

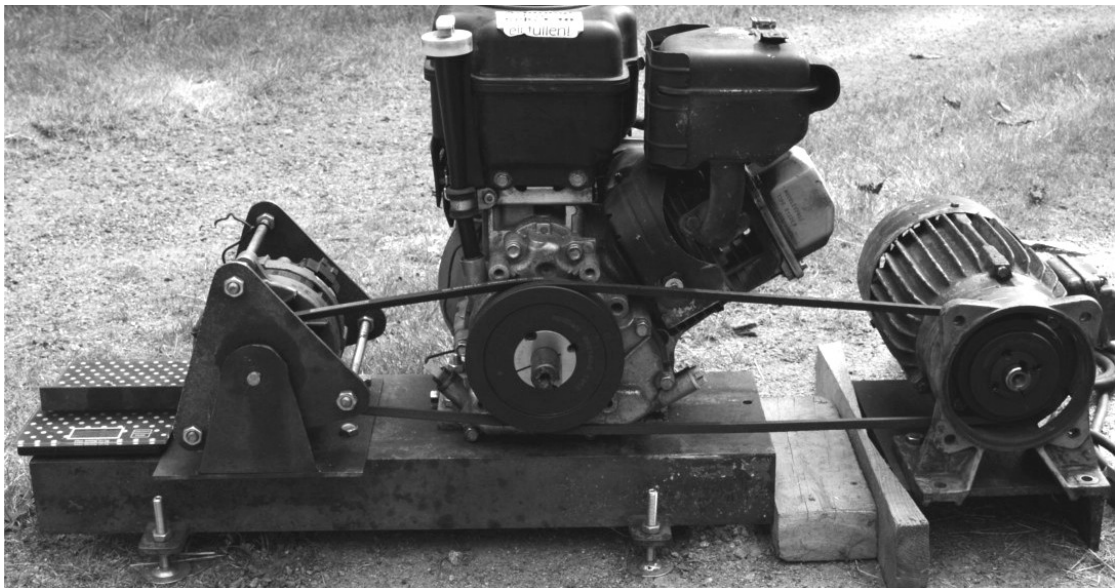
Jugend forscht 2017
Fachgebiet Technik

Leistungsprüfstand für einen Viertakt-Ottomotor

Pablo Grimm Niklas Schmidt

31. Januar 2017

Betreut durch Herrn Bernd Jahn (Archenhold-Gymnasium)
und Herrn Wolfgang Fliegner (Meteum)



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Holzvergasung | 4 |
| 3 | Aufbau des Prüfstandes | 5 |
| 3.1 | Drehmomentmessung | 5 |
| 3.2 | Zündverstellung | 7 |
| 4 | Arbeitsweise des Ottomotors | 9 |
| 4.1 | Zündung | 10 |
| 4.2 | Gemischbildung | 10 |
| 5 | Messergebnisse | 11 |
| 6 | Ausblick | 14 |

1 Einleitung

Otto- und Dieselmotoren sind die heute bedeutendsten Wärmekraftmaschinen und haben eine hohe Verbreitung erfahren. Die begrenzten fossilen Ressourcen unseres Planeten und der Klimawandel erfordern jedoch die Suche nach Alternativen zu den herkömmlichen Kraftstoffen Benzin und Dieselöl. Während der Betrieb mit diesen altbekannten Kraftstoffen seit Dekaden untersucht wird, ist die Verwendung alternativer Kraftstoffe aktueller Forschungsgegenstand.

Im Jahr 2015 stellten wir eine auf dem Imbert-Prinzip beruhende Holzvergaseranlage vor, die Holzgas, ein brennbares Gasgemisch bestehend hauptsächlich aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff, für den Betrieb eines Ottomotors bereitstellen sollte. Um die Leistungsfähigkeit des Verbrennungsmotors quantitativ einschätzen zu können, ist es notwendig, einige Größen wie Drehzahl und Drehmoment im laufenden Betrieb zu messen und systematisch Veränderungen an den Betriebsparametern des Motors vorzunehmen.

Ziel dieses Projektes ist der Bau eines kleineren Leistungsprüfstandes, mit dem Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien aufgenommen werden. Dabei kommt ein Viertakt-Ottomotor mit einer Nennleistung von 6 kW als Prüfling und eine KFZ-Lichtmaschine als Belastungsmaschine zum Einsatz. Neben dem Belastungsdrehmoment sollen Gemischzusammensetzung und Zündzeitpunkt variiert werden.

2 Holzvergasung

Der Gasgenerator arbeitet nach dem Fallstrom-Prinzip, dabei wird das Brennmaterial in Form von Holzpellets gemeinsam mit der Verbrennungsluft von oben über das Brennrrohr in die Reaktionszone geleitet. Dort verschwelt das Brennmaterial unter Luftmangel (flam-mende Pyrolyse). Die Zwischenprodukte werden zu Kohlenmonoxid reduziert. Unterhalb des Brennröhres befindet sich ein Rost, welches die Glut hält, aber Asche und Holzgas durchlässt. Brennrrohr und Rost wurden nach Dimensionierungstabellen der FEMA[3] angefertigt. Als gasdichtes Gehäuse für den Gasgenerator dient ein 60 L-Ölfass.

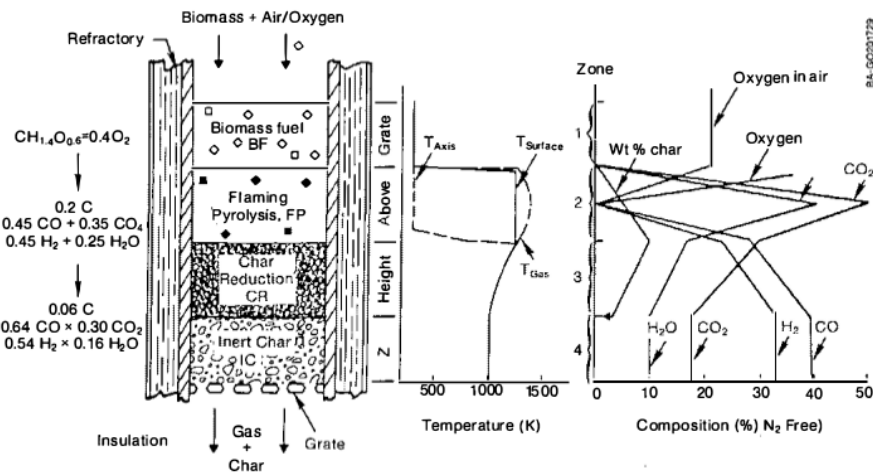


Abbildung 2.1: Schema des Fallstromvergasers mit Temperaturverlauf und Reaktionsprodukten [4, S. 47]

Das Generatorgas wird zunächst in einem Nassfilter durch ein Wasserbad geleitet, um Asche und Teer zu binden. Im nachfolgenden Kühler, einem umfunktionierten Plattenheizkörper, kondensiert die Restfeuchtigkeit.

Der Gasfluss durch die gesamte Anlage wird durch einen Seitenkanalverdichter aufrecht erhalten und kann durch Kugelventile gesteuert werden. Das Holzgas kann beim Anfeuern zu einer Fackel geleitet werden, um die Brennbarkeit zu prüfen. Eine gelbliche Verfärbung der sonst bläulichen Flamme deutet dabei auf Teerrückstände hin.

Ist das Gas ausreichend sauber, wird es an den Verbrennungsmotor geleitet. Am Motor wird das Gas-Luft-Gemisch über je ein Kugelventil im Gas- und Luftzweig eingestellt.

3 Aufbau des Prüfstandes

Alle Komponenten des Leistungsprüfstands sind auf einem U-Profil aufgebaut. Beim verwendeten Viertakt-Ottomotor handelt es sich um einen *Briggs & Stratton Vanguard* mit einem Hubraum von 305 cm^3 und einer Nennleistung von 6 kW bei einer Drehzahl von $3600 \frac{1}{\text{min}}$. [Vgl. 1] Dieser treibt eine KFZ-Lichtmaschine über einen Keilriementrieb mit einer Übersetzung von $1 : 2$ an.

3.1 Drehmomentmessung

Die als Pendelmaschine verwendete Drehstromlichtmaschine arbeitet als fremderregter Synchrongenerator. Das den Motor belastende Drehmoment kann über den Erregerstrom gesteuert werden. Dazu wird der Laderegler entfernt und eine Stromquelle an die Rotorwicklung angeschlossen. Die drei Statorwicklungen sind intern mit einer Gleichrichterbrücke verschaltet, die anfallende Gleichspannung wird an einem wassergekühlten Lastwiderstand aus Eisendraht verheizt.

Die Lichtmaschine ist längs ihrer Antriebsachse drehbar gelagert, so dass ein Drehmoment an der Antriebswelle eine Kraft am Ende eines Hebelarms hervorruft. Diese Kraft wirkt auf eine Wägezelle, bestehend aus vier Dehnungsmessstreifen in Wheatstone-Brückenschaltung, ein. Die Auswertung der Messbrücke erfolgt mittels des integrierten Schaltkreises HX711.

Aus dem Messwert der Wägezelle und der Länge des Hebelarms ($r = 84 \text{ mm}$) lässt sich, wie in Abbildung 3.3 gezeigt, das Drehmoment an der Lichtmaschine bestimmen:

$$M_{\text{Lima}} = rF \quad \text{mit } \vec{r} \perp \vec{F} \quad (3.1)$$

Für das Drehmoment motorseitig des Keilriementriebs gilt:

$$\begin{aligned} \frac{M_{\text{Lima}}}{M_{\text{Motor}}} &= \frac{d_{\text{Lima}}}{d_{\text{Motor}}} \\ &= \frac{70 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = \frac{1}{2} \\ M_{\text{Motor}} &= 2 \cdot M_{\text{Lima}} \\ (3.1) \Rightarrow &= 2rF \end{aligned} \quad (3.2)$$

Die vom Motor abgegebene mechanische Leistung berechnet sich nach Gleichung 3.3.

$$\begin{aligned} P &= \omega M \\ P_{\text{Motor}} &= 2\pi n M_{\text{Motor}} \\ (3.2) \Rightarrow &= 4\pi r F n \end{aligned} \quad (3.3)$$

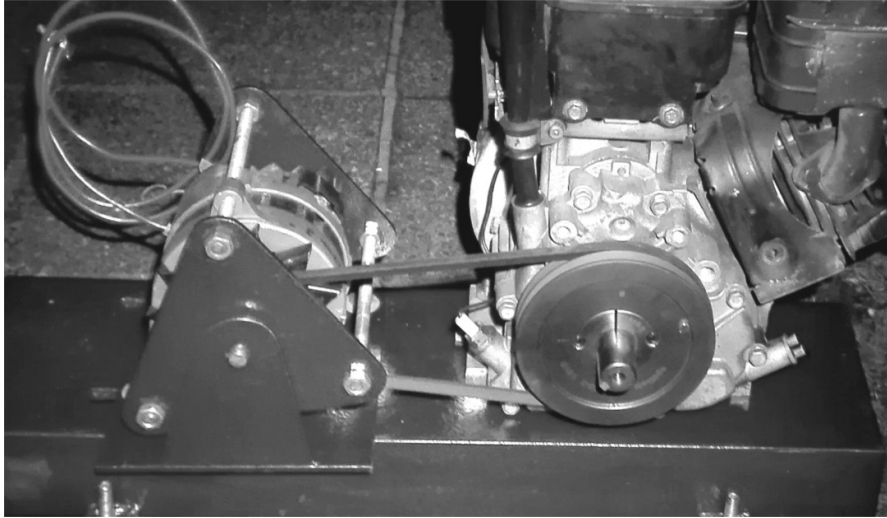


Abbildung 3.1: Aufbau des Leistungsprüfstands

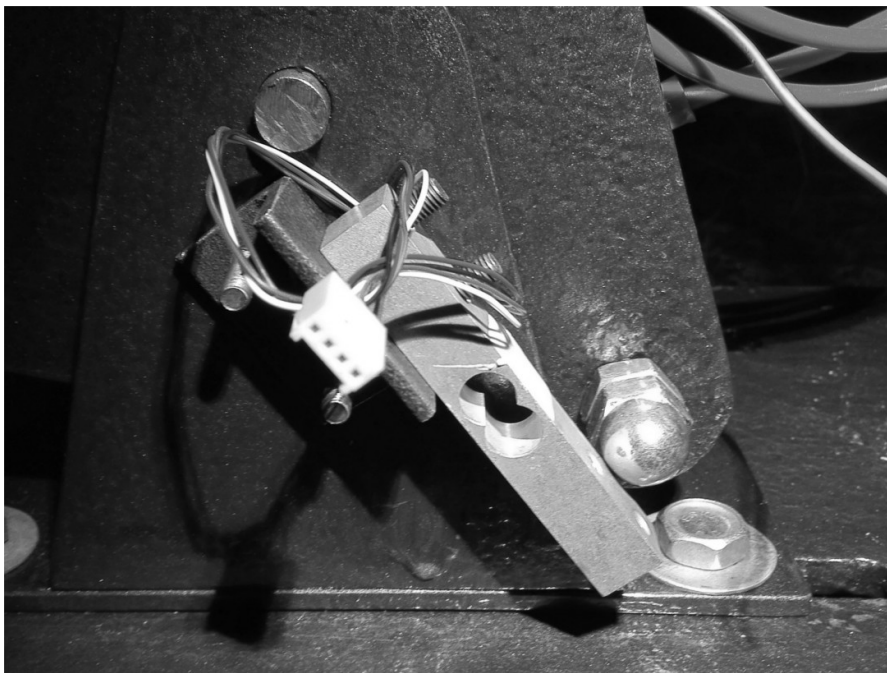


Abbildung 3.2: Drehbare Aufhängung der Lichtmaschine mit Wägezelle

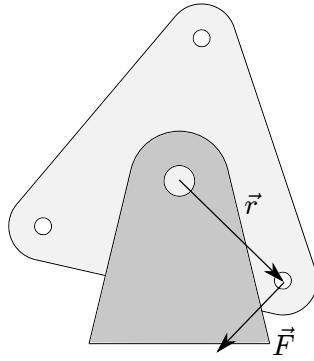


Abbildung 3.3: Drehmomentmessung

Bei Nenndrehzahl ($n = 3600 \frac{1}{\text{min}} = 60 \frac{1}{\text{s}}$) und einer Nennleistung von 6 kW wirkt an der Kurbelwelle des Motors ein mittleres Drehmoment von $M = 16 \text{ Nm}$, was einer Kraft von $F \approx 100 \text{ N}$ an der Wägezelle entspricht. Die Lichtmaschine ist für diese Belastung nicht ausgelegt¹, sie würde um ein Vielfaches ihrer Nennleistung überlastet. Da der Motor im Betrieb mit Holzgas aufgrund des niedrigeren Energiegehalts des Kraftstoffs nur etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ seiner Nennleistung erreicht, ist die Überlastung weniger dramatisch und sollte bei ausreichender Kühlung der Lichtmaschine unproblematisch sein.

3.2 Zündverstellung

Der Zündzeitpunkt zählt zu den wichtigsten Betriebsparametern eines Ottomotors. Der optimale Zündzeitpunkt ist abhängig von verwendetem Kraftstoff, Drehzahl und Belastung.

Unser Motor verfügt werksseitig über eine Magnetzündanlage. Ein am Schwungrad befestigter Magnet dreht sich einmal während jeder Umdrehung an der Zündspule vorbei und induziert dabei die für den Funkenüberschlag an der Zündkerze nötige Spannung. Eine Verstellung des Zündzeitpunkts ist nicht vorgesehen, der Zündzeitpunkt beträgt laut Herstellerangaben 29° vor dem oberen Totpunkt (OT).

Um den Zündzeitpunkt dennoch verändern zu können, wird eine elektronische Zündanlage entworfen. Über einen Hall-Sensor an Stelle der Magnetzündspule berechnet ein Mikrocontroller die aktuelle Kurbelwellenposition und steuert eine KFZ-Zündspule über einen Leistungstransistor an.

Abbildung 3.4 zeigt den Schaltplan der Treiberschaltung. Aufgrund der hohen Induktivität der Zündspule entsteht beim Abschalten des Leistungstransistors eine hohe Selbstinduktionsspannung, die diesen zerstören würde. Die Verwendung einer Freilaufdiode ist nicht möglich, da dem Magnetfeld der Zündspule die nötige Energie für den Zündfunken entzogen würde. Daher kommt ein IGBT-Transistor mit einer Spannungsfestigkeit von 600 V zum Einsatz. Über die Suppressordiode D3 zwischen Kollektor und Gate wird die Kollektor-Emitter-Spannung auf 400 V begrenzt.

¹Die Nennleistung der verwendeten Lichtmaschine ist unbekannt, sie beträgt vermutlich 1–2 kW.

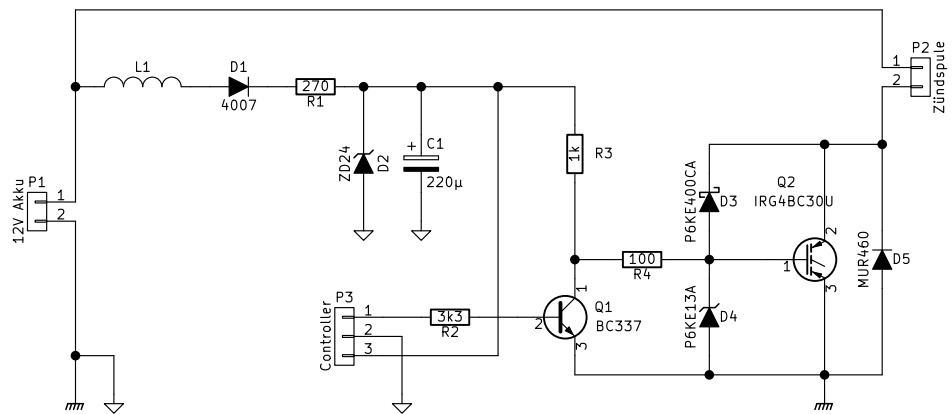


Abbildung 3.4: Schaltplan des Leistungsteils

4 Arbeitsweise des Ottomotors

Beim Viertaktverfahren laufen die folgenden vier Takte während zweier Umdrehungen der Kurbelwelle ab. Der Vorgang wiederholt sich zeitlich-periodisch.

1. Ansaugen. Der Kolben steht im oberen Totpunkt (OT) und bewegt sich abwärts. Durch den entstehenden Unterdruck strömt Gemisch (Ladung) durch das geöffnete Einlassventil in den Zylinder.
2. Verdichten. Das Einlassventil schließt. Der Kolben befindet sich im unteren Totpunkt (UT) und bewegt sich nach oben, wobei er die Ladung verdichtet. Druck und Temperatur steigen, wie das p-V-Diagramm in Abbildung 4.1 zeigt.
3. Arbeitstakt. Mit der Zündung verbrennt das komprimierte Kraftstoff-Luft-Gemisch, dehnt sich aus und treibt durch den entstehenden Druck den Kolben nach unten.
4. Ausschleiben. Das Auslassventil öffnet. Der Kolben bewegt sich nach oben und verdrängt die Verbrennungsabgase aus dem Brennraum.

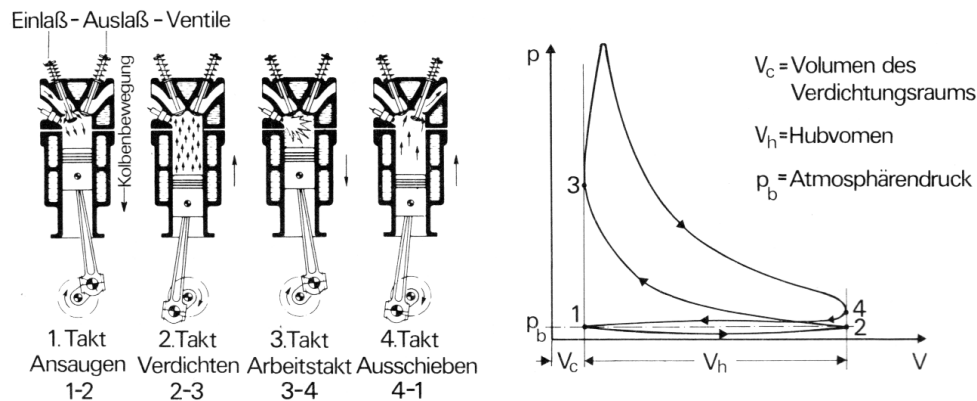


Abbildung 4.1: Viertaktverfahren [2, S. 43]

4.1 Zündung

Mit der Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches setzt dessen Verbrennung ein. Durch die Temperaturzunahme kommt es zum Druckanstieg, der den Kolben antreibt. Um die Wärme bestmöglich in mechanische Energie umzuwandeln, muss der Druck kurz nach dem oberen Totpunkt sein Maximum erreichen. [Vgl 2, S. 67]

Die Verbrennung der Ladung nimmt etwas Zeit in Anspruch. Um den Maximaldruck zum gewünschten Zeitpunkt zu erreichen, muss die Zündung um den Betrag des Zündverzugs früher erfolgen. Der Zündverzug ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Treibstoffes sowie Druck und Temperatur im Brennraum.

4.2 Gemischbildung

Das Kraftstoff-Luft-Gemisch soll im Motor möglichst vollständig und rückstandslos verbrennen, um die chemische Energie des Kraftstoffs bestmöglich auszunutzen und die Schadstoffemission zu minimieren.

Die Luftmasse, die zur vollständigen Verbrennung des Kraftstoffs mindestens notwendig ist, heißt stöchiometrische Luftmasse. Das Luftverhältnis λ gibt das Verhältnis von im Brennraum vorhandener zur stöchiometrischen Luftmasse an.

Für eine vollständige Verbrennung ist $\lambda \geq 1$ nötig. Im Benzinbetrieb stellt sich der maximale Wirkungsgrad bei einem leicht mageren Gemisch von $1,1 < \lambda < 1,2$ ein. [Vgl. 2, S. 79] Abbildung 4.2 zeigt Kraftstoffverbrauch und Nutzleistung eines Motors bei mageren, stöchiometrischen und fetten Benzin-Luft-Gemischen.

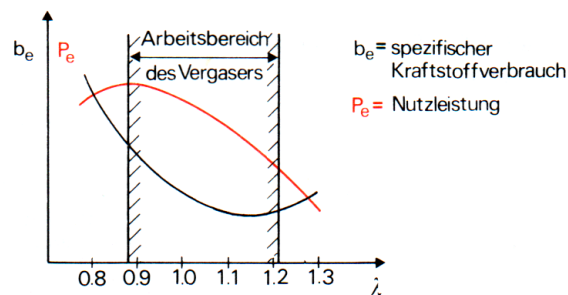


Abbildung 4.2: Kraftstoffverbrauch und Nutzleistung abhängig vom Luftverhältnis bei konstanter Drosselklappenstellung und Drehzahl [2, S. 80]

5 Messergebnisse

Die erste Messreihe wurde im Benzinbetrieb mit Vergaser und aktivem Drehzahlregler, also veränderlicher Drosselklappenstellung, aufgenommen. Als Stromquelle für die Rotorwicklung der Lichtmaschine kam ein Labornetzteil mit einer KFZ-Scheinwerferlampe als Vorwiderstand zum Einsatz.

Abbildung 5.1 zeigt Drehzahl und Drehmoment des Verbrennungsmotors. Es ist das Starten und der Leerlauf des Motors ($t < 30$ s) zusehen, dann folgen zwei Belastungstests mit halber und voller Drehzahlregler-Bowdenzugstellung.

Die Messreihe belegt die Brauchbarkeit der Messeinrichtungen für Drehmoment und Drehzahl. Im Leerlauf ist ein Klappern der Lichtmaschinenhalterung hörbar. Die zugehörige Schwingung ist in Abbildung 5.1 für $M < 200$ Nm sichtbar, die Resonanzfrequenz beträgt etwa 1,2 Hz.

Aufgrund des aktiven Drehzahlreglers gibt Messreihe nicht die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Motors zurück, sie zeigt stattdessen das Regelverhalten des Drehzahlreglers. Für das Intervall $30 \text{ s} < t < 42 \text{ s}$ zeigt Abbildung 5.2 das Motordrehmoment abhängig von der Drehzahl.

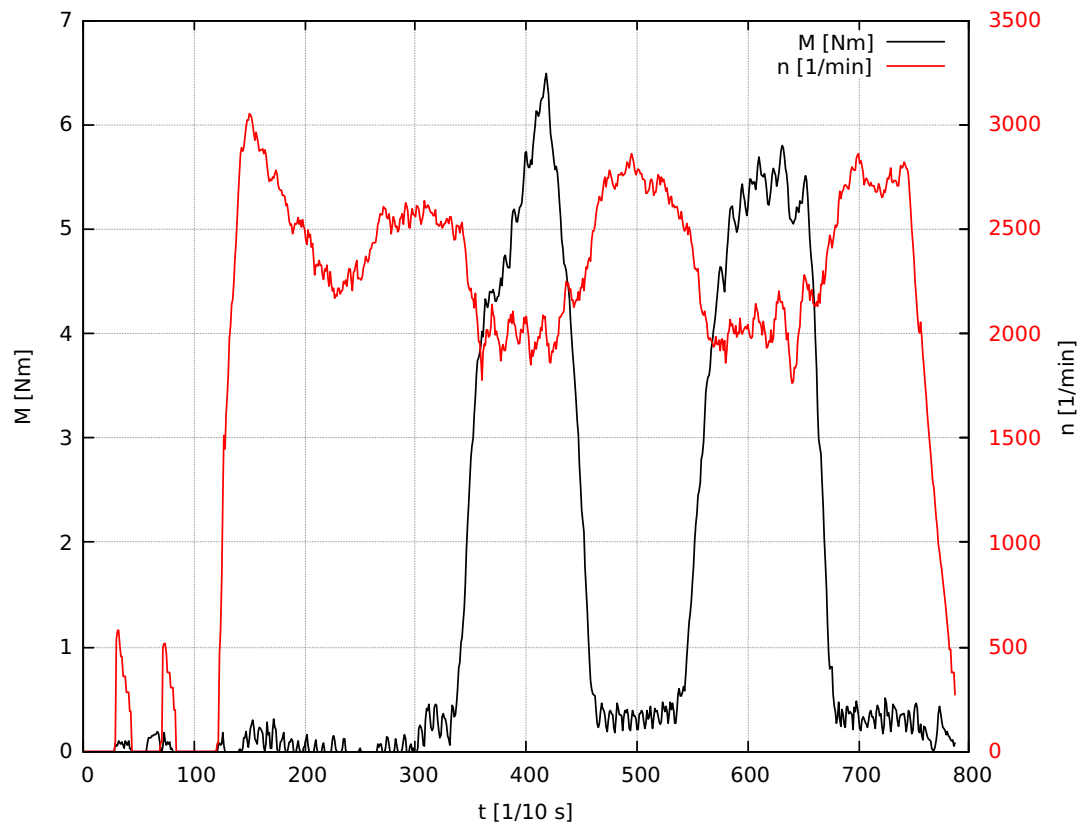


Abbildung 5.1: Drehzahl und Drehmoment bei wechselnder Belastung

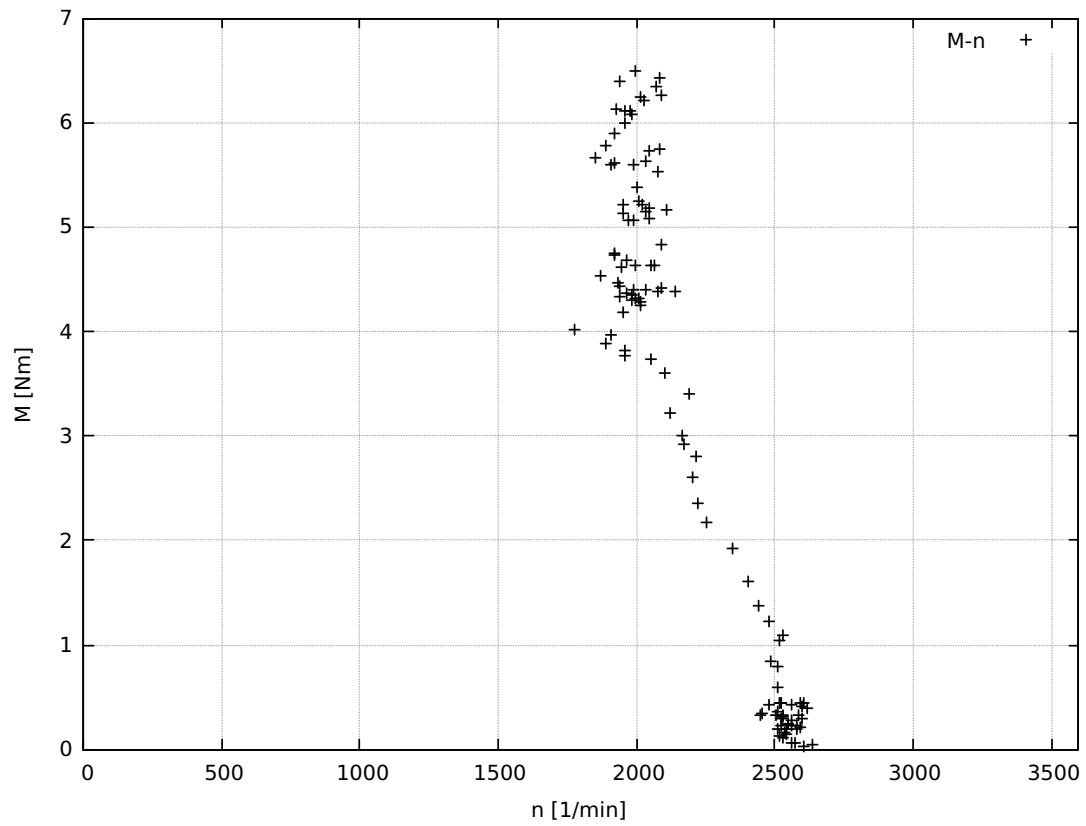


Abbildung 5.2: Drehzahl-Drehmoment-Diagramm für $30 \text{ s} < t < 42 \text{ s}$

6 Ausblick

Der nächste Schritt zur Messung von aussagekräftigen Drehzahl-Drehmoment-Messkurven liegt in der Deaktivierung des motoreigenen Drehzahlreglers. Darüber hinaus planen wir Messreihen mit Holzgas anstelle von Benzin sowie unter Verwendung der beschriebenen elektronischen Zündverstellung, deren Software sich noch in der Entwicklung befindet.

Literatur

- [1] Briggs & Stratton Corporation. *Model 20. Specifications*. URL: https://www.briggsandstratton.com/na/en_us/product-catalog/engines/racing-engines/model-20.html (besucht am 26.01.2017).
- [2] Heinz Grohe. *Otto- und Dieselmotoren*. 12. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 2000. ISBN: 3-8023-1826-9.
- [3] H. LaFontaine und F. P. Zimmerman. *Construction of a Simplified Wood Gas Generator for Fueling Internal Combustion Engines in a Petroleum Emergency*. Report. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, März 1989.
- [4] T. B. Reed und A. Das. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. Solar Energy Research Institute. U.S. Department of Energy, März 1988. URL: <http://www.osti.gov/scitech/biblio/5206099/>.