

## Datenerfassung und -auswertung für einen Kleinmotorenprüfstand

### Einleitung

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Berlin (PTB) wird an Kalibrierverfahren geforscht, um Drehmomentaufnehmer mit dynamischer Anregung zu kalibrieren. Ein typisches Einsatzgebiet von Drehmomentaufnehmern unter dynamischer Last sind Verbrennungsmotorenprüfstände der Automobilindustrie. Da aus Geheimhaltungsgründen die Automobilindustrie keine genauen Daten über entstehende Schwingungen offenlegt, hat sich die Physikalisch-Technischen Bundesanstalt eine eigene Forschungsbasis mittels eines kompletten Prüfstandes (s. Abb. 1.) geschaffen. Der Kleinmotorenprüfstand ermöglicht eine realitätsnahe Erforschung der auftretenden Schwingungen.

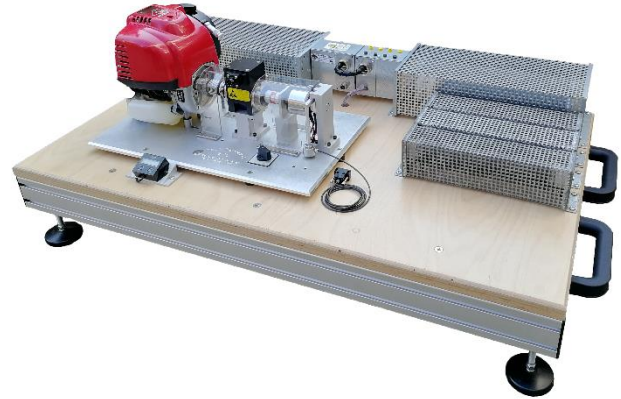


Abbildung 1: Kleinmotorenprüfstand an der PTB

### Aufgabenstellung

Durch eine vorherige Projektgruppe wurde der Kleinmotorenprüfstand bereits entwickelt, gefertigt und in Betrieb genommen. Der Einzylindermotor wurde mit einem Generator über einen Wellenstrang verbunden, in dem ein Drehmomentaufnehmer eingebracht wurde. Als alternative Erfassungsmethode des Drehmoments dient ein Kraftaufnehmer am Ende des Wellenstrangs. Zur Aufbringung eines Gegenmoments wurden fünf Bremswiderstände montiert, welche für die verschiedenen Messungen über ein Steckbrett angepasst werden können. Zudem besteht die Möglichkeit, den Messaufbau über einen Stern-Dreieck-Schalter in zwei Laststufen zu betreiben. Erste Messungen wurden über einen provisorischen Messaufbau durchgeführt und auf Plausibilität überprüft.

Aufgabenstellung des Projektes ist die Datenerfassung und -auswertung für einen Kleinmotorenprüfstand. Untersucht wird die Auswirkung der dynamischen Schwingungen auf die Sensorik. Die Erfassung und Verarbeitung der Eingangssignale erfolgt mit Hardware der Firma NATIONALINSTRUMENTS, sowie mit der dazugehörigen Softwareentwicklungsumgebung LabVIEW 2012.

Die Messerwerte werden nach der Erfassung zum Datenaustausch in Form von CSV-Dateien aufbereitet. Die automatische Messwerterfassung wird ebenfalls in LabVIEW implementiert. Die Messungen werden auf „Knopfdruck“ mehrmals wiederholt, um Informationen über die Streuung der gesammelten Messwerte zu gewinnen.

Das Drehmoment und die Drehzahl werden über einen Aufnehmer der Firma MAGTROL erfasst. Die Ausgabe des Drehmoments erfolgt über ein  $\pm 10$  V Signal. Die Drehzahl wird über einen Open-Collector-Ausgang (Rechtecksignal) zur Verfügung gestellt. Der Kraftaufnehmer der Firma HBM für die alternative Drehmomentmessung verfügt über einen Brückenausgang. Der daran angeschlossene Brückenverstärker verstärkt das Signal auf ein  $\pm 5$  V Ausgangssignal. Um den Einfluss der Bauteile wie Lager, Kupplungen etc. zu untersuchen, wird außerdem ein Rotationsvibrometer für die Messung der Schwingungen verwendet. Nach Fertigstellung der Programmierung wurde ein Testlauf durchgeführt, um die Messwertaufnahme zu prüfen. Nach erfolgreichem Probelauf begann die Messdatenerfassung. Anschließend erfolgte ein Datenaustausch mit der Software GNU Octave, welche die Daten für die Auswertung grafisch aufbereitet. Analysiert wurde ebenfalls der Frequenzinhalt der Signale.

### Programmierung in LabVIEW

Vor Beginn der Programmierung war es notwendig einen Überblick über die verwendeten Komponenten (s. Abb. 2.) zu erhalten. Es war zu ermitteln, welche Signale von den Sensoren ausgegeben werden und über welche Eigenschaften diese verfügen. Da es sich bei den Ausgangssignalen des Drehmomentenaufnehmers, des Kraftaufnehmers und des Rotationsvibrometers um analoge Spannungssignale handelt, können diese gemeinsam in einem Task aufgezeichnet werden. Bei dem Drehzahl-signal des Drehmomentenaufnehmers handelt es sich um ein Rechtecksignal, die Erfassung erfolgt in einem separaten Task für Flanken-zählungen.

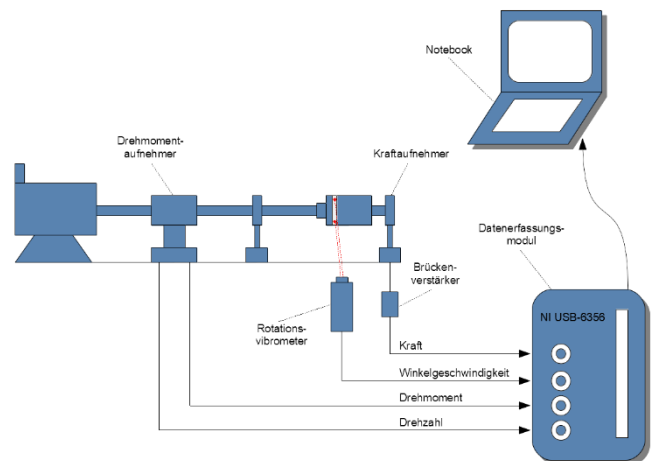


Abbildung 2: Die Anordnung der verschiedenen Sensoren im Wellenstrang mit der Verbindung zur Datenerfassungshardware

### Testlauf Motorenprüfstand

Nach Beendigung der Programmierung konnte am Motorenprüfstand getestet werden. Hierzu wurde erstmalig die Sensorik an das Datenerfassungsmodul angeschlossen. Bei der Erfassung der Signalverläufe für das Drehmoment und der Kraft traten keine größeren Komplikationen auf. Für das Drehzahl-signal des Drehmomentenaufnehmers konnten allerdings keine exakten Flanken erfasst werden. Daher wurde das Signal mit einem Oszilloskop untersucht. Es ließ sich sofort erkennen, dass die Impulse des Signals nicht eckig verliefen, sondern dem Verlauf einer Exponentialfunktion ähnelten (s. Abb. 3.).

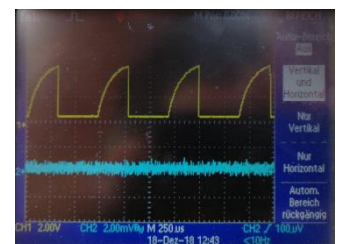


Abbildung 3: Fehlerhaftes Drehzahl-signal des Drehmomentenaufnehmers

## Problemlösung Drehzahlerfassung

Aufgrund des fehlerhaften Verlaufs des Drehzahlsignals wurde eine Ursachenforschung nach der möglichen Fehlerquelle betrieben. In einer allgemeinen Dokumentation für Drehmomentaufnehmer der Firma MAGTROL wurde eine Lösung gefunden.

Sollte der Drehmomentaufnehmer an eine Datenerfassungshardware angeschlossen werden, welche nicht von der Firma MAGTROL stammt, muss das Drehzahlsignal mit einem Pull-Up-Widerstand und einer 5 V Spannungsquelle beschaltet werden. Für Testzwecke wurde ein provisorischer Kabelstrang gesteckt. Die 5 V-Gleichspannungsversorgung erfolgt aus dem Ausgang des Datenerfassungsmoduls. Nach erneuter Untersuchung des Signals mit dem Oszilloskop, war nun ein Rechtecksignal sichtbar (s. Abb. 4.).



Abbildung 4: Rechtecksignal des Drehzahlausgangs mit Pull-Up Widerstand

Nachdem das Problem der fehlerhaften Signalform für die Drehzahl behoben wurde, konnte erneut mit der Datenerfassungshardware getestet werden. Nach wiederholter Messung war jedoch noch immer keine korrekte Drehzahl messbar. Aufgrund der erneut auftretenden Probleme wurde ein Ursache-Wirkungs-Diagramm zur Fehleranalyse erstellt (s. Abb. 5.). Als Ursache stellte sich heraus, dass Fehler in der Berechnung der Drehzahl und in den Timing-Einstellungen des Tasks für die Flankenzählung auftraten. Bei der Datenerfassung mit zwei Tasks ist es erforderlich, dass beide Tasks mit derselben Anzahl an Samples sowie derselben Sample-Rate parametrieren werden.

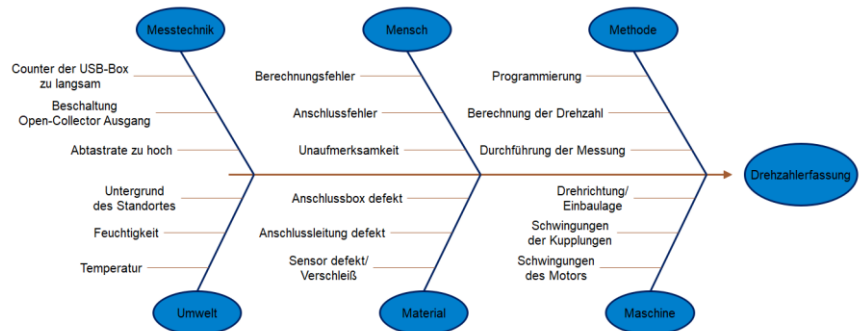


Abbildung 5: Ursache-Wirkungs-Diagramm für die fehlerhafte Drehzahlmessung

## Optionale Drehzahlerfassung

Aufgrund der langanhaltenden Probleme mit der Drehzahlerfassung über den Drehmomentaufnehmer wurde in der Zwischenzeit ein Konzept für eine optionale Drehzahlerfassung entwickelt.

Für die Auswahl der Sensorik der Drehzahlerfassung gab es einige Kriterien, die beachtet werden mussten. Zum einen sollte die Konstruktion und Umsetzung der Messmethode mit einem geringen Aufwand und ohne große Änderungen im Wellenstrang umsetzbar sein. Zum anderen sollte die Messung möglichst berührungslos mit einer hohen Genauigkeit erfolgen. Da die optionale Drehzahlerfassung kein Hauptbestandteil der Projektarbeit war, sollte sie möglichst mit geringem Kostenaufwand umsetzbar sein.

Für die Umsetzung wurden drei Konzepte in Betracht gezogen: Konzept 1- Hall-Effekt-Sensor, Konzept 2- Reflexions-Lichtschranke und Konzept 3- Gabellichtschranke. Als passende Methode der Drehzahlerfassung eignet sich die Messung mithilfe einer Reflexions-Lichtschranke. Sie kann mit einfachen Mitteln und ohne größeren Aufwand umgesetzt werden. Zudem ist sie flexibel an verschiedenen Bauteilen nutzbar (s. Abb. 6.). Da bereits in der PTB eine geeignete Reflexions-Lichtschranke in Form einer Infrarotdiode in Kombination mit einem Fototransistor vorhanden war, wurde der Aufbau auf Grundlage der Lichtschranke entwickelt. Außerdem wurde eine elektrische Schaltung konzipiert.

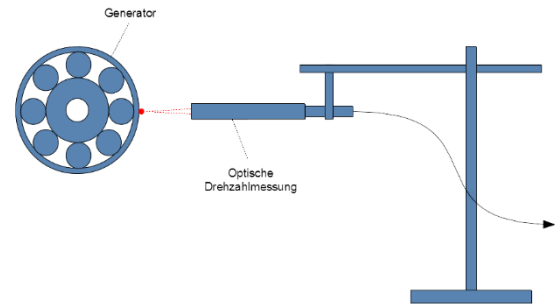


Abbildung 6: Schema des Aufbaus für die optische Drehzahlerfassung

### Programmierung GNU Octave

Nach Fertigstellung der Programmierung in LabVIEW wurde mit der Erstellung des Programmes in GNU Octave begonnen. Wie auch in LabVIEW ist es erforderlich, sich einen Überblick darüber zu verschaffen, welche Funktionen umgesetzt werden sollen.

Das Programm liest die Daten der CSV-Datei ein und führt die Berechnungen für Drehmoment und Kurbelwinkel durch. Zunächst erfolgt mit den Messdaten eine Fourier-Transformation. Anschließend werden die Ergebnisse dann in grafischer Form dargestellt und gespeichert. Diese Anwendungen laufen für jede Messung automatisiert ab. Der Anwender entscheidet, ob die Ergebnisse zusammen in wenigen Dateien oder in einer Datei für jede Messgröße ausgegeben werden.

### Messwerterfassung und Auswertung

Für die endgültige Messwerterfassung wurde eine Versuchsreihe gefahren. Hierbei wurde die Dynamik des Motorenprüfstandes in verschiedenen Bereichen untersucht. Genauer betrachtet wurde der Leerlauf und das Verhalten in Teil- und Vollast. Für die Messungen wurden jeweils zehn Wiederholungen ausgeführt, um die Streuung bewerten zu können. Es wurde der Drehzahlbereich von  $2700 \text{ min}^{-1}$  bis  $7000 \text{ min}^{-1}$  betrachtet.

Die Dynamik des Motorenprüfstandes spiegelt sich am besten im Leerlaufbetrieb sowie unter Vollast wider. Auch der Vergleich zwischen niedrigen und hohen Drehzahlen bietet eine gute Einsicht in das Verhalten des Wellenstrangs. Hierzu wurde das Drehmomentverhalten des Aufnehmers mit dem Verhalten der alternativen Drehmomenterfassung verglichen. Geschwindigkeitsänderungen wurden mit dem Rotationsvibrometer über die Messung der Winkelgeschwindigkeit erfasst.

Betrachtet wird ein Arbeitszyklus des Viertakt-Ottomotors. Dies entspricht einer  $720^\circ$ -Drehung der Kurbelwelle. Unterteilt wird der Arbeitszyklus in vier Takte. Im ersten Takt wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch angesaugt und im folgenden Takt verdichtet. Die Zündung des Gemisches erfolgt im dritten Arbeitstakt, in diesem Vorgang entstehen die größten Drehmoment- und Geschwindigkeitszunahmen. Abschließend werden die Abgase im vierten Takt wieder ausgestoßen. Besonders markant ist der Zündvorgang des Motors, hierbei wird eine Drehmomentenspitze sichtbar. Aufgrund der Drehmomentzunahme ist auch ein Anstieg im Verlauf der Winkelgeschwindigkeit ersichtlich. Die nachfolgenden Impulse sind auf die Gesamtträgheit des Wellenstranges zurückzuführen (s. Abb. 7.).

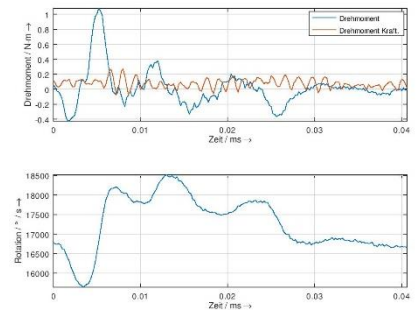


Abbildung 7: Drehmomente und Winkelgeschwindigkeit über einen Arbeitszyklus im Leerlauf

Durch die Rotation der Permanentmagnete erfolgt eine Feldverstärkung beziehungsweise eine -schwächung des magnetischen Feldes im Generator. Diese Feldänderung führt zu einer Schwankung im Gegenmoment und hat eine Welligkeit im Verlauf der alternativen Drehmomentenerfassung zur Folge.

Während sich bei der Signalauswertung für den Drehmomentaufnehmer nur das Verhalten des Viertakt-Ottomotors zeigt, wird bei der alternativen Drehmomentenerfassung über den Kraftaufnehmer ausschließlich die Dynamik des Generators sichtbar.

### Verhalten im Frequenzraum

Um den Frequenzinhalt der Signale beurteilen zu können, wurde eine Fourier-Transformation auf die Messwerte angewendet. So wurde das Frequenzspektrum sichtbar.

Da der Drehmomentaufnehmer das dynamische Verhalten des Viertakt-Ottomotors widerspiegelt, liegt das Spektrum überwiegend im Frequenzbereich von 0 Hz bis 100 Hz. Das magnetische Feld zwischen Rotor und Stator des Generators, wirkt wie eine Art Tiefpass-Filter. Daher lassen sich dynamischen Komponenten aus dem Verbrennungsprozess nicht mehr feststellen. Es sind aber ausgeprägte hochfrequente Komponenten sichtbar, die das Verhalten des Generators widerspiegeln. Dieses hochfrequente Verhalten ist auf die Frequenz der Magnetdurchläufe im Generator zurückzuführen (s. Abb. 8.).

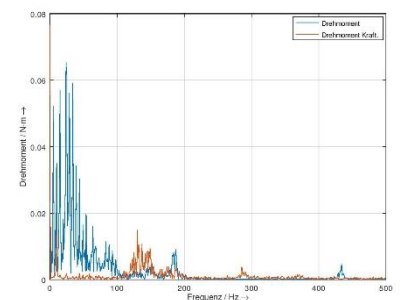


Abbildung 8: Fourier-Transformation für den Leerlaufbetrieb

### Abgasführung

Als zusätzlichen Teil der Projektarbeit wurde eine Abgasführung für den Motorenprüfstand montiert. So können Versuche auch in geschlossenen Räumen durchgeführt werden. Die Abgase strömen durch ein Schlauchsystem aus dem Gebäude.