgrades zur Erhöhung der thermischen Leistung gewünscht wird.

In Betriebsmodus 5 wird sowohl eine thermische, als auch eine mechanische Anforderung gegeben, wobei die mechanische Anforderung Priorität hat. Wie in Abbildung 6 dargestellt, kann bei gegebener mechanischer Anforderung die thermische Anforderung nur noch in einem eingeschränkten Bereich beantwortet werden. Bei gegebener thermischer und mechanischer Anforderung ist sowohl der Wirkungsgrad bekannt, als auch der Luftmassenstrom des Motors.

$$\eta_e = \frac{P_e}{P_{th} + P_e} \tag{14}$$

$$\dot{m}_L = \left(\frac{P_e + P_{th}}{H_u}\right) \cdot L_{St} \tag{15}$$

Allein durch Wirkungsgrad und Luftmassenstrom ist der Betriebspunkt des Motors nicht vollständig definiert. Im Betriebskennfeld des Motors bei Optimalzündwinkel sind Schnittpunkte der Linien des konstanten Luftmassenstroms und des Wirkungsgrads identifizierbar. Durch eine Zündwinkelverstellung kann der Wirkungsgrad bei nahezu konstanter Füllung durch Variation des Zündwinkels gestellt werden. Dies bedeutet, dass eine Betriebslinie die Anforderung nach mechanischer und thermischer Leistung erfüllen kann. Die Lösungsmenge entspricht einer Kurve in einem dreidimensionalem Raum, dessen Dimensionen durch Drehzahl, Füllung und Zündwinkelverstellung beschrieben werden. Bezogen auf den Zündwinkel wird die Linie durch den Optimalzündwinkel und den

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

spätmöglichsten Zündwinkel begrenzt. Welcher Betriebspunkt letztendlich gewählt wird, hängt von der gewünschten Betriebsstrategie ab. Es ist möglich, die identischen Anforderungen bei niedriger Drehzahl und hoher Last bei spätem Zündwinkel oder bei höherer Drehzahl, niedriger Last und früherem Zündwinkel zu beantworten.

Eine alternative Betriebsstrategie, die mit einem eingeschränkten Lösungsraum arbeitet, kann mit der Randbedingung der bekannten Füllung vorsehen, den Betriebspunkt zu wählen, der dem gewünschten Wirkungsgrad am nächsten kommt. Sollte der Punkt nicht im Betriebskennfeld bei Optimalzündwinkel liegen, wird der Punkt mit der kleinsten Wirkungsgradabweichung angefahren und an diesem Punkt die Berechnung analog zu Betriebsmodus 2 durchgeführt.

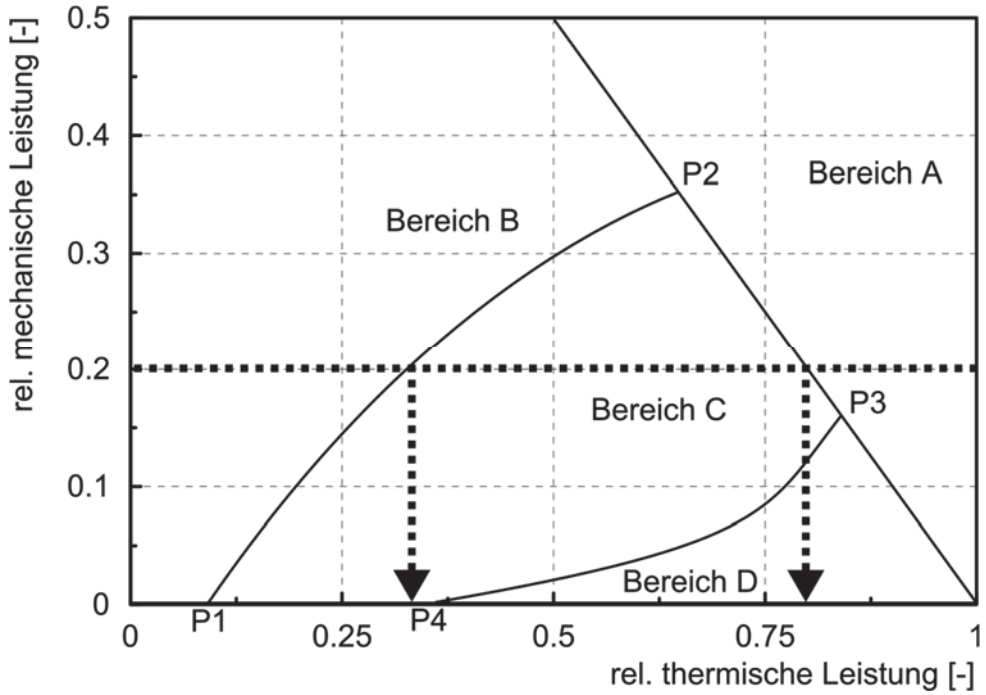

Abbildung 6: Betriebsmodus 5 der leistungsgeführten Motorsteuerung

In Betriebsmodus 6 wird, analog zu Betriebsmodus 5, eine thermische und eine mechanische Anforderung gegeben, wobei die Priorisierung auf der thermischen Anforderung liegt. Durch die fixe thermische Anforderung ist der Bereich, in dem die mechanische Anforderung beantwortet werden kann, ebenfalls eingeschränkt (siehe Abbildung 7). Die Bestimmung des Betriebspunktes des Motors erfolgt analog zu Betriebsmodus 5.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

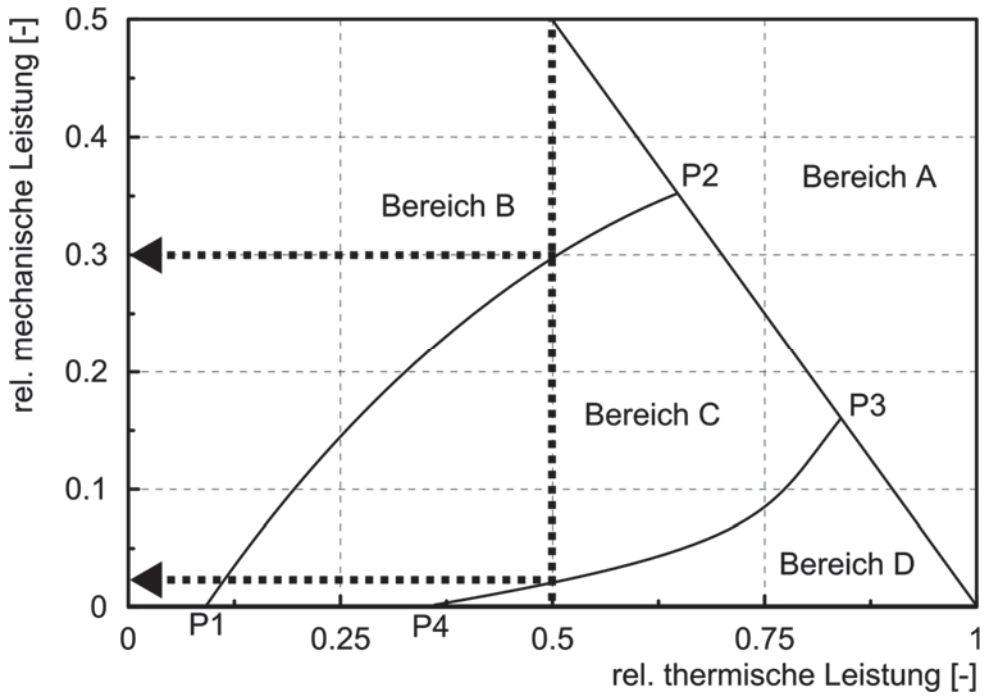

Abbildung 7: Betriebsmodus 6 der leistungsgeführten Motorsteuerung

3 Funktionsentwicklung und Parametrierung der Leistungsstruktur

Die Eingangsvariablen der leistungsgeführten Motorsteuerung sind mechanische und thermische Leistungsanforderungen, sowie der gewünschte Betriebsmodus. Die Leistungsstruktur verarbeitet die Anforderungen und bestimmt den Betriebspunkt. Die Funktionsentwicklung und Ergebnisse der Parametrierung der Leistungsstruktur werden anhand des Versuchsmotors im Folgenden dargestellt.

Die Ausgangswerte der Leistungskoordinationsfunktion sind Solldrehzahl, -luftmasse und -zündwinkel. Die Integration der Leistungsstruktur in Bezug auf die Basisfunktionen ist vereinfacht in Abbildung 8 dargestellt.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

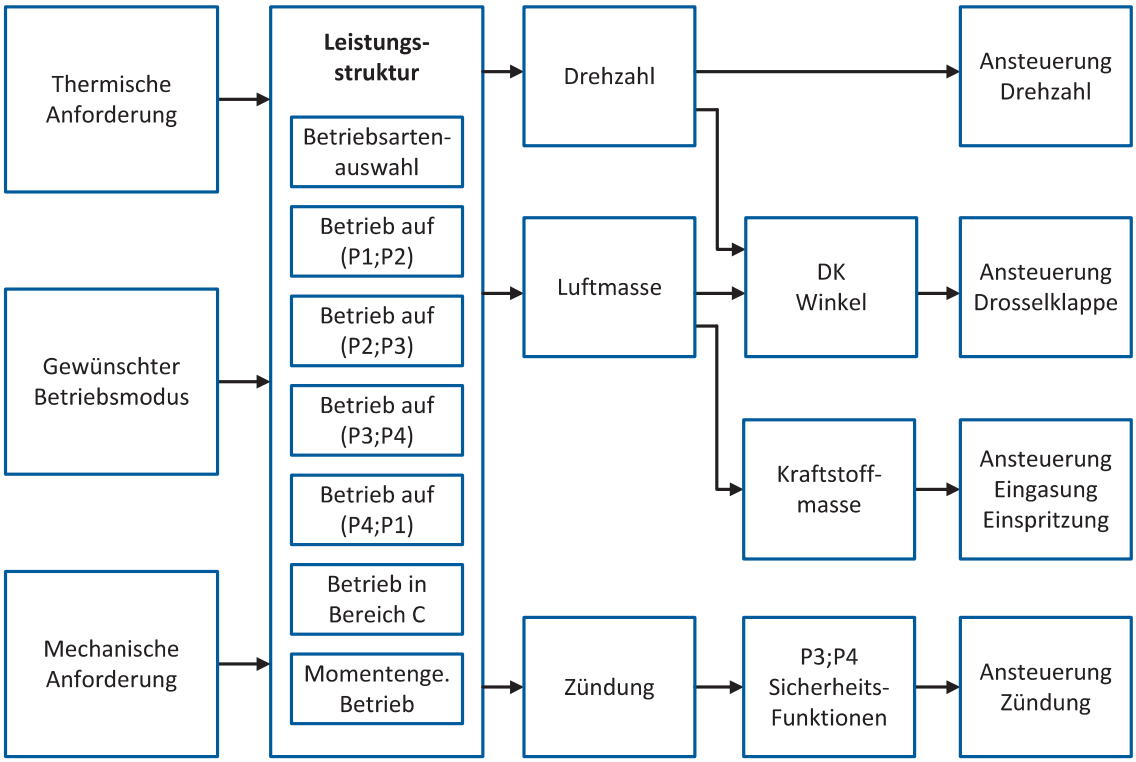

Abbildung 8: Integration der Leistungsstruktur

Die Solldrehzahl wird von der Prüfstandssteuerung umgesetzt. Aus Luftmassenstrom und aktueller Drehzahl wird der Solldrosselklappenwinkel berechnet. Mit dem Luftmassenstrom und dem gewünschten Kraftstoff/Luftverhältnis wird der Kraftstoffmassenstrom ermittelt und der entsprechende Aktuator angesteuert.

Der Zündwinkel wird von (P3;P4) Sicherheitsfunktionen kontrolliert. Hierbei wird die thermische Belastung überwacht. Sollten die Grenzwerte überschritten werden, kann die Grenzlinie (P3;P4) Richtung Bereich C verschoben werden.

Die Schnittstellen zwischen Leistungsstruktur und den weiteren Funktionen der Motorsteuerung sind folgende Parameter:

- Drehzahl
- Gewünschte Luftmasse pro Arbeitsspiel
- Differenz zum Optimalzündwinkel

In der Leistungsstruktur wird zwischen verschiedenen Betriebsmodi unterschieden. Alle Betriebsmodi lassen sich durch einen Betrieb auf einer der Grenzen des Betriebsbereiches C oder innerhalb dessen beschreiben.

Entsprechend des gewünschten Betriebsmodus und der angeforderten thermischen und mechanischen Leistung wird ermittelt, ob sich der Betriebspunkt auf einer Grenze oder innerhalb des Betriebsbereiches C befindet und die entsprechenden Unterfunktionen werden aktiviert.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

3.1 Bespielhafte Betriebpunkte auf der Grenze (P1;P2)

Wenn die Betriebsparameter des Motors mit der Momentenstruktur bestimmt werden, wird immer ein wirkungsgradoptimaler Zündwinkel gewählt. Dieser ist durch das gewünschte indizierte Moment bei einer vorgegebenen Drehzahl definiert.

Bei einem mechanischen Leistungswunsch muss die Drehzahl bestimmt werden, bei der die Leistungsanforderung mit höchstem Wirkungsgrad beantwortet werden kann.

Wie beschrieben, werden Gitter erzeugt, welche über der Drehzahl und der Luftmasse pro Arbeitsspiel aufgespannt sind. Die abhängige Variable wird auf diese Gitter bezogen. Für die Bestimmung der Grenze (P1;P2), mit den entsprechenden Betriebsparametern, wird dieses Verfahren für die mechanische Leistung und den Wirkungsgrad durchgeführt. Die in der Auswertung einbezogenen Betriebspunkte weisen, bezogen auf die jeweilige Drehzahl und Füllung, den maximalen effektiven Wirkungsgrad auf.

Für jede mechanische Wunschleistung wird der Betriebspunkt mit höchstem Wirkungsgrad gesucht. Da nur ein Schnittpunkt der Linie konstanter Leistung mit dem maximalen effektiven Wirkungsgrad existiert, ist die Lösung eindeutig. Das Wunschdrehmoment ergibt sich aus Wunschleistung und der entsprechenden Drehzahl. Ausschließlich die Drehzahl muss anhand einer Kennlinie definiert werden:

$$n_{eta,opt} = kl_{eta,opt}(P_{e,rel,w}) \tag{16}$$

In Abbildung 9 ist das Ergebnis dargestellt. Bis zu einer mechanischen Leistungsanforderung von 0,125 wird der Motor mit der Minimaldrehzahl betrieben. Ab 0,125 steigt die Drehzahl annäherungsweise linear an und der Motor wird entdrosselt betrieben, weil die maximalen Wirkungsgrade auf der Volllastlinie liegen.

Da für jeden berechneten Punkt optimalen Wirkungsgrads die effektive Leistung und der effektive Wirkungsgrad bekannt sind, kann die relative thermische Leistung, sowie die relative mechanische Leistung berechnet werden.

$$P_{e,rel} = \frac{P_e}{P_{Sys,max}} \tag{17}$$

$$P_{th,rel} = \left(\frac{P_e}{\eta_{max}(P_e)}\right) - P_e \tag{18}$$

Das Ergebnis lässt sich im Leistungsstrukturdiagramm, siehe Abbildung 10, darstellen. Der maximale effektive Wirkungsgrad beträgt 0,326 und wird im Punkt der mechanischen Nennleistung erreicht. In grau ist die Gerade konstanten Wirkungsgrades dargestellt, welche diesen Punkt tangiert. Der niedrigste effektive Wirkungsgrad bei optimaler Zündung beträgt 0,230.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

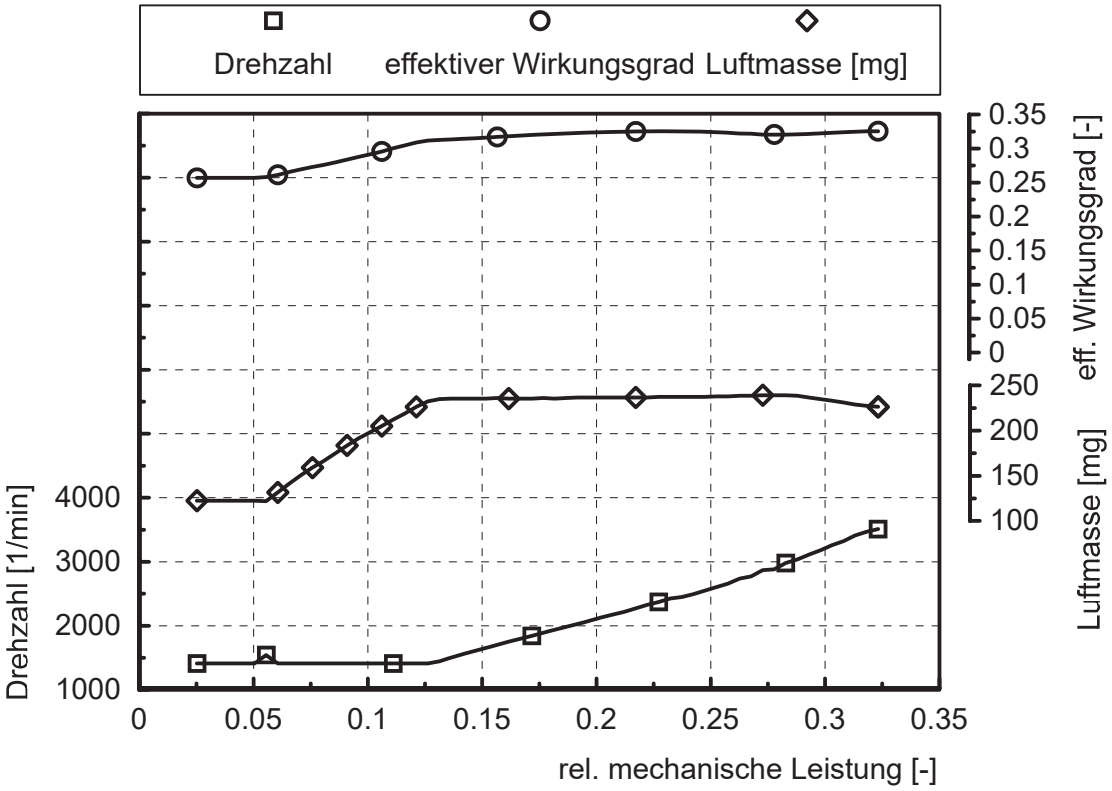

Abbildung 9: Wirkungsgrade und Drehzahlen an der Betriebsgrenze (P1;P2)

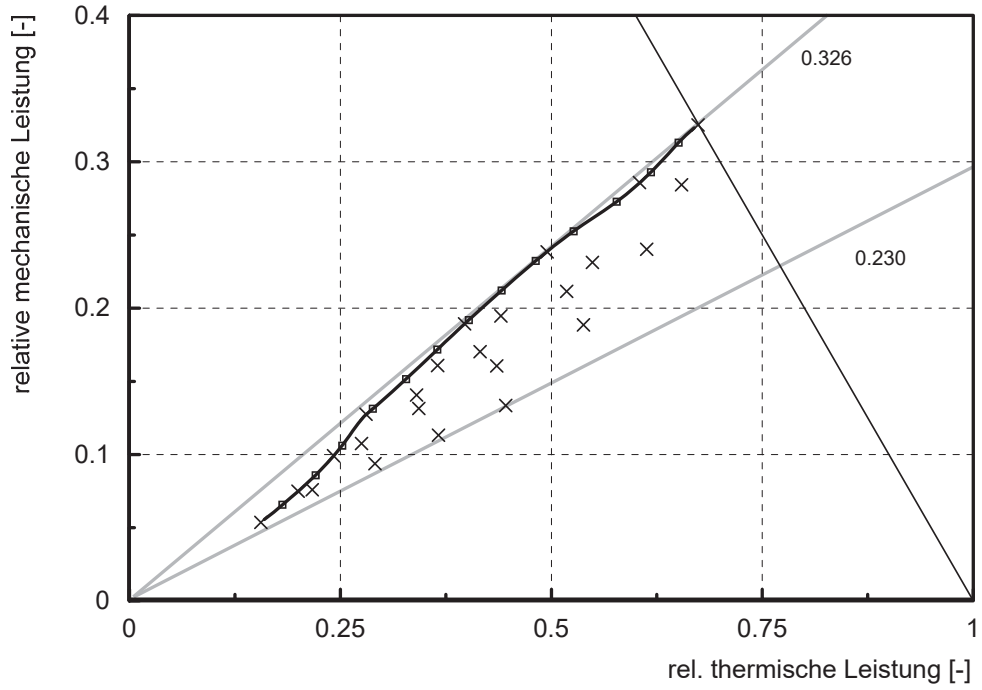

Abbildung 10: Grenze (P1;P2) im Leistungsstrukturdiagramm

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

3.1.1 Darstellung des Betriebskennfelds der Leistungsstruktur

Mit den berechneten Grenzen kann das Leistungsstrukturdiagramm dargestellt werden. Im Vergleich mit dem schematischen Diagramm, ist die Lage von Punkt P1 und P4 abweichend. Dies resultiert aus den nicht anfahrbaren Betriebspunkten mit geringer Last, da der Gemischbildner nicht mit ausreichender Auflösung dosieren kann. Ein Punkt ohne effektive mechanische Leistungsabgabe ist nicht anfahrbar. Der lineare Verlauf von P1 zu P4 ist in der Zündwinkelverstellung ausgehend von P1 begründet. Analog zur Grenze (P2;P3) bleiben Luft- und Kraftstoffmassenstrom nahezu konstant. In Tabelle 2 sind die Betriebspunkte mit motorischen Parametern aufgeführt. Da die Zündwinkelwirkungsgradkennlinie näherungsweise für das gesamte Betriebskennfeld gilt, verlaufen die Grenzen (P1;P4) und (P2;P3) parallel.

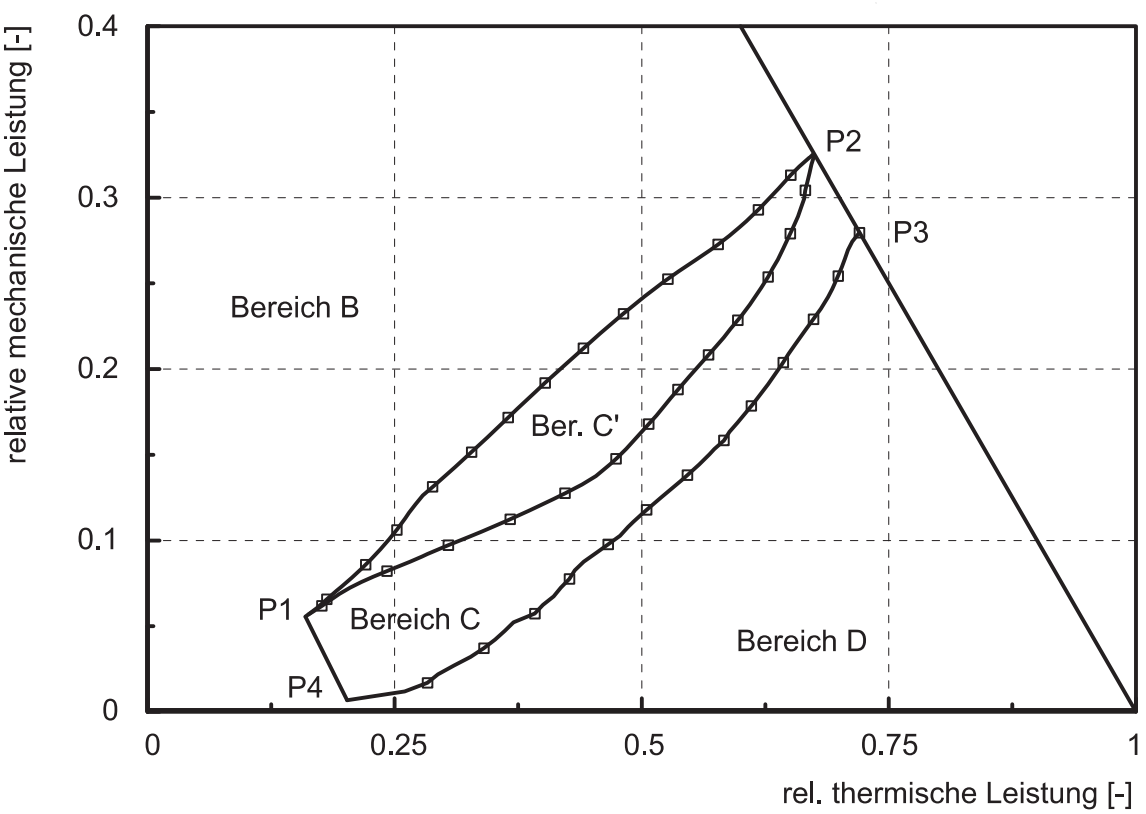

Abbildung 11: Leistungsstrukturdiagramm des Forschungsmotors

Tabelle 2: Messdaten der Betriebspunkte P1 – P4

Betriebspunkt		P1	P2	P3	P4
Drehzahl	[1/min]	1400	3600	3599	1398
Luftmasse	[mg]	117	222	222	118
Effektives Drehmoment	[Nm]	7,24	17,08	14,82	0,14
Effektiver Wirkungsgrad	[-]	0,256	0,326	0,282	0,005
Differenz zum Optimalzündwinkel	[°KW]	0	0	13	34

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

4 Zusammenfassung

KWK-Anlagen ermöglichen bei Betrachtung im Kontext von Power-To-Gas Konzepten eine zeitgleiche Rückverstromung und eine sektorübergreifende Erzeugung von Wärme aus dem regenerativ erzeugten Brenngas. Die Steuerung und Regelung von Verbrennungsmotoren, bei Einsatz in KWK-Anlagen, hat den Stand der Technik, der in der Automobilbranche üblich ist, noch nicht erreicht. Häufig werden die Motoren stationär in einem Betriebspunkt, ohne Anpassung des Brennverfahrens betrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine leistungsgeführte Motorsteuerung dargestellt. Mechanische und thermische Leistungsanforderungen können in einem variablen Verhältnis beantwortet werden. Bei Vorgabe einer thermischen oder mechanischen Leistungsanforderung ist eine Maximierung oder eine Minimierung der jeweils anderen Leistungsabgabe möglich. Zur Darstellung der Betriebsmodi wurde das Leistungsstrukturdiagramm eingeführt. In diesem ist die mechanische Leistung über der thermischen Leistung aufgetragen. Es wurden Betriebsstrategien zur Definition von Betriebspunkten des Verbrennungsmotors bei gegebenen Leistungsanforderungen aufgezeigt.

5 Literatur

[1] J. Michaelis, J. Junker und M. Wietschel, „Eine Bewertung der Regelenergievermarktung im Power-To-Gas-Konzept," Zeitschrift für Energiewirtschaft, Bd. 37, pp. 161-175, 2013.

[2] M. Zapf, Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem: Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten, Springer-Verlag, 2017.

[3] G. Müller-Syring, M. Henel, W. Köppel, H. Mlaker, M. Sterner und T. Höcher, „Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz," DVGW Deutscher Verein des Gas-und Wasserfaches eV, Bonn, 2013.

[4] Deutsche Energie-Agentur GmbH, Systemlösung Power to Gas. Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife., 2015.

[5] R. Basshuysen, Ottomotor mit Direkteinspritzung: Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial, Springer Vieweg, 2013.

[6] J. Steinmill und R. Struzyna, „Efficiency Optimization Using a Power-Guided Engine Control for Management of Thermal-and Mechanical Demands Using the Example of a Micro Combined Heat and Power Unit," SAE International Journal of Engines, Bd. 8, pp. 192-199, 2014.

[7] J. Gerhardt, H. Hönninger und H. Bischof, „A New Approach to Functional and Software Structure for Engine Management Systems - BOSCH ME7," 1998.