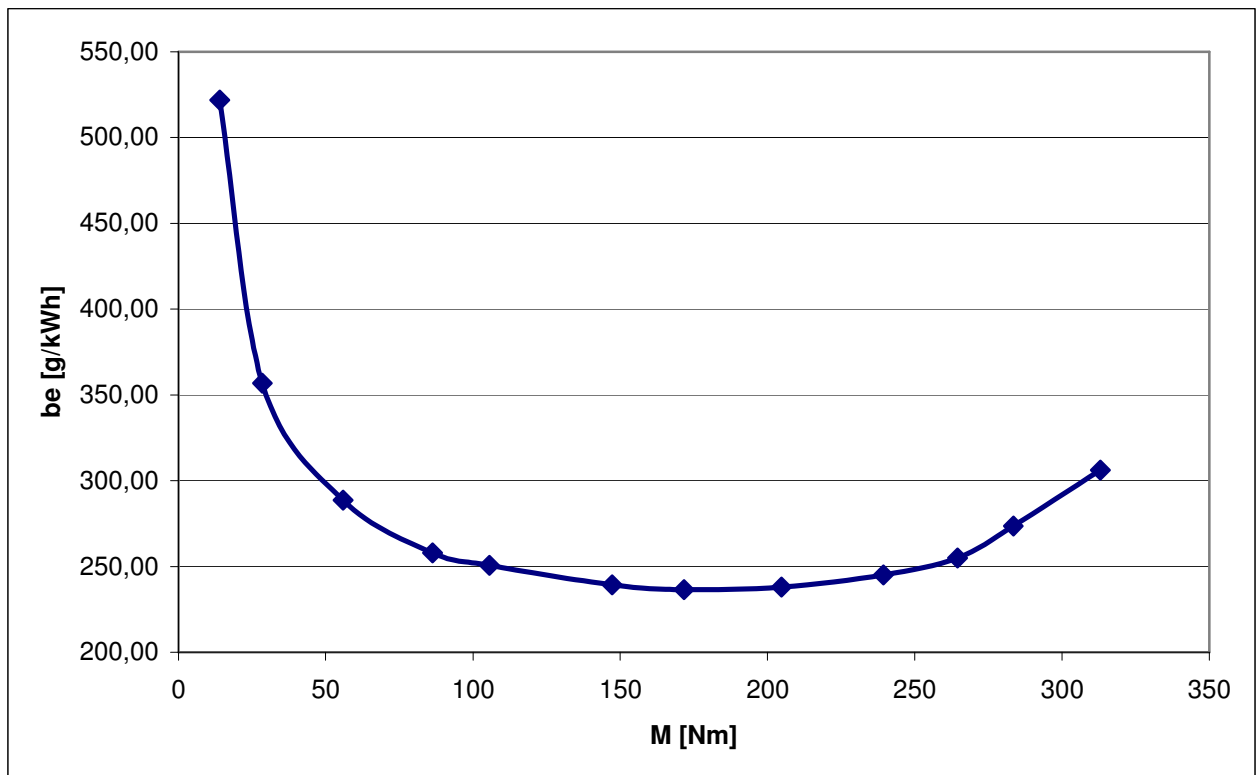


1. Lastschnitt bei 2000 min⁻¹

n_Ist 1/min	M_Ist Nm	T_3 °C	KV_Verb. kg/h	Lambda ---	ZZP °KW	ZZP Klopf- regelung °KW v. OT	P _e [kW]	b _e [g/kWh]	p _{me_ber.} [bar]
2000	14.0	532.5	1.53	1.01	31.9	0.0	2.93	521.85	0.98
2000	28.5	569.3	2.13	1.01	26.6	0.0	5.97	356.84	1.99
2000	55.9	613.2	3.38	1.01	30.8	0.0	11.71	288.70	3.90
2000	86.3	665.1	4.66	1.01	24.4	0.0	18.07	257.85	6.02
2000	105.5	686.3	5.54	1.01	22.5	0.0	22.09	250.75	7.37
2000	147.3	727.4	7.38	1.01	18.3	-0.2	30.85	239.24	10.28
2000	171.6	757.2	8.50	1.01	14.8	-2.0	35.94	236.53	11.98
2000	204.8	811.3	10.21	1.01	7.0	-7.7	42.89	238.06	14.30
2000	239.4	867.9	12.29	1.01	2.6	-7.1	50.13	245.14	16.71
2000	264.5	918.9	14.12	1.01	-0.7	-5.8	55.40	254.89	18.47
2000	283.5	941.0	16.24	0.96	-2.9	-6.1	59.37	273.54	19.79
2000	313.0	940.8	20.07	0.90	-5.1	-5.2	65.55	306.19	21.85

spezifischer Kraftstoffverbrauch



Bei sehr niedrigen Drehmomenten, das heißt im Teillastbereich, ist der spezifische Kraftstoffverbrauch sehr hoch. Dies ist mit dem geringeren mechanischen Wirkungsgrad und der höheren Ladungswechselarbeit im Teillastbereich zu erklären.

Des Weiteren ist die niedrige abgegebene Leistung im unteren Teillastbereich relevant.

Die Berechnung für b_e lautet:

$$b_e = \frac{B}{P_e}$$

Da der Motor auch schon bei einer abgegebenen niedrigen Leistung einen relativ hohen Kraftstoffverbrauch B hat, liegt b hier sehr hoch.

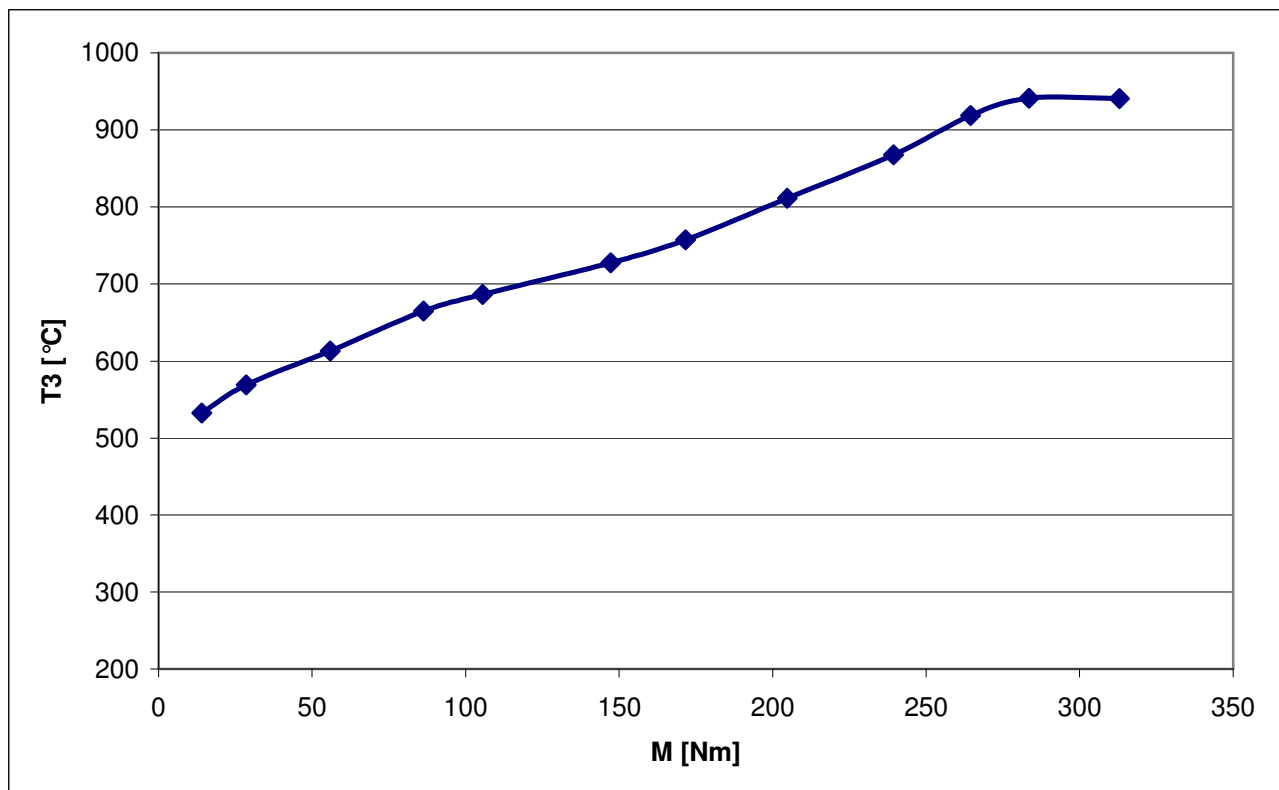
Der weitere Verlauf der Kennlinie bleibt nahezu waagrecht, da bei Erhöhung des Momentes bei konstanter Drehzahl sich die Leistung erhöht, damit sinkt entsprechend der oben angegebenen Formel der spez. Kraftstoffverbrauch.

Bei $P=3\text{kW}$ beträgt der Kraftstoffverbrauch rund $1,5\text{kg/h}$, das heißt Faktor 2.

Im mittleren Drehmomentbereich liegt das Minimum des spezifischen Kraftstoffverbrauchs. Es wird eine Leistung von $P=36\text{kW}$ bei einem Kraftstoffverbrauch rund $8,5\text{kg/h}$ erreicht, was einem Faktor von rund 4,2 entspricht.

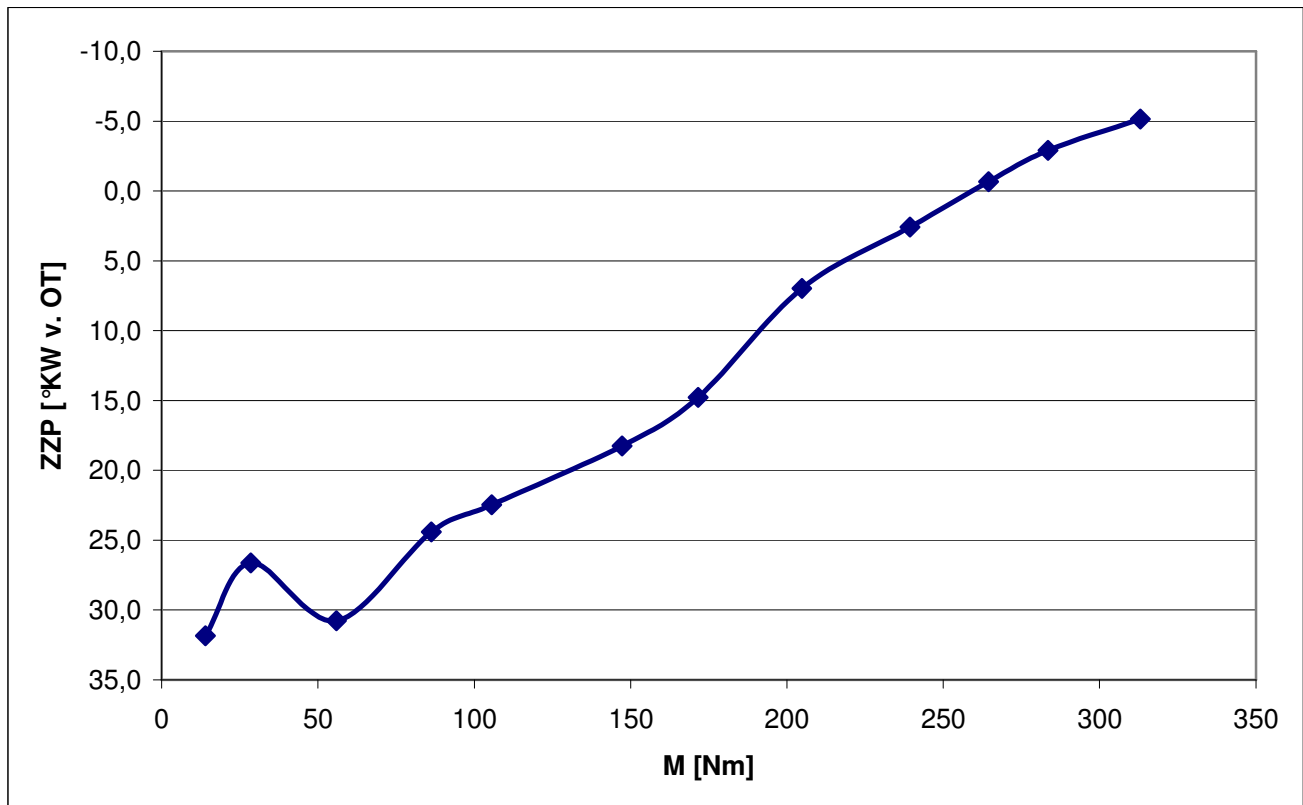
Bei weiter steigendem Drehmoment steigt auch der spezifische Kraftstoffverbrauch wieder an. Das resultiert aus der Annäherung an die Vollast. Hierbei wird das Gemisch angefettet ($0,9 < \lambda < 1,0$) wodurch der Kraftstoffanteil erhöht wird.

Abgastemperatur



Da die Drehzahl und das Hubvolumen konstant sind, muss zur Erhöhung des Drehmomentes der effektive Mitteldruck erhöht werden. Das wird durch eine längere Einspritzdauer erreicht. Es kommt zu einer vermehrten Einspritzung des Luft-Kraftstoff-Gemisches. Die umgesetzte Energie steigt, was eine stärkere Erwärmung des Abgases nach sich zieht. Der Abfall des Temperaturgradienten im Vollastbereich ist durch die vermehrte Kraftstoffkühlung zu erklären (siehe Lambda-Drehmoment-Diagramm).

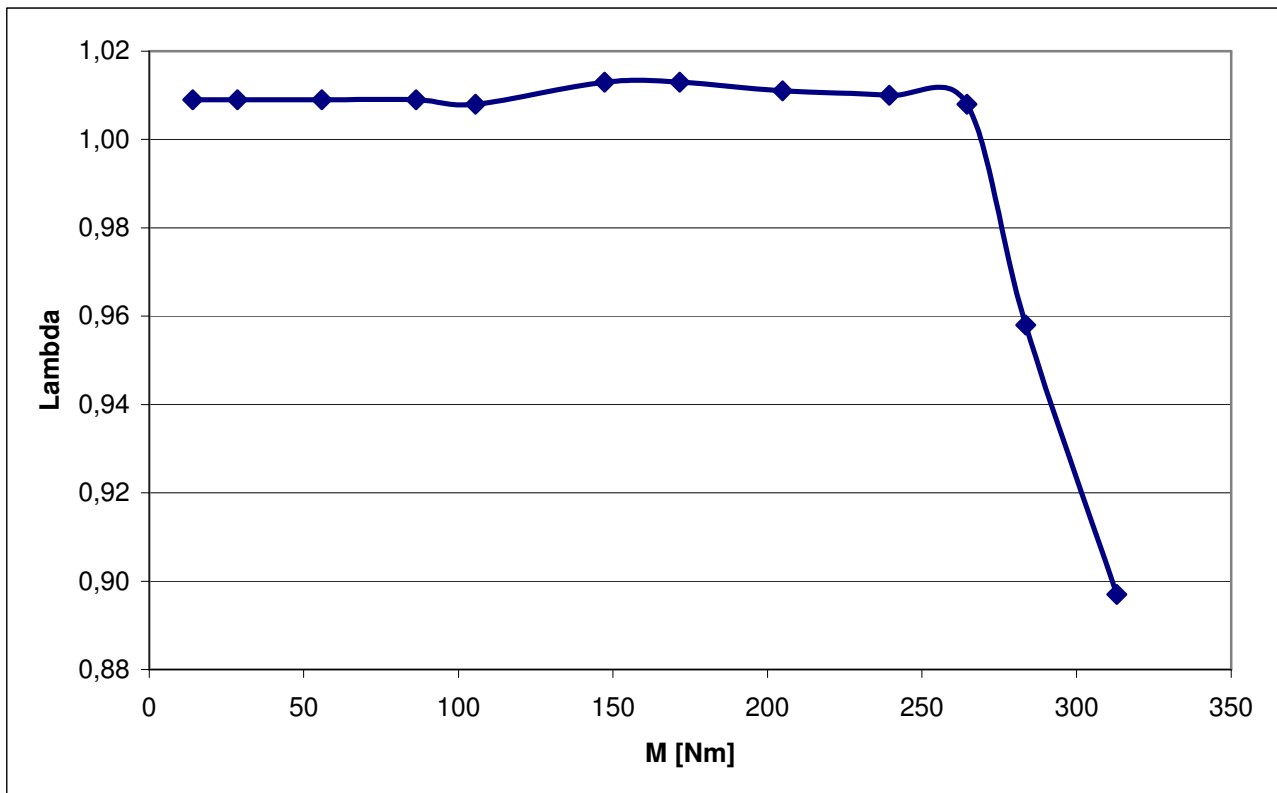
Zündzeitpunkt



Der frühere Zündzeitpunkt im Teillastbereich ist mit dem größeren Brennverzug D_f zu erklären. Die Brenngeschwindigkeit im Zylinder steigt mit der Temperatur und dem Druck an. Da im Teillastbereich ein geringerer Druck herrscht, ist eine frühere Zündung notwendig.

Um einen höheren effektiven Mitteldruck zu erreichen muss die Zündung nach Spät gestellt werden um die Klopfbarkeit zu gewährleisten. (Der zweite Messpunkt, welcher aus dem Verlauf der Kennlinie heraus fällt, ist auf einen Mess- oder Bedienungsfehler zurückzuführen.)

Lambda



Im Teillastbereich wird der Motor mit einem Luftverhältnis von $\lambda \approx 1,0$ betrieben. Hier liegt das Verbrauchsminimum.

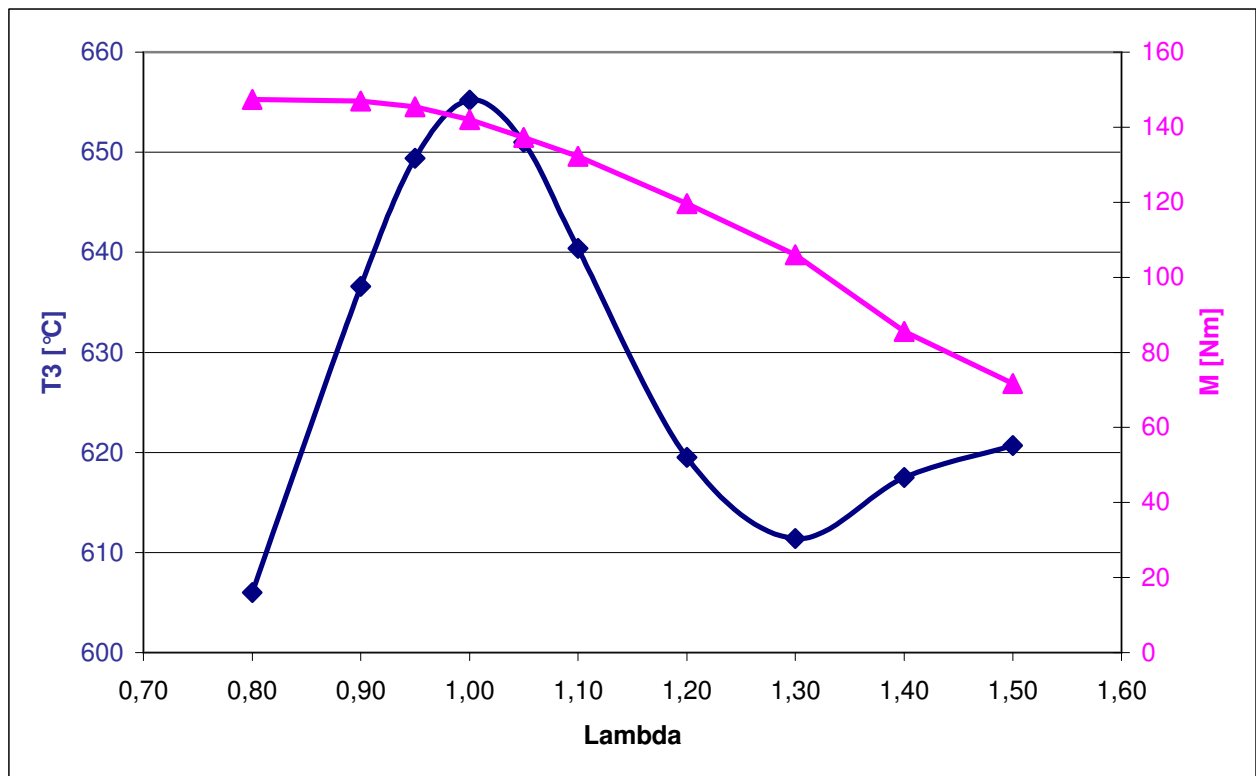
Zur Erhöhung des erreichbaren Drehmomentes wird im Allgemeinen das Lambda im Volllastbereich reduziert (d.h. es ist mehr Kraftstoff vorhanden). Gleichzeitig steigt aber die Temperatur im Zylinder. Auf Grund des mehr eingespritzten Kraftstoffes soll sichergestellt werden, dass bei voll geöffneter Drosselklappe tatsächlich genügend Kraftstoff eingespritzt wird. Des Weiteren kann dies zur effektiven Bauteilkühlung genutzt werden (Kraftstoffkühlung), da der nicht verbrannte Kraftstoff verdampft und dem Brennraum Wärme entzieht. Hierbei hat die Wärmekapazität des Kraftstoffes einen höheren Anteil an der Aufnahme von Energie als durch dessen Verdampfung.

Es handelt sich bei dem Versuchsmotor um einen hochaufgeladenen Motor, da der effektive Mitteldruck Werte bis zu 21,85 bar erreicht. Typische Bereiche sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Motortyp	p_{me} [bar]
Saugmotor	10 – 13
Aufgeladener Motor (Turbo)	13 – 17
Hochaufgeladener Motor	17 – 22

2. Lambdavariation

Drehmoment und Abgastemperatur



Drehmoment

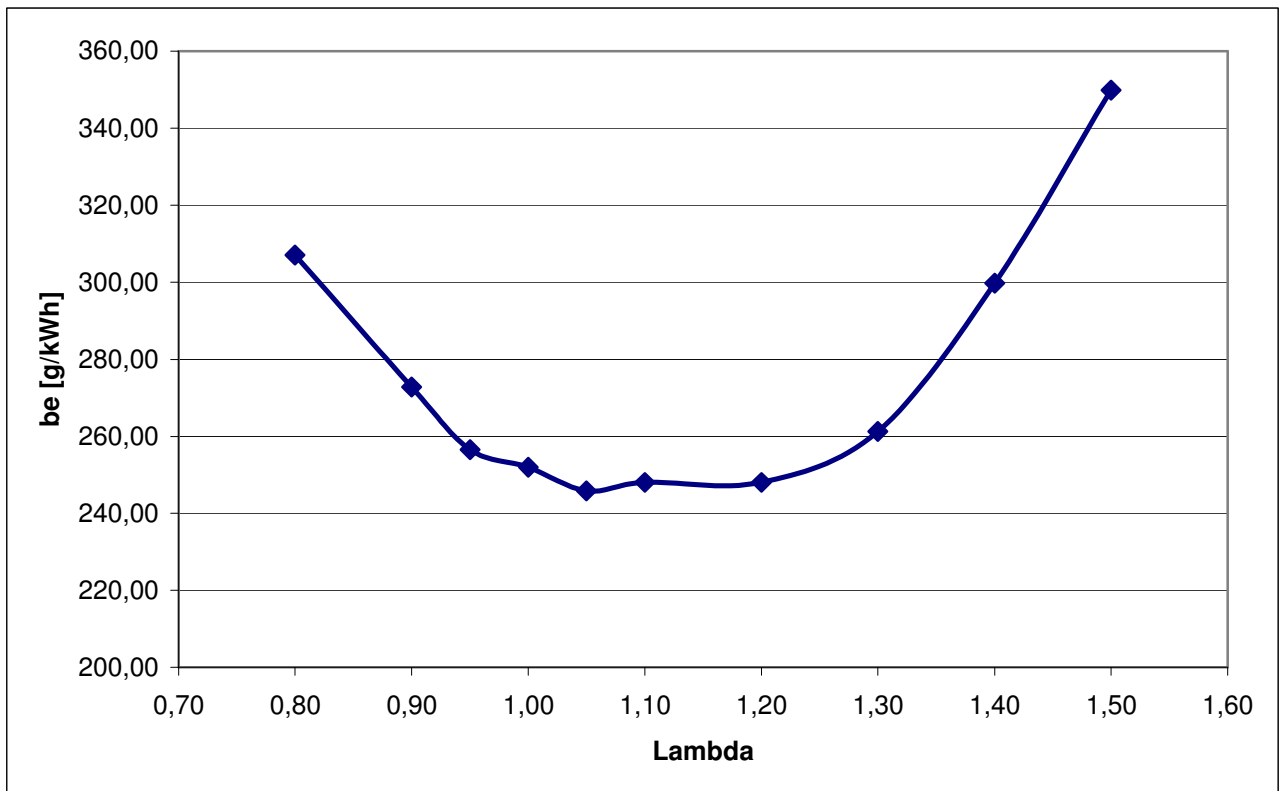
Das verbrauchsoptimale Verbrennungsluftgemisch liegt bei $\lambda \approx 1$. In diesem Punkt kommt es zu einer vollständigen Verbrennung des Benzin-Luft-Gemisches. Bei Werten kleiner eins (angefettetes Gemisch) ist überschüssiges Benzin vorhanden. Es kommt zu einer unvollständigen Verbrennung. Die Abgastemperatur sinkt, weil es durch den überschüssigen Kraftstoff gekühlt wird.

Für Werte über eins gilt ähnliches. Durch die unvollständige Verbrennung ist die Flamme kleiner. Durch den Luftüberschuss sind nicht alle Luftpartikel am Brennverlauf beteiligt und dadurch kommt es zu einer Luftkühlung und damit geringeren Abgastemperatur. Der Anstieg im höheren Lambda-Bereich ($\lambda > 1,3$) steigt die Abgastemperatur wieder an, da es hier zu einer verschleppten Verbrennung kommt. Zur Erhöhung des Drehmomentes wird das Lambda reduziert. Bei steigendem Lambda sinkt das Drehmoment, da immer weniger Kraftstoff für die Verbrennung, das heißt Drehmomenterzeugung, zur Verfügung steht.

Abgastemperatur

Das Maximum der Abgastemperatur liegt bei $\lambda = 1$. Bei $\lambda > 1$ fällt sie wieder ab, da zuviel Luft und zuwenig Kraftstoff vorhanden ist. Dieses Luft-Kraftstoff-Gemisch ist nicht ausreichend, um hohe Temperaturen zu erzeugen. Bei $\lambda < 1$ wird der zuviel eingespritzte Kraftstoff aufgrund des Luftmangels nicht genügend umgesetzt. Der überschüssige Kraftstoff wirkt hierbei kühlend.

spezifischer Kraftstoffverbrauch



Das Verbrauchsminimum liegt im Bereich $\lambda=1,05$. Im Bereich $\lambda < 1,05$ wird bei gleicher Ansaugluftmenge mehr Kraftstoff eingespritzt als maximal durch die Luftmenge bei der Verbrennung umsetzbar ist.

Zur Berechnung wird folgende Formel verwendet:

$$b_e = \frac{B}{P_e}$$

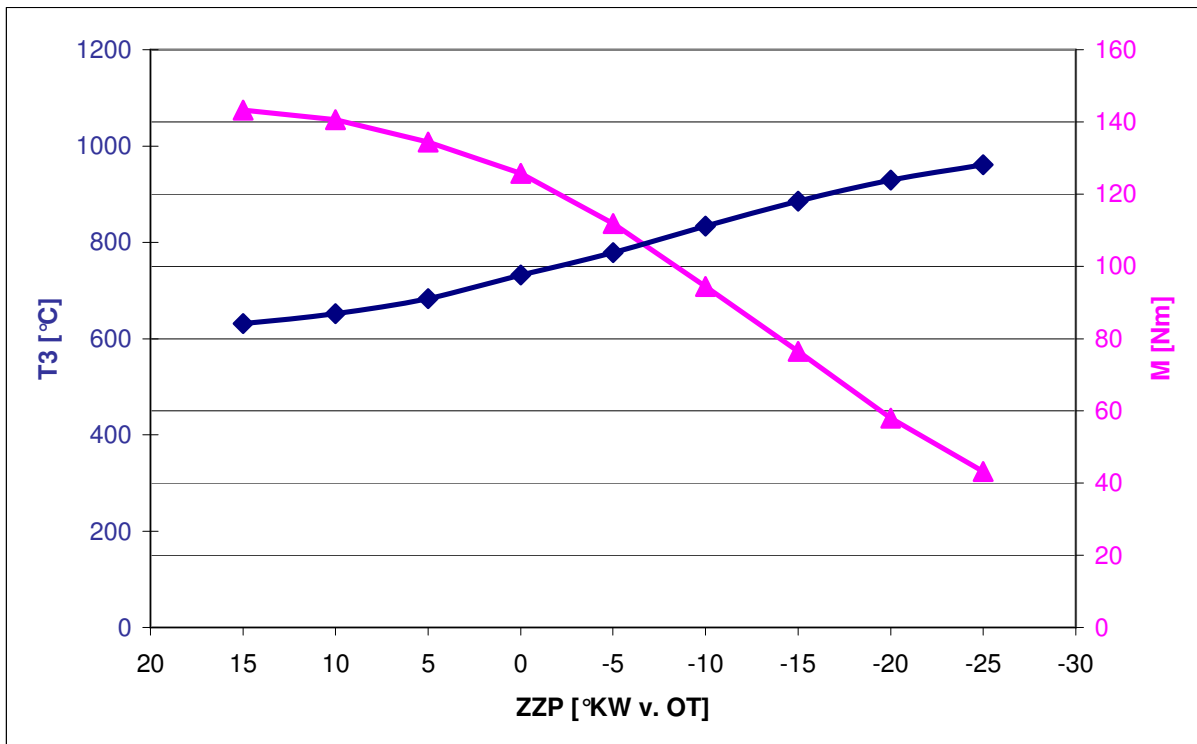
Es ist erkennbar, dass bei hohem B_e auch b_e steigt.

Im Bereich $\lambda > 1,05$ bleibt die angesaugte Luft gleich und es wird weniger Kraftstoff eingespritzt.

Gleichzeitig sinkt die abgegebene Leistung, wodurch ein deutlicher Anstieg von b_e beobachtet werden kann.

3. ZZP-Variation

Moment und Abgastemperatur



Moment Das Maximum des Momentes liegt bei 15°KW vor OT. Dieser Zündzeitpunkt markiert das Optimum für diesen Lastpunkt und die aufgenommenen Messwerte. Eine Verstellung des ZZP nach „spät“ hat ein Absinken des Momentes zur Folge, da der Verbrennungsschwerpunkt dann nicht mehr bei den anzustrebenden 7-8°KW nach OT liegt.

Abgastemperatur Die Abgastemperatur T_3 sinkt mit früherem ZZP. Bei Verschiebung des ZZP nach „spät“ wird die Verbrennung in Richtung Aö verschoben. Dadurch steigt auch die Abgastemperatur an, da das entzündete Luft-Kraftstoff-Gemisch weniger Zeit hat, seine Temperatur an die Brennraumwand abzugeben.

Klopfregelung Der ZZP wird durch das Motorsteuergerät immer weiter Richtung „früh“ gestellt, um ein Maximum an Leistungsausschöpfung zu gewährleisten. Dies erfolgt solange, bis der Klopfsensor eine klopfende Verbrennung registriert. Dann erfolgt (zum Motor- bzw. Bauteilschutz) eine Verstellung des ZZP in Richtung „spät“, bis kein klopfen mehr auftritt. Anschließend beginnt die Regelung den ZZP wieder in Richtung „früh“ zu verstellen.

Zündwinkel Wird der Zündwinkel um weitere 6°KW nach „spät“ verstellt, so würde die Abgastemperatur weiter steigen. Der zurzeit zulässige Bereich für T_3 ist aufgrund der Turbolader und Katalysatoren auf ca. 980°C begrenzt.

Es käme demnach zu einer thermischen Überlastung der Bauteile.

Des Weiteren wäre ein weiterer Abfall des Momentes zu erwarten.