

# Prüfstand zur reproduzierbaren Beurteilung körperschallinduzierter Geräusche von elektrisch verstellbaren Lenksäulen

Robert Henneberger<sup>1</sup>, Stefan Sentpali<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule München, 80335 München, Deutschland, Email: robert.henneberger@hm.edu, stefan.sentpali@hm.edu

## Motivation

Um die Luft- und Körperschalleinträge in das Fahrzeug beurteilen zu können, ist es notwendig die mechatronischen Komponenten im realen Betrieb zu vermessen. Für Qualitätsuntersuchungen oder Schallemissionsprognosen in der frühen Entwicklungsphase werden hierbei dynamische Kraftmessungen an den Anbindungspunkten zur Karosserie heran gezogen. Dafür eignen sich unter anderem Prüfstände, mit denen unter *Blocked Force* Bedingungen gemessen werden kann. Diese bieten zudem den Vorteil der standardisierten Messbedingungen [1]. Bei dem hier konstruierten Prüfstand wurden die Kraftsensoren so integriert, dass bei einem Lenksäulenwechsel die Sensoren im verspannten und somit kalibrierten Zustand verbleiben (Abb. 1).

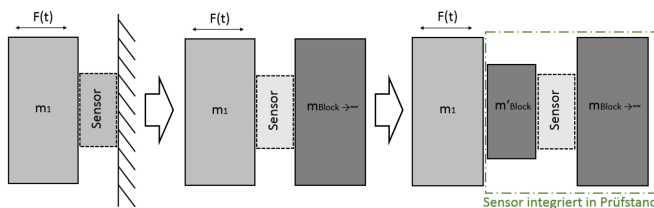


Abbildung 1: Schematische Darstellung ideales Festlager, realer Prüfstand, Prüfstand mit integrierter Sensorik

## Untersuchung

### Wirksamkeitsnachweis des Prüfstandes

Da die Kraftsensoren nicht unmittelbar an den Krafteinleitungspunkten der Lenksäule sitzen, muss gewährleistet werden, dass die Vorspanneinrichtung keinen Einfluss auf die Messungen hat. Dies kann durch Identität der eingeleiteten Kraft zur gemessenen Reaktionskraft des Prüfstandsensors nachgewiesen werden (Gl. 1).

$$H_{impact/reaction}(f(x, y, z)) \rightarrow 1 \quad (1)$$

Abb. 2 zeigt die Vorspanneinrichtung am Prüfstand. Die Energieeinleitung erfolgte mit einem Impulshammer bis ca. 1400Hz auf der Schnittstellenebene zwischen Lenksäule und Prüfstand. Der Impuls wurde in alle drei Raumrichtungen eingeleitet. Die Übertragungsfunktionen wurden für alle 4 Kraftsensoren ermittelt.

In Abb. 3 sind exemplarisch die gemittelten ( $n=5$ ) Übertragungsfunktionen für zwei Sensoren abgebildet. Deutlich zu erkennen ist der verlustfreie Verlauf nahe

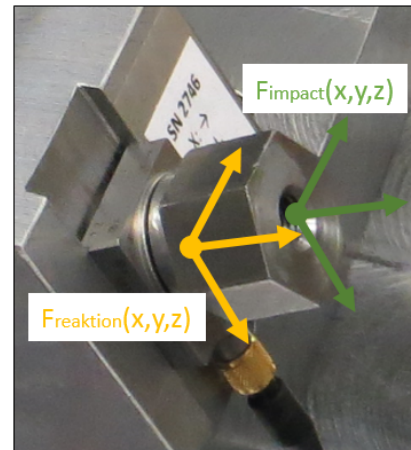


Abbildung 2: Vorspanneinrichtung des Prüfstands mit Sensor und Hammer Koordinatensystem

1 bis ca. 1000 Hz. Im Bereich um 1100 Hz sind deutlich die ersten Prüfstandseigenfrequenzen sichtbar. Dieser Bereich stellt die obere nutzbare Frequenzgrenze des Prüfstands dar.

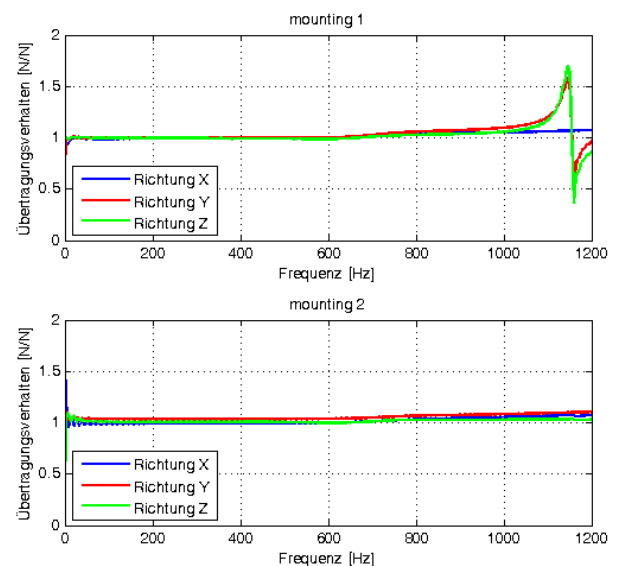
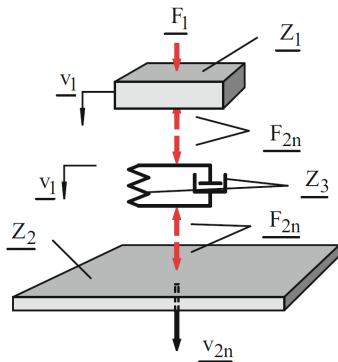


Abbildung 3: lineare Übertragungsfunktionen für zwei Befestigungspunkte

### Auslegungstheorie *Blocked Force*

Um der Methode der Maximalkräfte gerecht zu werden, muss sichergestellt sein, dass das Verhältnis aus Fundamt- und Strukturimpedanz groß genug ist, um

die maximale Reaktionskraft messen zu können. Hierfür dient der Modellansatz der krafterregten Struktur bei elastischer Ankopplung (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Kraftanregung einer Struktur bei elastischer Ankopplung [2].

Für die Körperschallisolation durch eine elastische Zwischenschicht lässt sich nach [2] folgende Gleichung aufstellen.

$$\frac{F_1}{F_2} = 1 + \frac{Z_1}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2} \quad (2)$$

hierbei sind:

- komplexe Kraft  $F$
- Schwinggeschwindigkeit  $v$
- komplexe mechanische Impedanz  $Z$

Unter der idealen Annahme, dass die Verbindung zwischen  $Z_1$  und  $Z_2$  unendlich steif ist, muss gelten:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} Z_3 = \frac{k}{j\omega} = \infty \quad (3)$$

Somit vereinfacht sich Gl. 3 zu:

$$\frac{F_1}{F_2} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \quad (4)$$

Wenn weiterhin gilt, dass die eingeleitete Kraft der gemessenen Reaktionskraft entspricht, dann muss die Fundamentimpedanz unendlich groß werden. Dies entspricht der idealisierten *Blocked Force* Bedingung (vgl. Gl. 5).

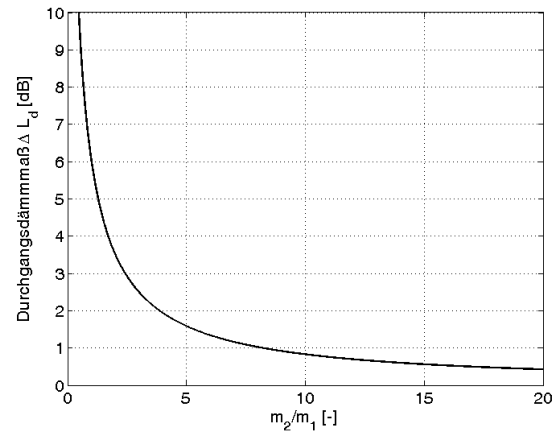
$$\frac{F_1}{F_2} = 1 \Rightarrow Z_2 \rightarrow \infty \quad (5)$$

Diese ideale Annahme lässt sich in der Praxis nur näherungsweise erreichen. Für die in Abb. 4 dargestellte Modellannahme kann nach [2] das Durchgangsdämmmaß  $\Delta L_d$  wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta L_d = 20 \log \left( 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad \text{dB} \quad (6)$$

Bei einer idealen, unendlich steifen Anbindung gegen eine unendlich große Fundamentimpedanz  $Z_2$  wird  $\Delta L_d = 0$ . In Abb. 5 ist das Durchgangsdämmmaß aus Gl. 6 über dem Masseverhältnis von Fundamentmasse zu Anschlussmasse aufgetragen. Bei der idealen Prüfstandsanbindung möchte man die komplette

Körperschalleistung der Quelle durch die messbare Fundamentkraft repräsentieren. Dies bedeutet, dass die Dämmung zwischen der Quellkraft  $F_1$  und der Sensorkraft am Prüfstand  $F_2$  praktisch vernachlässigbar sein soll. Dies wird oft schon erreicht, wenn die dynamische Masse des Fundamentes 10 mal größer ist als die dynamische Masse des Anschlusses der Schallquelle. Die reale

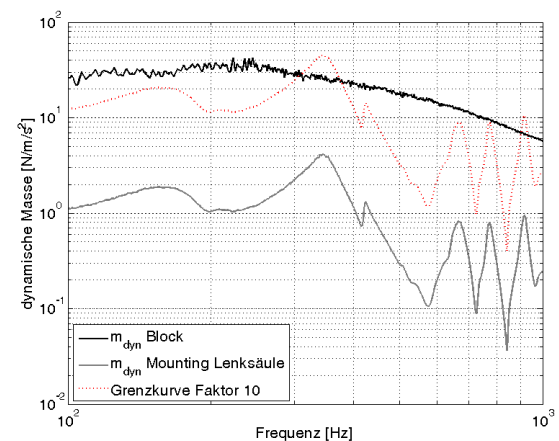


**Abbildung 5:** Durchgangsdämmmaß in Abhängigkeit der Massenverhältnisse

mechanische Eingangsimpedanz lässt sich nach [2] wie folgt abschätzen:

$$|Z| \approx \omega m_{dyn} \quad (7)$$

Nach Gl. 7 kann für die Abschätzung von Gl. 6 die Messung der dynamischen Massen herangezogen werden. Abb. 6 zeigt den Verlauf des Durchgangsdämmmaß aufgetragen über dem Verhältnis zwischen der dynamischen Massen des Prüfstandes und der Lenksäulenanbindung. Die rote Kurve markiert den Faktor 10 ( $\Delta L_d < 1 \text{ dB}$ ) der Impedanz der Lenksäulenanbindung. Im Bereich um 350 Hz und 900 Hz wird die Bedingung nicht erfüllt. In allen übrigen Bereichen ist das Durchgangsdämmmaß hinreichend klein.



**Abbildung 6:** dynamische Masse Prüfstand (schwarz), Lenksäulenanbindung (grau) und Grenzkurve (rot)

## Merkmalsidentifikation Drehzahl

Um elektrisch verstellbare Lenksäulen mit Hilfe der vier Schnittstellenkräfte zwischen Lenksäule und Karosserie beschreiben zu können, muss eine Merkmalsänderung an der zu untersuchenden Lenksäule ebenfalls im Kraftspektrum am Prüfstand wieder zu finden sein. Hierfür wurde die Lenksäule jeweils mit 10 Volt bzw. 13 Volt betrieben und der Frequenzbereich der charakteristischen 8. Ordnung ( $\pm 0,08$  Ord.) der Motordrehfrequenz als Merkmal ausgewählt. In oberen Bereich von Abb. 7 ist die Summenkraft eines Messzyklus abgebildet. Aus diesem Signal lässt sich nicht eindeutig Beginn und Ende der vier Verstellstufen bestimmen. Im unteren Bereich von Abb. 7 ist die 8. Ordnung der Verstellmotordrehzahl im Stromsignal dargestellt. Diese ermöglicht es den reinen quasi stationären Verstellweg für die Mittelwertbildung zu finden und somit Anlauf und Anschlageneffekte auszuschließen.

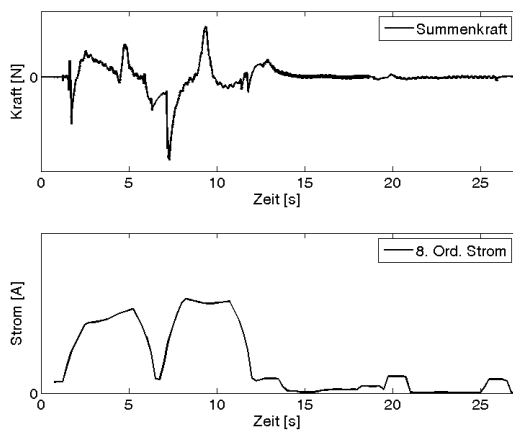


Abbildung 7: oben: Summenkraft über einen Messzyklus, unten: 8. Ord. des Motorstroms

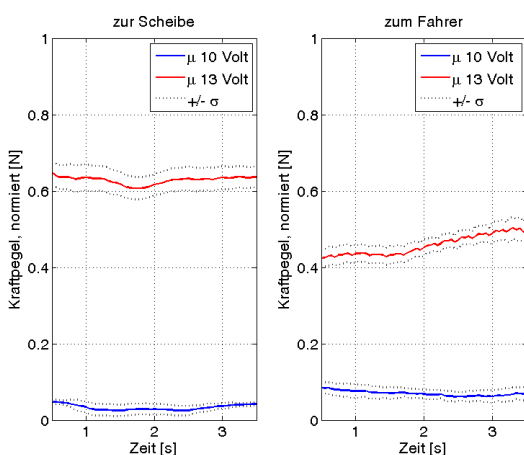


Abbildung 8: gemittelter Kraft-Zeit Verlauf geschnitten, links: zur Scheibe, rechts: zum Fahrer

Abb. 8 zeigt exemplarisch für eine Verstellstufe die geschnittenen und gemittelten Kraft-Zeit Verläufe. Abgebildet sind jeweils das arithmetische Mittel ( $n=9$ ) sowie die Standardabweichung bei einer Bestromung von 13 V

bzw. 10 Volt. Der Einfluss der Drehzahländerung ist im Ordnungs-Zeitverlauf signifikant wieder zu finden. Der Prüfstand bildet den Einflussfaktor der Ordnungsvariation ab. In [1] sind weitere Einflussfaktoren untersucht worden.

## Zusammenfassung

Es wurde ein Prüfstand zur Messung der maximalen Anbindungskräfte von elektrisch verstellbaren Lenksäulen entwickelt. Weiterhin wurden 3 Annahmen aufgestellt um die Wirksamkeit des Prüfstandes und die *Blocked Force* Bedingungen zu überprüfen. Es wird der Nachweis des neutralen Übertragungsverhaltens der Sensorvorspanneinrichtung erbracht. Hierbei wird gezeigt, dass diese keinen Einfluss auf die Messung der Schnittstellenkraft hat. Außerdem zeigt sich eine obere nutzbare Grenzfrequenz von 1kHz, welche zur Beurteilung des E-Motor ausreicht.

Die Auslegungstheorie der Körperschallisolation mit unendlich steifer Feder kann auch zur analytischen Beschreibung der Bedingung für *Blocked Force* verwendet werden.

Mit dem vorgestellten Prüfstandskonzept kann der Nachweisbarkeit eines akustischen Merkmals (z.B. Drehzahländerung) der Verstellmotoren erbracht werden.

## Literatur

- [1] Brass, O.: VAP Verstellmotoren-Akustik-Prüfstand, SIMVEC 2014
- [2] Sinambari, Gh. R., Sentpali, S.: Ingenieurakustik, 5. Auflage, Kap.2.4, Springer Vieweg, 2014