

Lambda-Anzeige

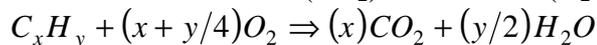


von [Michael Dunin v. Przychowski](#)

Was ist ne Lambda-Sonde?

Eine Lambdasonde ist ein Sensor zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Abgas.

Im Ottomotor werden Benzin mit dem Luftsauerstoff verbrannt. Benzin besteht aus einer Mischung verschiedener Kohlenwasserstoffe C_xH_y , wobei die längsten Ketten üblicherweise im Bereich des Oktan C_8H_{18} liegen. Bei einer optimalen Verbrennung oxidieren diese Kohlenwasserstoffe zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Die Reaktion sieht dabei so aus:



Da das Benzin nun eine Mischung verschiedener Kohlenwasserstoff ist, gibt man statt der Anzahl der benötigten Sauerstoffmoleküle das Massenverhältnis an. Das liegt für den handelsüblichen Sprit (Normal und Super) bei 14,7:1, so daß also 1 kg Benzin auf 14.7 kg Luft kommt. Das Volumenverhältniss ist dabei rund 9000:1, also 9000 Liter Luft auf einen Liter Benzin. Die Luftzahl λ (Lambda) ist definiert als:

$$\text{Luftzahl } \lambda = \frac{\left(M_{\text{Luft}} / M_{\text{Kraftstoff}} \right)_{\text{aktuell}}}{\left(M_{\text{Luft}} / M_{\text{Kraftstoff}} \right)_{\text{stöchiometrisch}}}$$

Ein Lambda-Wert von 1 entspricht also grade der Zusammensetzung für eine optimale Verbrennung. Bei einem Lambda-Wert von $\lambda > 1$ steht mehr Luft zur Verfügung, als für die Verbrennung nötig wäre. Das nennt sich dann mageres Gemisch. Ein Benzinüberschuß bedeutet fettes Gemisch und wird durch Lambda-Werte < 1 charakterisiert.

Der Lambda-Wert beschreibt also die Gemischzusammensetzung im Einlaß, die Sonde mißt jedoch die Abgaszusammensetzung. Normalerweise stehen beide Werte im direkten Zusammenhang (s.u.), Löcher im Auspuff oder ein Sekundärluftsystem (SLS) verfälschen aber die Anzeige, nicht jedoch den eigentlichen Lambda-Wert. Eine Lambdasonde ist ein Sensor zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Abgas.

Wozu braucht man die Sonde?

Zur Bestimmung des aktuellen Gemischs. Bei Katalysator-Motoren hängt dann ein Regelkreis dran, der das Gemisch immer im sog. Katalysatorfenster bei $\lambda = 1$ hält. Bei Moppeds ohne Kat hilft die Sonde aber auch bei der Vergaserabstimmung. Man benötigt dazu dann eine Anzeige des λ -Werts und kann im Fahrbetrieb Aufschluß über die Vergaserabstimmung erhalten.

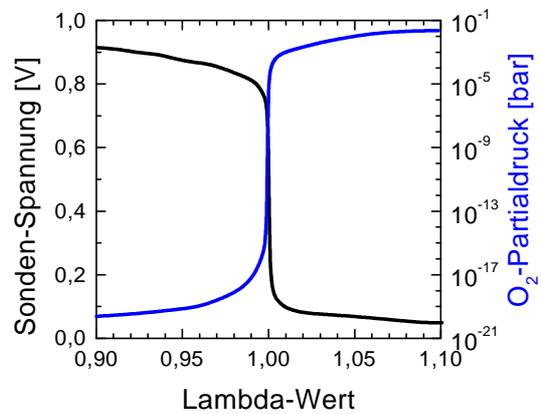
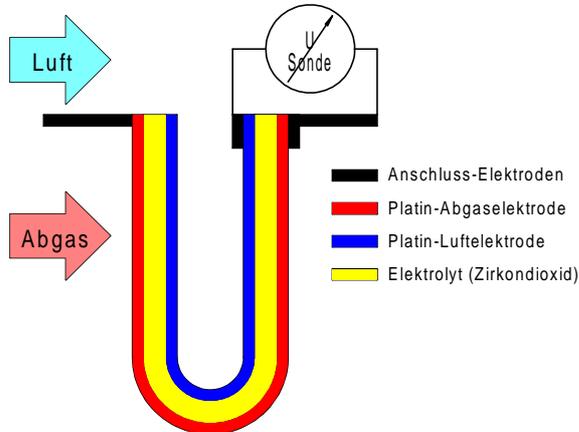
Wie funktioniert die Sonde?

Die Sonde ist ein potentiostatischer Sensor und besteht aus zwei Platin(Pt)-Elektroden, die durch eine Festelektrolyt getrennt sind. Die aktive Elektrode steht mit dem Abgas in Kontakt und an ihr findet eine katalytische Reaktion statt, bei der sich Sauerstoff-Ionen bilden. Das Elektrolyt (üblicherweise Yttrium stabilisiertes Zirkondioxid aka YSZ) ist ein Ionenleiter für Sauerstoff-Ionen.

Durch die Ionenwanderung entsteht dann eine Spannung U_{th}

$$U_{th} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\sqrt{P_{O_2}^{Luft}}}{\sqrt{P_{O_2}^{Abgas}}} \right)$$

zwischen den Elektroden (Nernst-Gleichung), die direkt gemessen werden kann.



Wie sieht die Sonde aus?

Es gibt Planarsonden und Fingersonden, wobei im KFZ-Bereich fast nur Fingersonden zum Einsatz kommen. Die meisten Fingersonden verwenden eine sehr ähnlich Bauform. Hier sind mal die Typen von [NTK](#) und Bosch abgebildet.



Das Einschraubgewinde in den Krümmer ist üblicherweise ein M18x1,5 Gewinde. Die Sonden sind in verschiedenen Ausführungen zu bekommen, die sich in der Anzahl der Anschlußleiter unterscheiden:

- 1 Kabel: Signalkabel, Masse über Gehäuse
- 2 Kabel: Masse als Leiter herausgeführt
- 3 Kabel: eingebaute Heizung, Masse über Gehäuse
- 4 Kabel: eingebaute Heizung, Masse als Leiter

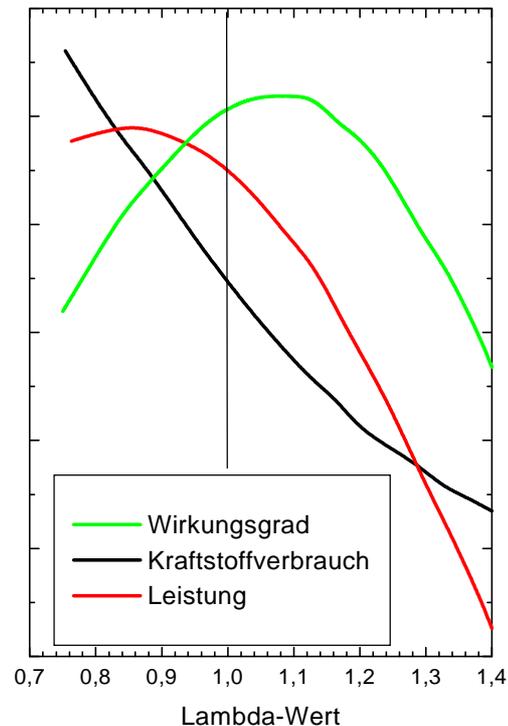
Ich verwende eine 3-Kabel Sonde vom Typ NTK OZA30-D1, die in Deutschland über [Uni-Fit](#) unter der Bezeichnung OX-103 vertrieben wird.

Warum Abstimmen?

Weil die richtige Vergaserabstimmung einen großen Einfluß auf **Motorleistung**, **Spritverbrauch** und **Schadstoffausstoß** hat.

Motorleistung und Spritverbrauch:

In jedem Umdrehungs-Zyklus saugt der Motor eine bestimmte Gemischmenge an. Die Energie, die bei der Verbrennung dieser Menge entsteht bestimmt das aktuelle Drehmoment des Motors, aus dem sich mit der Drehzahl die Leistung ergibt. Bei gegebener Drehzahl wird die Leistung daher direkt über den Energieinhalt der Zylinderfüllung bestimmt. Erhöht man die Spritmenge im Gemisch (Fett), dann reicht der Sauerstoffgehalt zwar nicht mehr für eine vollständige Verbrennung aus, der Energieinhalt steigt jedoch etwas. Daher ergibt sich im fetten Bereich bei $\lambda \sim 0,85$ die beste Leistung eines Motors. Bei weiterer Anfettung verringert sich die Leistung wieder, da der zusätzliche Sprit nicht mehr verbrannt werden kann, aber eine Kühlung des Motors bewirkt, die die Leistung verringert. Mehr Sprit in einer Zylinderfüllung bedeutet jedoch auch mehr Spritverbrauch bei gegebener Drehzahl. Anders herum verringert eine Gemischabmagerung den Spritverbrauch drastisch. Bei einer leichten Abmagerung des Gemischs findet eine sehr vollständige Verbrennung statt, die für hohe Verbrennungstemperaturen sorgt. Die stärkere thermische Ausdehnung der Zylinderfüllung sorgt für einen weichen und langsamen Leistungsabfall. Möchte man nun die maximale Leistung aus einem Liter Sprit bekommen, so muß man die Leistung pro Verbrauch bestimmen und erhält den sog. Wirkungsgrad. Dieser Wirkungsgrad zeigt ein Maximum bei $\lambda \sim 1,1$. Mit dieser Einstellung läßt sich ein Motor am spritsparendsten bewegen.



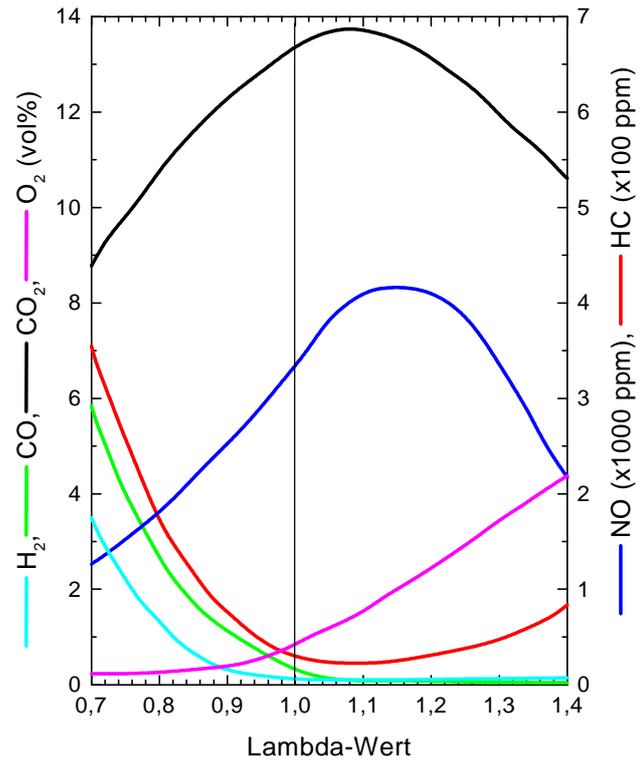
Abgasverhalten:

Bei einer idealen Verbrennung entstehen "nur" CO_2 und Wasserdampf, aber die Verbrennung läuft nicht optimal ab. Schuld daran ist zum einen die Gemischhomogenität: Vergaser oder Einspritzanlage erzeugen fein verteilte Sprittröpfchen in der Ansaugluft. An diesen Tröpfchen ist das Gemisch daher fett, zwischen ihnen dagegen zu mager. Durch konstruktive Maßnahmen am Motor versucht man das Gemisch gut zu verwirbeln und baut z.T. dazu noch Quetschkanten im Brennraum um ein homogenes Gemisch zum Zündzeitpunkt zu erhalten. Zum anderen besteht das Gemisch nicht nur aus Sprit und Sauerstoff, sondern aus Luft, die zu 78 % aus Stickstoff besteht. Unter hohen Temperaturen kann nun der Sauerstoff auch mit dem Stickstoff reagieren. Dieser Sauerstoff steht dann nicht mehr für die Verbrennung zur Verfügung. Die höchsten Temperaturen entstehen aber nun mal bei optimaler Verbrennung, so daß die beste Verbrennung mit den höchsten CO_2 -Werten im leicht mageren Bereich bei $\lambda \sim 1,1$ liegt. Die kleinen Einzelhubräumen von Motorradmotoren weisen jedoch ein sehr günstiges Verhältnis von kühlender Zylinderfläche zum heißem Innenraum auf, so daß im Vergleich zu Dosenmotoren sehr wenig

NO_x entsteht.

Im fetten Bereich findet man dagegen hohe CO-Werte, die eine unvollständige Verbrennung des Sprits zeigen. Außerdem steigt der Anteil unverbrannten Sprits, der als Bruchstücke der Kohlenwasserstoffe (HC) und als Wasserstoff H₂ zum Auspuff heraus kommt. Der Anstieg der HC-Werte bei sehr magerer Einstellung $\lambda > 1,2$ zeigt ebenfalls, daß, hier die Verbrennung wieder unvollständig wird.

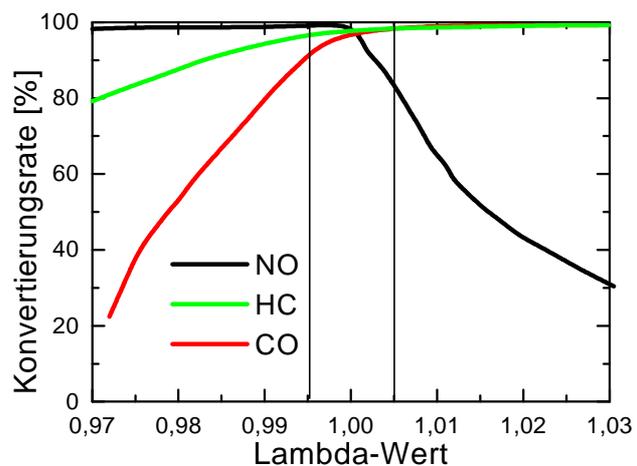
Die Grafik zeigt die prozentuale Zusammensetzung des Abgases durch die Verbrennungsbedingungen, wieviel Schadstoffe absolut aus dem Auspuff kommen wird durch den Spritverbrauch bestimmt. Dazu kommen noch die sog. Spülverluste, die für erhöhte HC-Werte sorgen wenn unverbrannter Sprit während der Ventilüberschneidung in den Auspuff gelangt. Die geringsten Spülverluste weist ein Motor im Bereich des max. Drehmoments auf. Auf Leistung ausgelegte Motorradmotoren mit weitem Drehzahlbereich haben besonders im unteren Drehzahlbereich sehr hohe Spülverluste.



Randbemerkung: Katalysator

Im Katalysator werden die Schadstoffe an einer Platin-Schicht nachoxidiert. Er wandelt CO in CO₂, NO in N₂ und O₂ und HC in H₂O und CO₂ um. Für alle drei Schadstoffe (3-Wege-Kat) klappt das aber nur in einem sehr schmalen Katalysatorfenster bei Lambda $\lambda = 1 \pm 0,005$.

Nachteil dabei ist natürlich, daß gerade in diesem Bereich weder die optimale Leistung, noch der beste Wirkungsgrad erreicht werden. Gegenüber einem gut abgestimmten Motor wird beim Beschleunigen daher weniger Leistung zur Verfügung stehen und bei normaler Fahrt wird er mehr Benzin verbrauchen. Ein unregelmäßiger Kat an einem auf Leistung (fett) abgestimmten Motorrad wird dagegen hauptsächlich die eh sehr geringen NO-Werte senken und die hohen HC-Werte nur geringfügig verbessern können. Bei den CO-Werten ist er ziemlich nutzlos.



Abstimmung mittels Lambda-Anzeige

Die Abstimmung, besonders im Teillastbereich hängt von der verwendeten Vergasereinrichtung und persönlichen Vorlieben ab. Technisch vorgegeben ist nur die Abstimmung im Leerlauf und bei der maximalen Leistung, also bei hoher Drehzahl und Vollgas. Dazwischen ist man, je nach Vergasertyp, in der Abstimmung relativ frei.

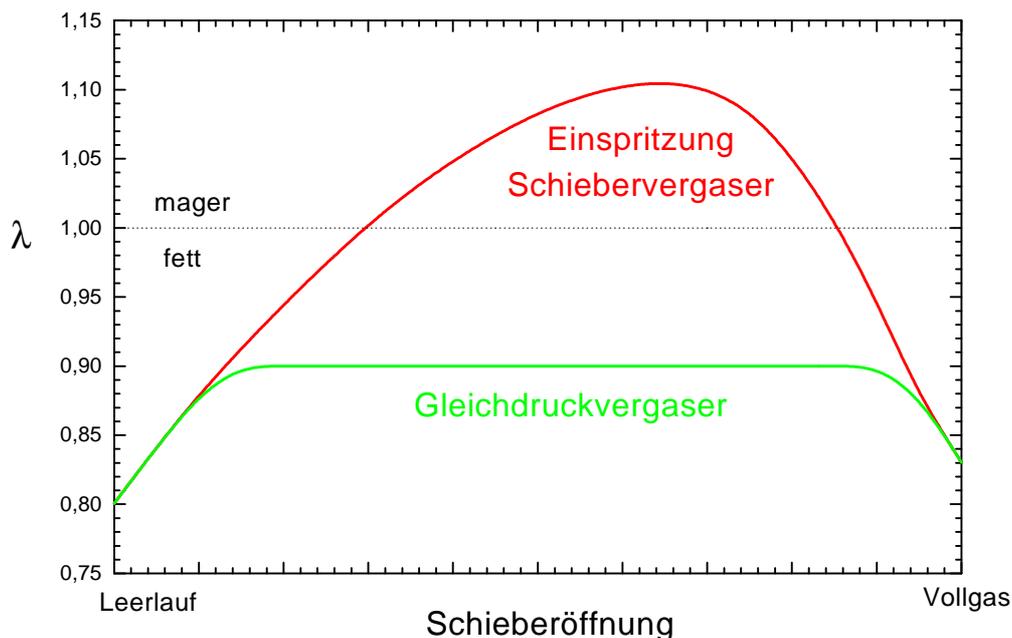
Leerlauf:

Hier hat man mit sehr schlechter Gemischbildung und daher unvollständiger Verbrennung zu kämpfen, so daß das Gemisch etwas angefettet werden muß. Ein Lambdawert von $\lambda \sim 0,85$ entspricht dabei noch den üblichen CO-Vorschriften. Eine etwas fettere Einstellung von $\lambda \sim 0,8$ kann aber zu einem besseren Startverhalten und Rundlauf führen.

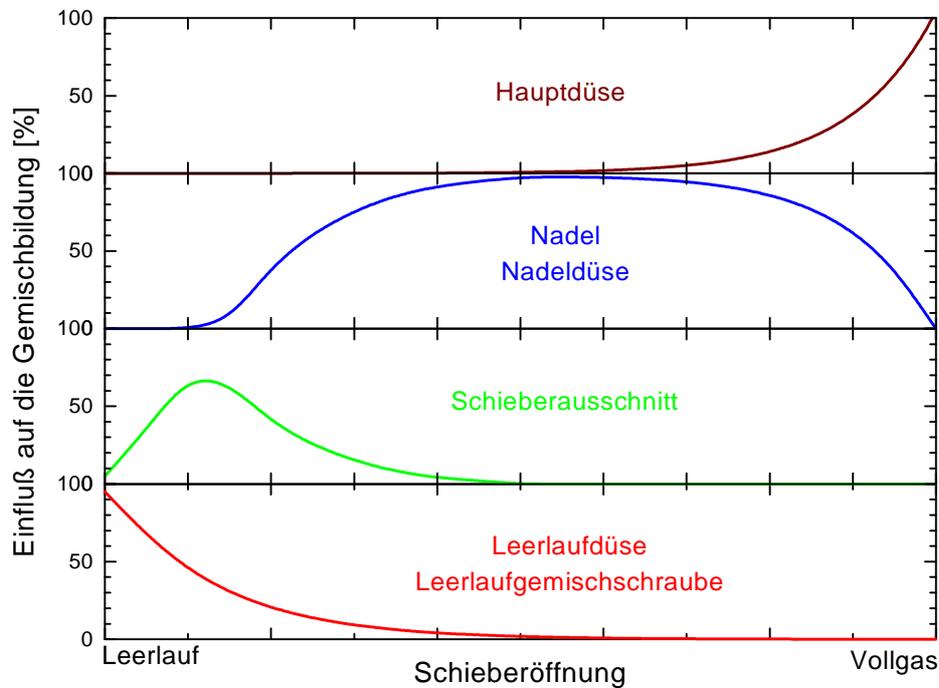
Vollast:

Hier sollte das Gemisch ebenfalls etwas fett sein um die Verbrennungstemperatur abzusenkten. Außerdem gibt der Motor ja bei einem Lambdawert von $\lambda \sim 0,85$ seine beste Leistung ab.

Aus diesen Grenzwerten und dem Leistungskriterium ergibt sich der Vollast-Verlauf, der mit einem gleichmäßigen Lambda-Wert von etwa $\lambda \sim 0,85 - 0,90$ für viel Leistung sorgt. Jedoch arbeitet der Motor bei Lambda-Wert $\lambda \sim 1,1$ am wirtschaftlichsten, da hier der optimale Wirkungsgrad erreicht wird. Deshalb kann im mittleren Drehzahlbereich, also im Bereich des maximalen Drehmoments, und bei Teillast das Gemisch etwas magerer eingestellt werden. Der Motor dankt es einem mit einem etwas geringeren Spritverbrauch und besseren Abgaswerten. Gleichdruckvergaser können jedoch nicht zwischen den Lastzuständen unterscheiden. Die Schieberöffnung wird nur durch die Ansaugströmung bestimmt, die von Gasgriff (Drosselklappe) und Drehzahl abhängt. Halbgas bei maximaler Drehzahl führt zu einer identischen Schieberstellung wie Vollgas bei mittlerer Drehzahl. Daher muß hier ein Kompromiss zwischen guter Beschleunigung aus mittleren Drehzahlen ($\lambda < 1$) und geringen Spritverbrauch und gute Abgaswerte ($\lambda > 1$) gewählt werden, der meist um $\lambda \sim 0,9$ liegt. Bei Schiebervergasern und Einspritzanlagen ist man freier in der Einstellung. Hier sollte der Teillastbereich deutlich magerer abgestimmt werden, dafür aber bei Vollgas in allen Drehzahlbereichen ein Lambda-Wert von etwa 0,85.



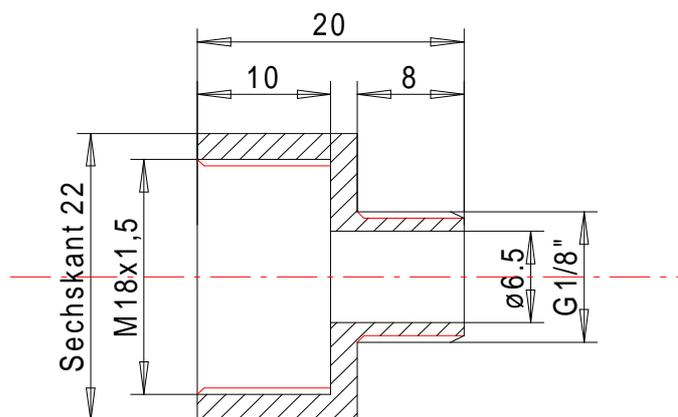
Auf die Abstimmung haben je nach Last verschiedenen Elemente des Vergasers Einfluß. Diese Grafik zeigt den Zusammenhang schematisch für einen Gleichdruckvergaser. Bei Schiebervergasern, die mit variabler Strömung im Ansaugtrakt zu kämpfen haben, wirken sich noch die Verhältnisse zwischen Sprit- und Luftdüsen in den jeweiligen Bereichen aus.



Einbau der Sonde

Die Sonde wird in den Krümmer eingebaut. Da die Sonden eine recht hohe Arbeitstemperatur brauchen, sollte der Ort recht nah am Auslaß gewählt werden. Oder man verwendet eine beheizte Sonde. Schweißadapter sind bei den Sondenvertreibern erhältlich.

Bei den Ducati Modellen ist im Krümmer bereits ein Zugang vorgesehen, der jedoch ein sehr kleinen Gewinde (G1/8") besitzt. Ich habe mir aus Sechskant-Messing einen Adapter gedreht. Das Schutzrohr der Sonde ist jedoch viel zu dick und paßt nicht in den Adapter. Es muß daher entfernt werden und die Keramik freigelegt werden. An der Funktion der Sonde ändert das nix, aber sie wird dadurch natürlich mechanisch sehr empfindlich. Sobald der Adapter auf die Sonde geschraubt ist, ist sie aber wieder recht gut geschützt.

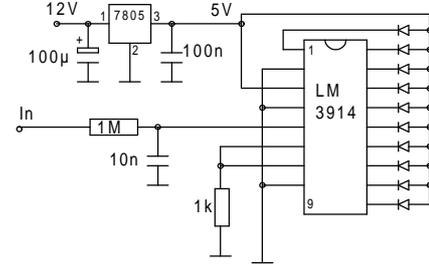


Aufbau der Anzeige

Zur Anzeige ist jedes Voltmeter geeignet das einen hohen Innenwiderstand besitzt. Die Sonde kann nämlich kaum Strom erzeugen. Einfach Digitalvoltmeter mit einen Innenwiderstand von 20MΩ sind gut geeignet, Analoge der unteren Preisklasse meist jedoch nicht.

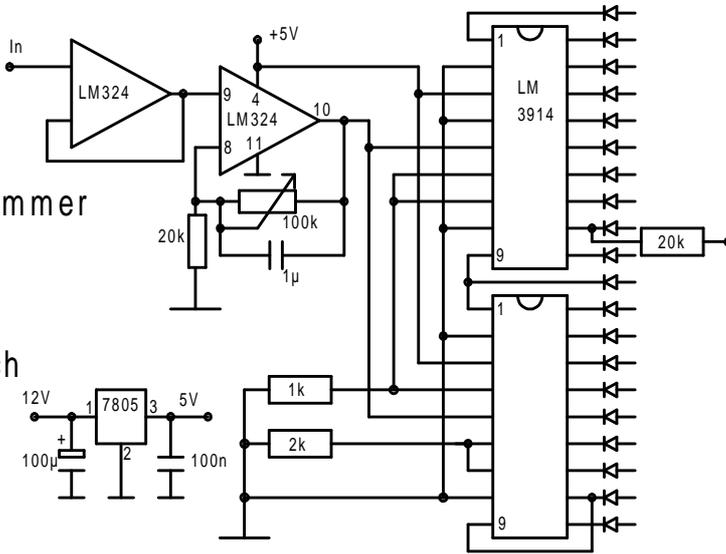
Besser abzulesen ist jedoch ein Bargraph, der sich leicht selber bauen läßt. Mit dem LM3914 steht ein genauer Spannungsteiler mit integrierten LED-Treibern zur Verfügung. Durch die eingebauten Spannungsreferenz von 1.2 V und den hohen Eingangswiderstand läßt sich die Sonde auch direkt anschließen. Bedingt durch die Sondenkennlinie ist die Auflösung im fetten und mageren Bereich aber mit 10 LEDs nicht besonders gut.

Eine geeignete Schaltung, die mit 20 LED's das aktuelle Gemisch anzeigt ist hier zu sehen:



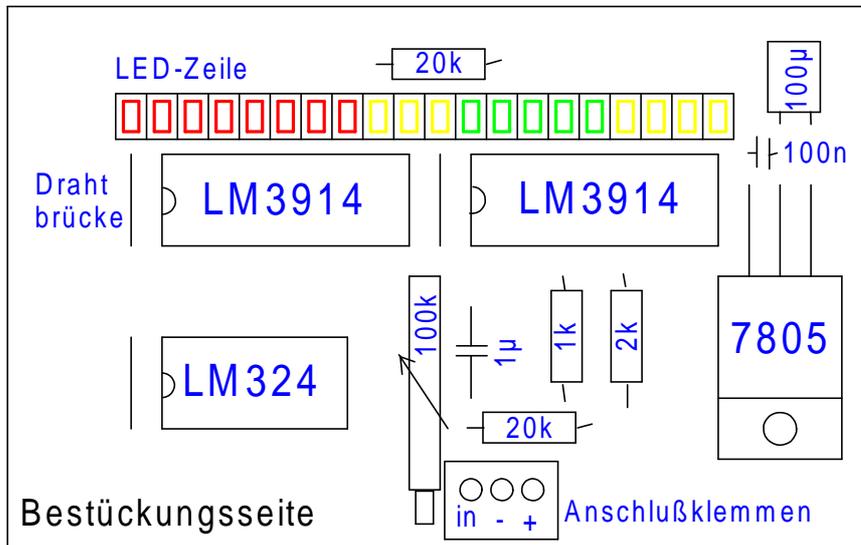
Stückliste:

- LM 3914 x 2
- LM 324
- 100k Spindeltrimmer
- 20k x 2
- 1k
- 2k
- 100n Keramisch
- 100µ Elko
- 1µ
- 2 LED-Zeilen

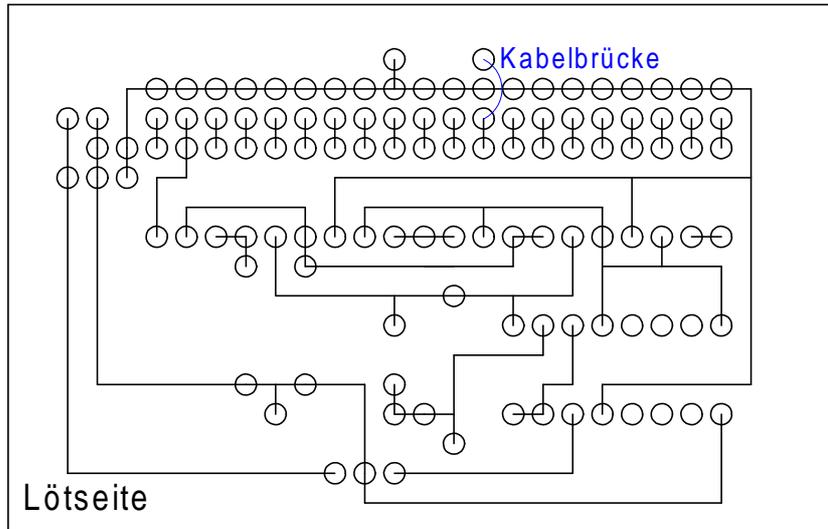


Die Anzeige wird z.Z. im Dot-Mode betrieben, ein Umbau auf Bargraph ist aber problemlos möglich. Dazu wird Pin 9 der LM3914-ICs nicht beschaltet und der Pull-up-Widerstand an Pin 11 fällt weg.

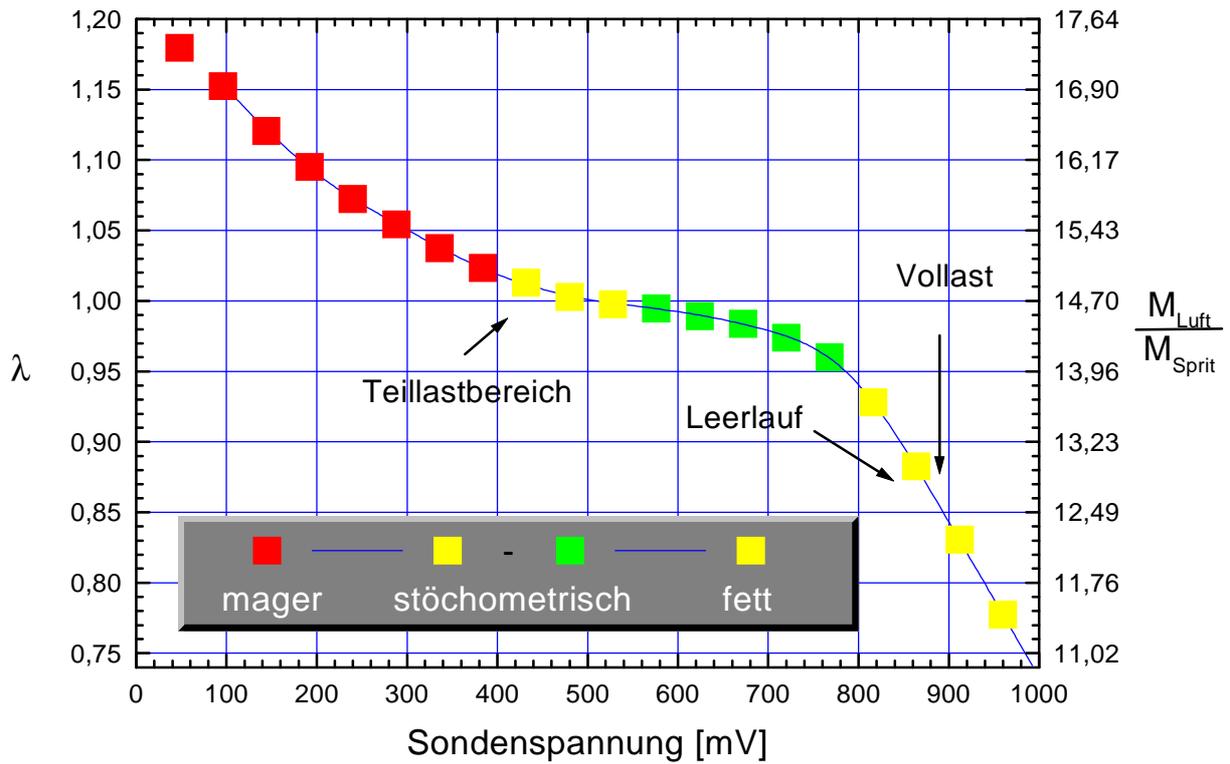
Das Layout sieht bei mir so aus:



und auf der anderen Seite so:



Die Kennlinie der Sonde führt dann zu einer genauen Anzeige im Bereich $\lambda \sim 1$, im fetten und mageren Bereich wird die Anzeige ungenauer.



Neue verbesserte Schaltung!

Bedingt durch die Sondenkennlinie ist die Anzeige per Spannungsteiler im fetten und mageren Bereich trotz vieler LEDs nicht besonders genau, dagegen ist aber im Bereich von $\lambda=1$ sehr viel Bewegung in der Anzeige. Das ist auf Dauer nicht wirklich befriedigend.

Inzwischen gibt es aber eine Reihe günstiger Microcontroller, mit denen sich die Kennlinie auf einfache und billige Weise nachbilden läßt.

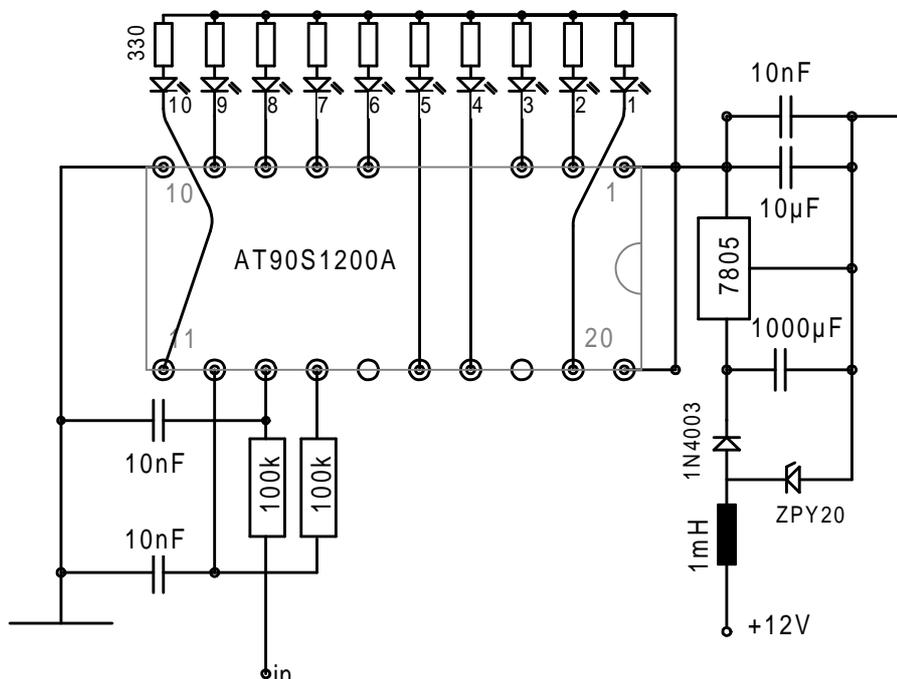
Besonders interessant finde ich die AVR-Controller der Firma Atmel, die sich auf sehr einfache Weise programmieren lassen. Die kompletten Datenblätter, sowie Entwicklungswerkzeuge (Assembler, Simulator) gibt es umsonst bei [Atmel](#)

Um die Daten in den Controller zu übertragen gibt es diverse einfache Schaltungen und (für den privaten Gebrauch) Freeware-Programme wie z.B. das von [Johann Aichinger](#)

Die AVR-Controller besitzen an den I/O-Ports einschaltbare Pull-up-Widerstände und können mit 20 mA direkt Leuchtdioden treiben. Außerdem haben sie einen Komparator eingebaut, mit dem sich ein einfacher A/D-Wandler mit einem R-C-Glied aufbauen läßt. Die Linearität ist dabei nicht besonders hoch, da jedoch eh eine Kennlinie (die der Sonde) nachgebildet werden soll, kann man dabei auch gleich die R-C-Charakteristik mit verrechnen und damit die Genauigkeit erhöhen.

Der einfachste AVR, der AT90S1200A, hat einen internen Oszillator, so daß man sogar auf den Quarz verzichten kann und die Schaltung extrem kompakt wird. Nachteil des 1200 ist der kleine EEPROM-Speicher und er kann nicht aus dem Programmspeicher Daten lesen (lpm-Befehl nicht integriert). Daher muß man sich schon im Vorfeld für eine Bargraph- oder Dot-Anzeige entscheiden, für beide Referenzwerte reicht der Speicher nicht.

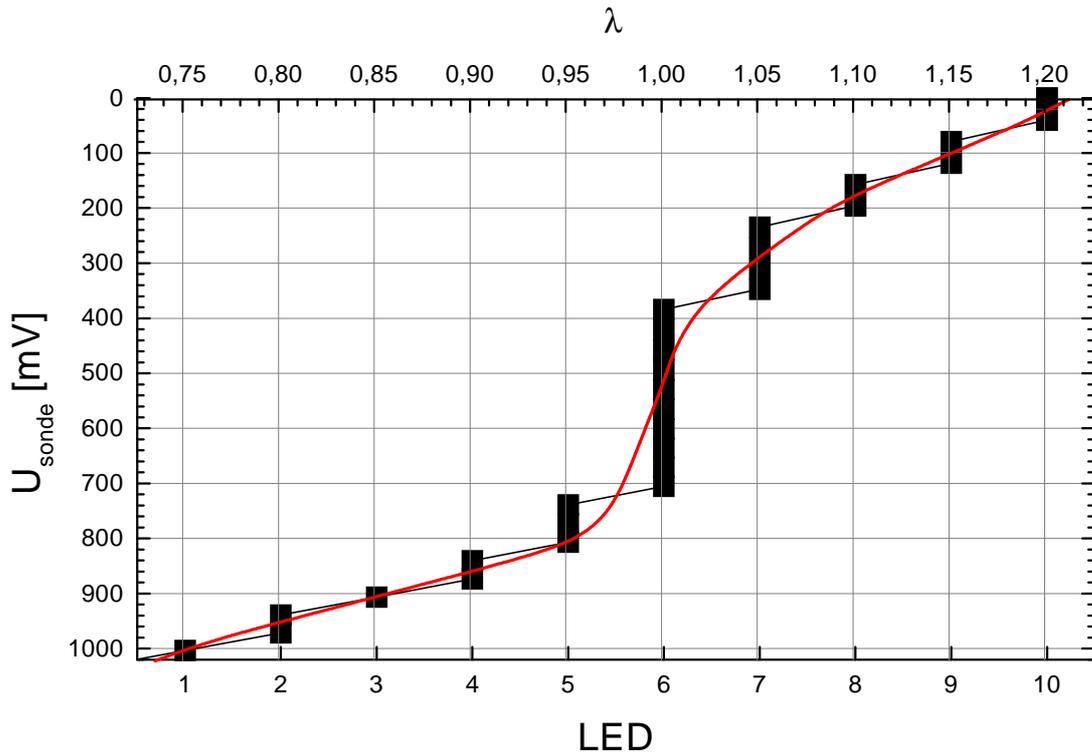
Mit dem AT90S2313 läßt sich auch eine umschaltbare Anzeige aufbauen, jedoch muß dann noch ein Quarz in die Schaltung integriert werden.



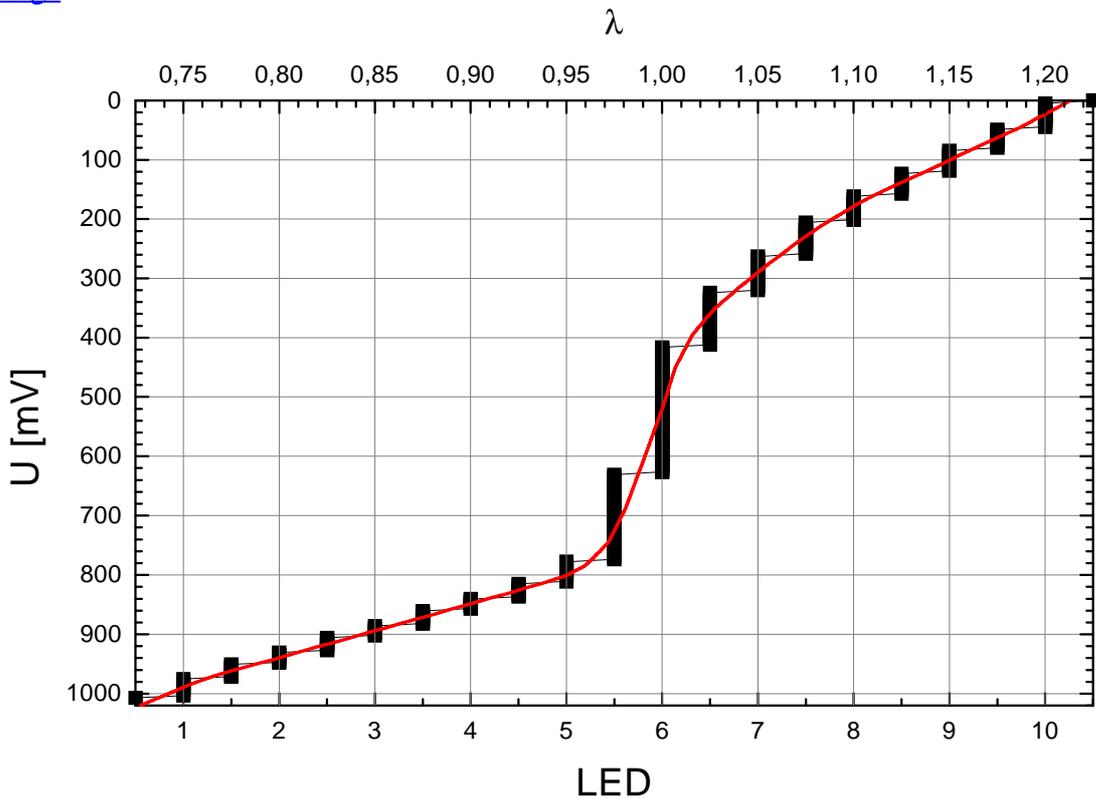
Das einfache Assembler-Programm (basierend auf dem Atmel-Low-cost-A/D-Wandler) gibt's hier: [Assembler-Programm](#)

Es integriert jeweils 100 Messungen und zeigt mit etwa 7 Hz den jeweiligen Lambda-Wert an. Das sollte eine nicht zu hektische, aber recht spontane Anzeige ergeben.

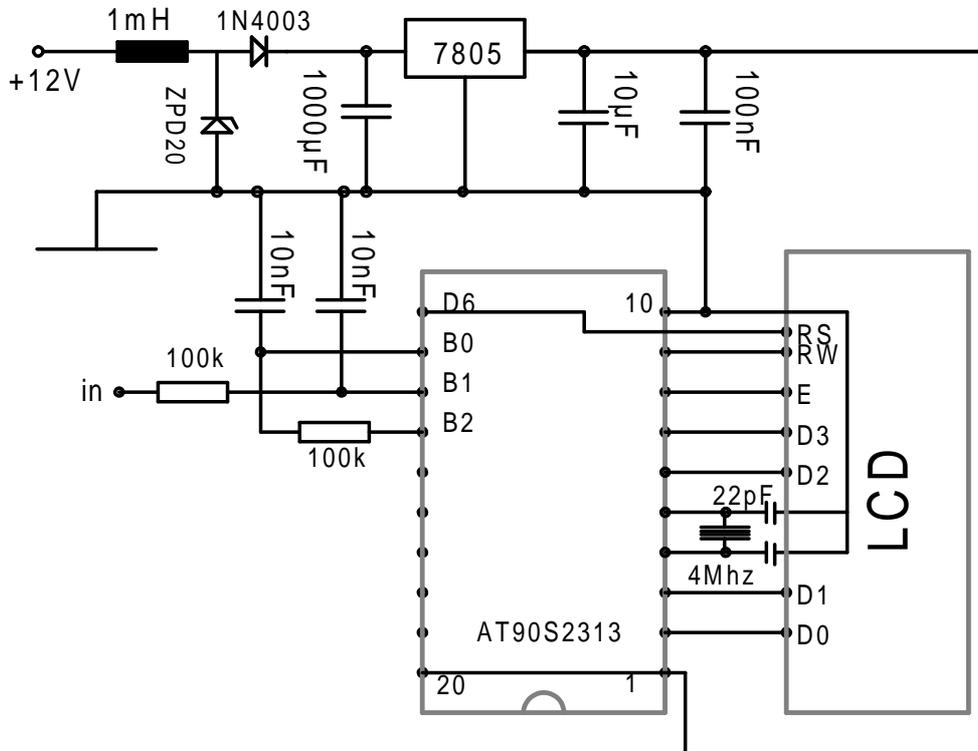
Die LED-Referenzwerte (im EEPROM) für den Bargraph bilden die Kennlinie wie in der Grafik gezeigt nach: [EEProm-Daten für die Bargraph-Anzeige](#)



Beim DOT-Display können feinere Unterscheidungen getroffen werden, da die Zwischenstufen durch gleichzeitiges Schalten beider LEDs charakterisiert werden. Die Punkte bei LED-Nr. 1.5 bedeuten daher, daß LED-Nr.1 und LED-Nr.2 zusammen an sind: [EEProm-Daten für die Dot-Anzeige](#)



Eine etwas teurere Nobelanzeige (Teile ca. 60,-DM), basierend auf dem AT90S2313, die den Lambda-Wert direkt 3-stellig auf einem beleuchteten LCD-Punktmatrix-Display ausgibt ist aber auch schon fast fertig ;-): [Programm](#) und [Daten](#)



Literatur

- [Vortrag über Aufbau und Arbeitsweise von Lambda-Sonden des Instituts für Werkstoffkunde der Uni Karlsruhe](#)
- [O2-Sensor-FAQ](#)
- [SplitSecond stellt Sonden und Anzeigen her](#)

Bezugsquellen

Sonden:

- [Uni-Fit Katalysatoren](#)
- [oder im Dosenzubehör](#)

Bauteile:

- [Conrad Bauteile](#)
- [bzw. die Conrad HP](#)