

Blocked Force Prüfstand für mobile Anbindungen akustische Betrachtung

Robert Henneberger¹, Anian Brosch¹, Stefan Sentpali¹,

¹ Hochschule München, FK 03, Labor für Akustik und Dynamik, 80939 München, Email: robert.henneberger@hm.edu

Motivation

Die von Nebenaggregaten eingeleitete Körperschallleistung ist eine der wichtigsten akustischen Beurteilungsgrößen für den simulativen Abgleich und die Verzielung im Fahrzeug. Hierbei ergeben sich verschiedene messtechnische Möglichkeiten den Körperschall oder proportionale Feldgrößen zu erfassen. Zum einen kann die Struktur entkoppelt von der Umgebung gelagert werden (*free velocity*). Dies ermöglicht die Messung der freien Körperschallschnelle (oder Beschleunigung). Zum Anderen kann die Struktur sehr steif angebunden werden. Hierbei können die Kurzschlusskräfte ermittelt werden (*Blocked Force*). Beide Methoden stellen eine Maximalwertbetrachtung dar und bilden die tatsächlich eingeleiteten Kräfte bzw. Schnellen nicht ab. Dennoch bietet die *Blocked Force* Methode einige Vorteile, wie etwa die exakt definierbaren Messbedingungen, direkte Kraftmessung, einfacher Mess- und Prüfaufbau, so dass sich diese Messmethode in der industriellen Anwendung durchgesetzt hat.

Der hier vorgestellte Prüfstand dient der Kraftmessung von elektrischen Spindelantrieben. In Abb. 1 ist die Struktur anbindung eines solchen Antriebs rot markiert. Auf der linken Seite befindet sich eine unbewegte Bolzenanbindung. Die Spindelmutter auf der rechten Seite ist jedoch beweglich und leitet ebenfalls Energie in die angebunden Struktur ein. Aus diesem Grund wurde ein Prüfstand entwickelt, an dem beide Anbindungen inklusive Betriebslast vermessen werden können.

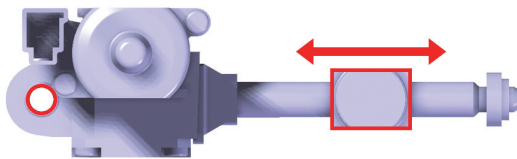


Abbildung 1: typischer Spindelantrieb mit rot markierter Struktur anbindung.

Methode der direkten Kraftmessung

Anhand eines einfachen Modells soll die Idee der Messmethode von blockierten Kräften erklärt werden. In Abb. 2 ist eine typische Prüfstandssituation fotografiert. Am linken Bildrand befindet sich die Spindel des Prüflings in der Mitte die Adaptierung (im definierten Frequenzbereich resonanzfrei ausgelegt), sowie der Kraftsensor der Fa. Kistler. Die Prüfstandanbindung ist im rechten Bildbereich zu sehen. Zur Modelbildung wurde ein Mehrkörperschwingsystemansatz (MKS) gewählt (siehe Abb. 3).

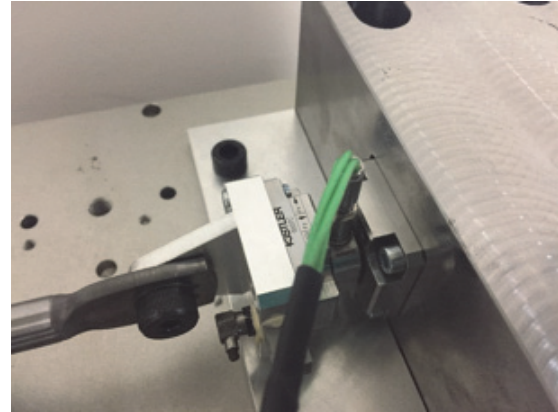


Abbildung 2: Reale Anbindungssituation bei direkter Kraftmessung am Prüfstand.

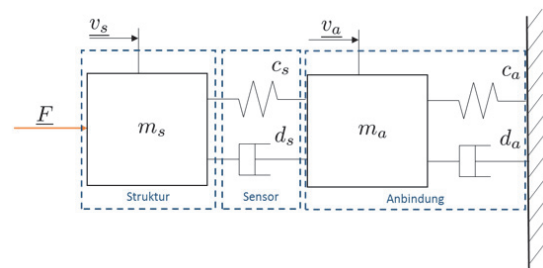


Abbildung 3: MKS Modelannahme für Struktur, Sensor und Anbindung an Prüfstand.

Folgende Annahmen wurden hierbei getroffen: Starre Körper. Es werden keine Kontinuumsbewegungen abgebildet. Die Kraftwirkrichtung ist translatorisch und geht durch den Schwerpunkt. Massen, Federsteifigkeiten und Dämpfungskonstanten sind frequenzunabhängig. Der Sensor wird masselos als Kelvin-Voigt Modell abgebildet. Zunächst wird der Zwei-Massen-Schwingers in ein elektrisches Ersatzschaltbild transformiert. Hierbei wurde die elektro-mechanische Analogie 1. Art, die sogenannten Impedanztreue, angewandt. Außerdem wird die Anbindungskraft F_a am Prüfstand zur tatsächlich anregenden Kraft F des Prüflings ins Verhältnis gesetzt. In Gl. 1 ist das Kräfteverhältnis abgebildet.

$$\frac{F_a}{F} = \frac{Z_a Z_s}{Z_{m_s} (Z_a + Z_s) + Z_a Z_s} \quad (1)$$

Freie Körperschallschnelle

Einen ersten Extremfall stellt die Messmethode der freien Körperschallschnelle (*free velocity*) dar. Hierbei wird die zu untersuchende Struktur möglichst so im Raum gelagert, dass die Anbindungssteifigkeit $Z_a = 0$ wird. Somit

wird ebenfalls $F_a = 0$ (vgl. Gl. 1). Eine Kraftmessung ist bei dieser Anbindungs- bzw. Lagerungsmethode nicht möglich. Es bietet sich die Möglichkeit der Schnelle- oder Beschleunigungsmessung nach folgender einfachen Beziehung:

$$v_s = \frac{F}{Z_{m_s}} \quad (2)$$

Blockierte Kräfte

Der zweite Extremfall wird durch die Bestimmung der blockierten Kräfte (*blocked forces*) abgebildet. Hierbei wird zunächst angenommen, dass die Steifigkeitsimpedanz Z_s des Sensors gegenüber den übrigen Massenimpedanzen (Z_{m_s} und Z_a) sehr groß ist.

$$c_s \rightarrow \infty \quad (3)$$

Übliche Sensorsteifigkeiten sind um 8 Zehnerpotenzen größer als die hier betrachteten Massen und lassen daher die Annahme aus Gl. 3 zu. Es ergibt sich nun, $v_s = v_a$ und die Ausgangsgleichung 1 vereinfacht sich zu folgendem Ausdruck:

$$\frac{F_a}{F} = \frac{Z_a}{Z_{m_s} + Z_a} \quad (4)$$

Ziel ist es am Prüfstand möglichst die tatsächliche, vom Prüfling eingeleitete Kraft F zu messen. Da die Impedanz Z_{m_s} des Prüflings nicht verändert werden kann, muss folgendes gelten:

$$\lim_{Z_a \rightarrow \infty} \frac{F_a}{F} = \lim_{Z_a \rightarrow \infty} \frac{Z_a}{Z_{m_s} + Z_a} = 1 \quad (5)$$

Diese Bedingung ist in der Realität nicht möglich und meistens unnötig. Die Frage die sich stellt ist: Wie groß muss Z_a sein, damit $F_a/F \rightarrow 1$ gilt?

In Abb. 4 ist die Beschleunigung sowie die Anbindungskraft F_a (normiert auf $F = 1$) in Abhängigkeit der Massenverhältnisse m_a/m_s dargestellt.

Reale Anbindungssituationen liegen häufig im Bereich zwischen diesen Grenzwerten der Massenverhältnisse. Die realen Schnittkräfte können beispielsweise nach [4] oder [2] berechnet werden.

Wird ein Gesamtfehler von 10 % bzw. 1 dB zugelassen, so lässt sich erkennen, dass dieser bei einem ungefährem Massenverhältnis $m_a/m_s = 10$ liegt. Der Messfehler der Anbindungskräfte F_a ist eine relative Größe und immer Abhängig von der Anbindungsimpedanz des Prüflings und des Prüfstands. Alternative Berechnungsmethoden der Blocked Forces sind in [3] beschrieben.

Wirksamkeitsnachweis am Prüfstand

Während bei der Beschreibung der *Blocked Force* Bedingung nur die Massenimpedanzen beachtet worden sind, kann am realen Prüfstand durch Bestimmung der Eingangsimpedanzen des Prüflings Z_{Mot} und des

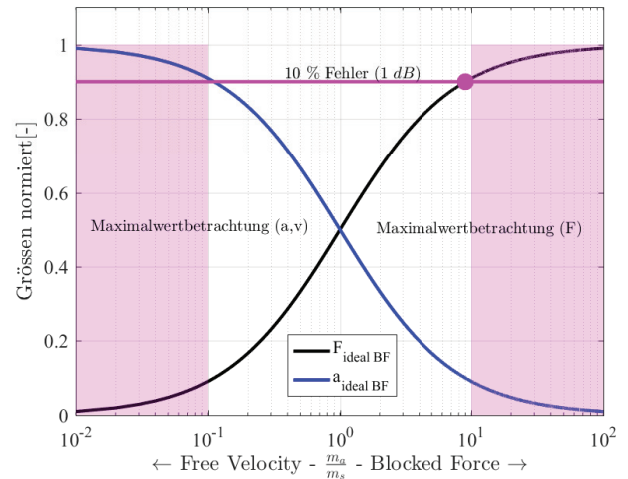


Abbildung 4: Normierte Größen über dynamisches Massenverhältnis m_a/m_s . Blaue Kurve: ideale *Blocked Force* Beschleunigung. Schwarze Kurve: ideale *Blocked Force* Kraft. Magenta: 10 % Fehlerannahme.

Prüfstandes Z_{block} die Bedingung nachgewiesen werden. In Abb. 5 sind die Impedanzverhältnisse bezogen auf die Frequenz f , als dynamische Massen dargestellt. Im Bereich zwischen 100 Hz – 200 Hz fällt auf, dass das Verhältnis (auf der passiven Prüfstandseite) unterhalb der definierten 10 % Fehlergrenze liegt. In diesem Fall kann eine erneute Fehlerabschätzung bezüglich der zu erwartenden Merkmale durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit bietet die Designanpassung hinsichtlich modaler Prüfstandsausprägungen.

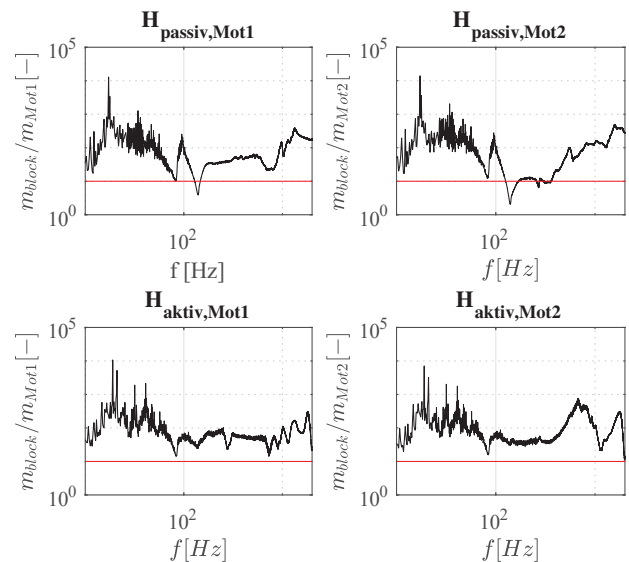


Abbildung 5: Verhältnis der dynamischen Massen m_{block}/m_{Mot} passive und aktive Prüfstandsseite. Sowie zwei Motorvarianten. Rote Linie: 10 % Fehler.

Akustische Aspekte der Prüfstandsregelung

Die Auswirkungen einer Linearmotorsteuerung sind in Abb. 6 zu erkennen. Die Wiederholgenauigkeit einer getriggerten Messung wird bei einer reinen Motorsteuerung nicht beeinträchtigt. Es sind allerdings (rechte Grafik Abb. 6) große Schwankungen den dynamischen Kräften aufgeprägt. Diese entsprechen genau einer elektrischen Periode des Linearmotors. Eine subjektive Beurteilung der Signale wäre somit nicht möglich. Die in Abb. 6 vorgegebenen Lasten betragen 0 N, 200 N und 400 N im Kraftregelbetrieb (linke Seite Abb. 6) können diese statischen Sollvorgaben sehr gut nachgebildet werden (vgl. [1]) im gesteuerten Prüfbetrieb wäre dies ebenfalls nicht möglich.

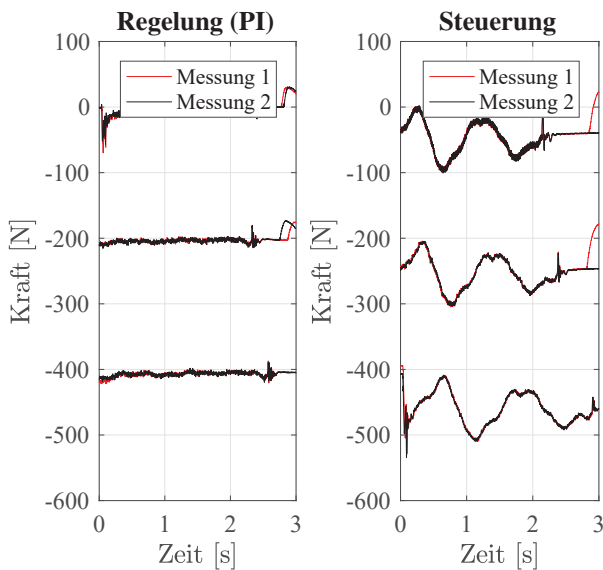


Abbildung 6: *blocked forces*, axial im Konstantlast Betrieb. Links: geregelter Betrieb. Rechts: gesteuerter Betrieb.

Merkmalsidentifikation

Der hier vorgestellte Prüfstand für Spindelantrieb ermöglicht es alle Kraftflüsse der realen Anbindung im Fahrzeug zu erfassen. Die genormten *blocked forces* aller Kraftkanäle ($i = 12$) eines Messzyklusses sind in Abb. 7 als Ordnungs-FFT dargestellt. Im folgenden wird exemplarisch gezeigt, dass eine Merkmalsidentifikation anhand der gemessenen *blocked forces* möglich ist.

Hierfür wurde exemplarisch ein Serienmuster mit einem Merkmalmuster verglichen. Ein erster Vergleich der charakteristischen 8. und 16. Ordnung in Abb. 7 deutet bereits auf einen Unterschied hin. In Abb. 8 sind die Peaks der 16. Ordnung des Serienmusters und des Merkmalmusters aller Kraftsignale dargestellt. Der Median des Serienmusters beträgt $\mu_0 = 0,065 \text{ N}$ und der des Merkmalmusters $\mu_M = 0,171 \text{ N}$. Die Messwerte zeigen, dass nicht von einer Normalverteilung der Stichprobe ausgegangen werden kann. Aus diesem Grund wurde für den Vergleich der beiden Stichproben der U-Test nach Mann-Whitney gewählt. Dieser Test basiert auf einer Rangkorrelation und ist somit stabil gegenüber Ausreißern. Für ein Kon-

fidenzintervall von $KI = 0,95$ ergab der Test $p = 0,03$ ($n = 48$). Dieser Wert ist kleiner als der Alphafehler erster Ordnung, wobei die Nullhypothese $H_0 : \mu_0 = \mu_M$ verworfen werden kann. Die Mediane unterscheiden sich also signifikant. Die Effektstärke entspricht mit $r = 0,31$ einem mittleren Effekt.

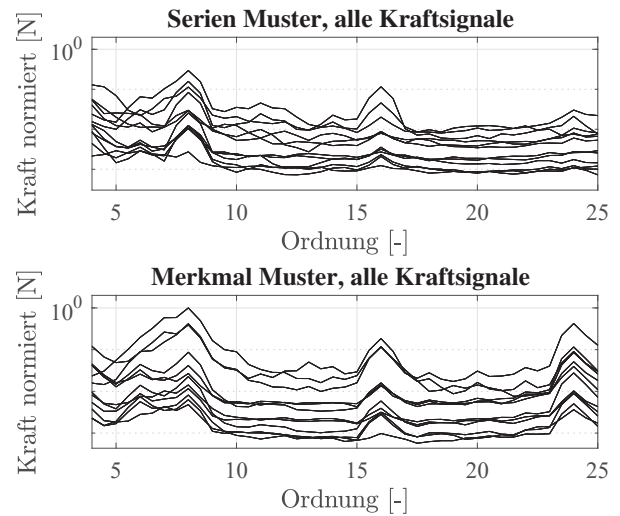


Abbildung 7: Ordnungsspektrum aller Kräfte bei geregelter Konstantlast 400 N. Oben: Serienmuster. Unten: Merkmalmuster.

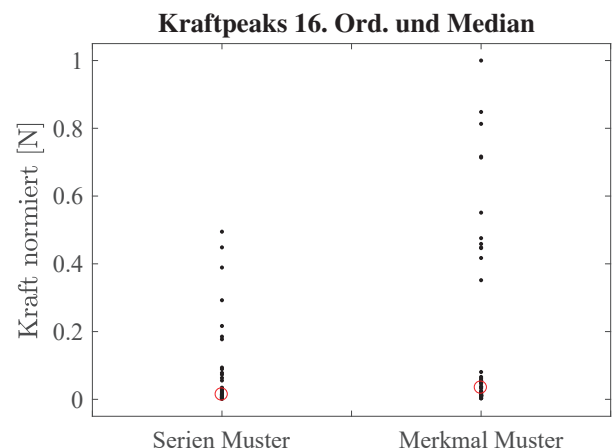


Abbildung 8: Schwarz: Kraftpeaks der 16. Ordnung aus Fig. 7. Rot: Median für jedes Muster ($n = 48$).

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde, aufbauend auf den regelungstechnischen Aspekten aus [1], die direkte Messmethode der *blocked forces* beschrieben. Anhand dieser wurden die Maximalwertbetrachtungen *free velocity* und *blocked force* erläutert. Weiterhin wurde eine Messfehlerabschätzung in Abhängigkeit der Anbindungssteifigkeiten definiert. Die *blocked force* Bedingung wurde am Prüfstand auch für mobile Anbindungen nachgewiesen. Unter Zuhilfenahme eines statistischen Stichprobenvergleichs wurde exemplarisch eine Merkmalsidentifikation durch alle Kraftsignale gezeigt.

Anerkennung

Die Autoren bedanken sich für den kreativen Austausch mit Herrn Otto Brass und Mark Unverhau. Einen speziellen Dank an Herrn Marcus Schulz und Gerd Knöpfel für die Unterstützung im gesamten Projekt. Ein weiterer Dank gilt den Herren Simon Hecker und Dominik Schubert für den Support bei regelungstechnischen Fragen.

Literatur

- [1] Brosch, A. et al., Blocked Force Prüfstand für mobile Anbindungen, regelungstechnische Betrachtung, DAGA 2017 Kiel
- [2] de Klerk, D., Rixen, D. J., Voormeeren, S. N., General framework for dynamic substructuring: History, review and classification of techniques. AIAA Journal, 46(5):1169-1181, 2008 1181, 2008
- [3] Alber, T. et al., Independent characterization of structure-borne sound sources using the in-situ blocked force method, Internoise 2016, Hamburg
- [4] Sinambari, Gh. R., Sentpali, S.: Ingenieurakustik, 5. Auflage, Schallpfadmodellierung durch Übertragungsmatrizen (Kap.11), Springer Vieweg, 2014