

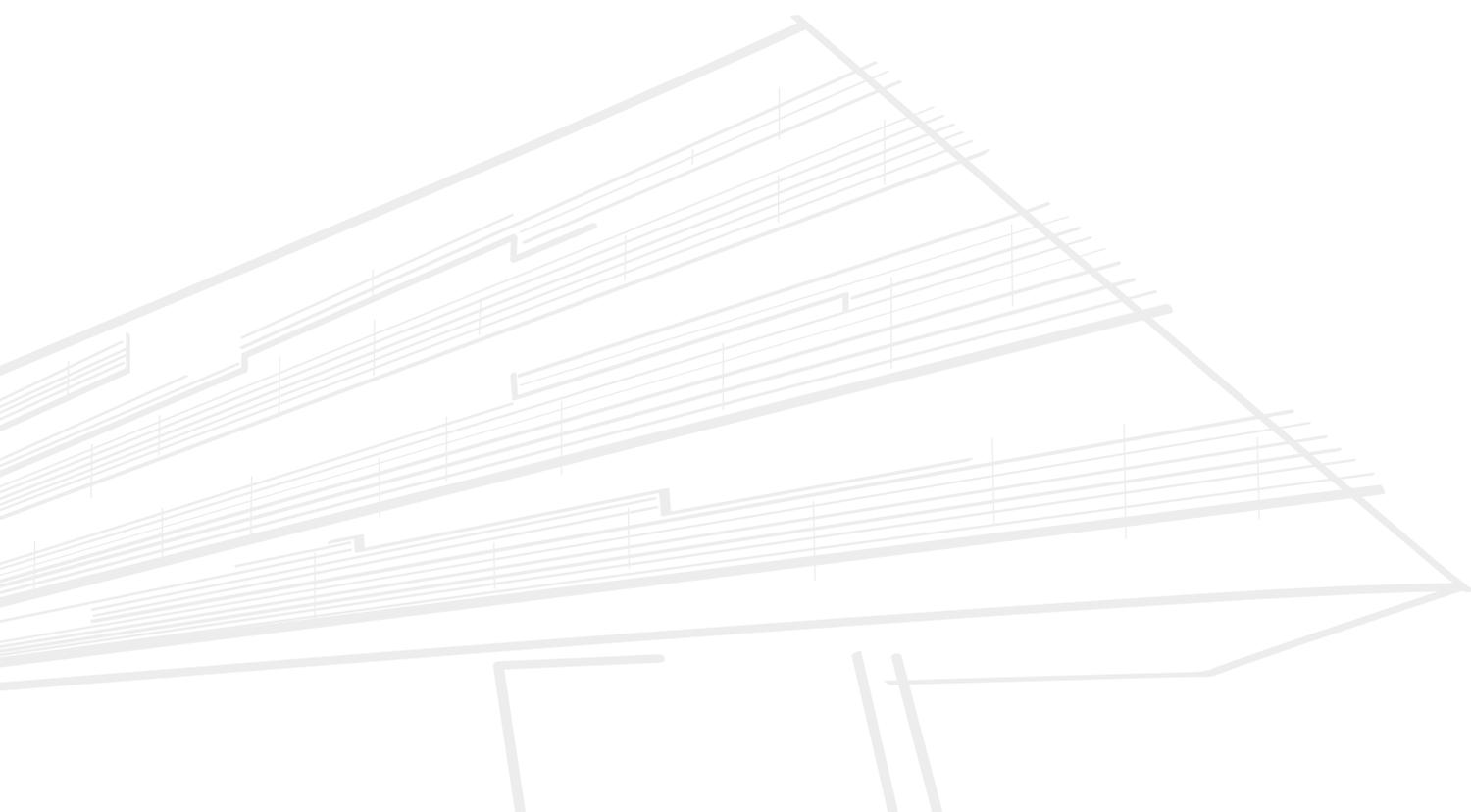
SCHWINGUNGSPROBLEME

Whitepaper

www.lcm.at

INHALT

Wie man Schwingungsprobleme lösen kann.	3
Schwingende Struktur (inklusive passiver Dämpfung)	4
Anregung (inklusive aktiver Dämpfung)	5
Wechselbeziehung oder Systemansatz	6
Schlussfolgerung	6
Kontakt	6



Impressum

Herausgeber Linz Center of Mechatronics GmbH **Adresse** Altenberger Straße 69, 4040 Linz, Austria **Telefon** +43 (0)732/2468–6002
Fax +43 (0)732/2468–6005 **E-Mail** office@lcm.at **Web** www.lcm.at **Blattlinie** Technische Informationen und News aus Forschung und
(Produkt)Entwicklung



WIE MAN SCHWINGUNGSPROBLEME LÖSEN KANN.

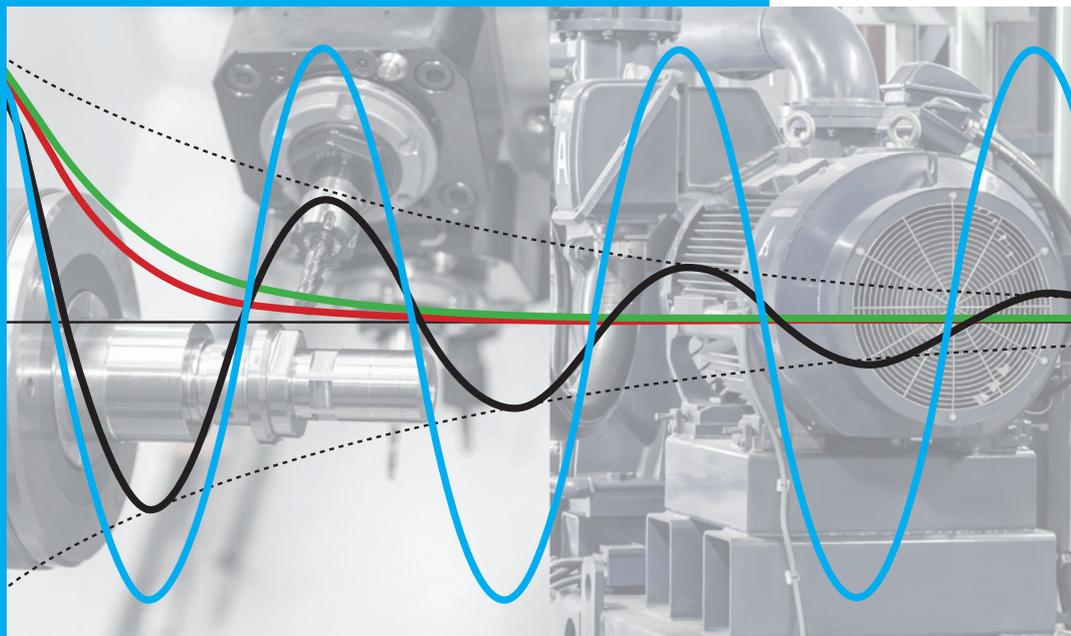


Foto: shutterstock / weerasak saeku und CoolKengzz

■ Kürzere Zykluszeiten und Leichtbau auch im klassischen Maschinen- und Anlagenbau führen oft zu einer Zunahme unerwarteter mechanischer Schwingungen. Je nach Anwendung können diese Schwingungen zu Qualitätsproblemen, Lärm oder sogar sicherheitsrelevanten Schwingungen von Gebäuden führen.

In diesem kurzen Whitepaper wird ein grundlegender Leitfaden zur Lösung oder Vermeidung von Schwingungsproblemen vorgestellt. Dieses Papier erklärt die zwei Hauptfaktoren für Vibrationen

- Schwingende Struktur (Steifigkeit, Eigenfrequenzen, passive Dämpfung, ...)
- Anregung (periodisch, Impuls, aktive Dämpfung, ...) und ihre Beziehung zueinander.

DIE SCHWINGENDE STRUKTUR

(einschließlich passiver Dämpfung)

■ Jede mechanische Struktur besitzt so genannte Eigenfrequenzen, in denen sie zum Schwingen neigt. Diese Frequenzen hängen hauptsächlich von der mechanischen Beschaffenheit/Konstruktion der Struktur (Masse, Länge, Dicke ...) sowie den verwendeten Materialien ab; wenn Sie zum Beispiel auf eine Glocke schlagen, werden Sie ihre erste Eigenfrequenz hören. Jede dieser Frequenzen bezieht sich auf eine Schwingungsform (Schwingungsmode), sprich, die geometrische Beschreibung der Bewegung.

Wenn eine Struktur zum Schwingen angeregt wurde und die Anregung entfernt wird, nimmt die Schwingung durch die Dämpfung mit der Zeit ab. Bei stärkerer Dämpfung nehmen die Schwingungen rascher ab und die Schwingungsamplituden sind kleiner, selbst wenn die Anregung dauerhaft vorhanden ist.

Geht man von der grundlegenden Beziehung aus, dass die erste Eigenfrequenz

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$$

hauptsächlich von der Steifigkeit „c“ und der Masse „m“ abhängt, so ist es möglich, mechanische Strukturen so zu gestalten, dass sie in einem bestimmten Frequenzbereich möglichst schwer zu Schwingungen angeregt werden können. Nimmt die Masse (m) zu, hilft das in der Regel, Schwingungen bei hohen Frequenzen zu vermeiden. Nimmt jedoch die Steifigkeit (c) zu, erhöht dies die Eigenfrequenzen.

Lässt sich die Anregung nicht verändern, so muss man die Struktur verändern, um Schwingungen zu verringern.

Kennen Sie die Anregung oder die geplanten Betriebsbewegungen bereits, sollten Sie diese Informationen unbedingt in den Konstruktionsprozess miteinbezie-

hen. Gestalten Sie die Anlage so, dass diese Anregung keine unerwünschten Vibrationen verursachen.

Simulationen helfen ungemein, schwingfähige Strukturen zu erkennen und zu verbessern. Typische grundlegende Untersuchungen sind hier z.B. Modalanalyse, Betriebsschwingungsanalyse oder harmonische Analysen, die oft bereits in der Tool-Landschaft der CAD-Programme integriert sind. Als Ergebnis erhält man hier beispielsweise Eigenfrequenzen oder Wasserfalldiagramme.

In einigen Fällen sind jedoch komplexere Simulationen notwendig, um zum Beispiel die Wechselwirkung der mechanischen Struktur mit elektronischen Komponenten, Flüssigkeiten, komplexen Lagern oder der Steuerung des Systems zu analysieren.

In vielen Fällen existiert die mechanische Struktur oder Maschine bereits und das Schwingungsproblem soll anschließend mit einem „Add-on“ gelöst werden. Lässt sich dieser Worst-Case nicht durch eine Änderung der Anregung lösen, sind verschiedene mechanische Lösungen möglich. Die einfachste Maßnahme wäre, die Dämpfung oder die Masse zu erhöhen. Feder-Masse-Dämpfer können zur Dämpfung bestimmter Einzelfrequenzen ausgelegt werden, während passive Dämpfungselemente wie Dämpfungsmatten oder Gummielemente für einen breiteren Frequenzbereich geeignet sind.

Falls sich die Anregung ändert, können adaptive Dämpfungsvorrichtungen nötig werden. Dann werden die Schwingungen mit Sensoren gemessen und die passive Dämpfung wird angepasst, um z.B. die Eigenfrequenz zu verändern. Für jeden dieser „Add-ons“ ist entscheidend, die schwingende Struktur und die Anregung zu verstehen. Wenn keine Simulationsmodelle verfügbar oder geeignet sind, sind Messungen eine gute Option. Abhängig von der konkreten Anlage und dem Vorwissen können diese Messungen z.B. Modalanalyse, Betriebsschwingungsanalyse oder Schallquellenortung sein. ■

DIE ANREGUNG

(einschließlich aktiver Dämpfung)

■ Mechanische Strukturen benötigen eine Anregung, um in Schwingung zu geraten. Fehlt diese, gibt es auch keine Schwingung. Klassische Beispiele für periodische Anregungen sind marschierende Soldaten auf einer Brücke, unwuchte Rotoren in Motoren oder periodische Bewegungsprofile in Pick- and Place-Anwendungen. Klassische Beispiele für impulsförmige Anregungen sind das Anschlagen einer Glocke, Stanzvorgänge oder der harte Kontakt eines Werkzeugs auf einem Werkstück. Periodische Anregungen regen Schwingungen „nur“ mit dieser einen Frequenz an. Außerdem erfolgt die Anregung mit Vielfachen dieser Frequenz, so genannte „Obertöne“. Die Impulsanregung regt theoretisch alle Frequenzen an.

Ist es möglich kritische Anregungen zu vermeiden, braucht es keine Änderungen an der schwingfähigen Struktur oder eine zusätzliche Dämpfung.

Bei periodischen Anregungen reduziert in vielen Fällen bereits eine kleine Änderung der Frequenz die Schwingungen deutlich, da die Anregungs-Frequenz nicht mehr einer Eigenfrequenz der schwingfähigen Struktur entspricht. Man spricht hier von der so genannten „Verstimmung“. Ist es notwendig mit Frequenzen oberhalb einer kritischen Frequenz zu arbeiten (überkritischer Betrieb), ist es wichtig, diesen Betriebsbereich beim Anfahren und Abbremsen schnell genug zu passieren. Für diesen Fall gibt es geeignete Steuer- und Regelkonzepte.

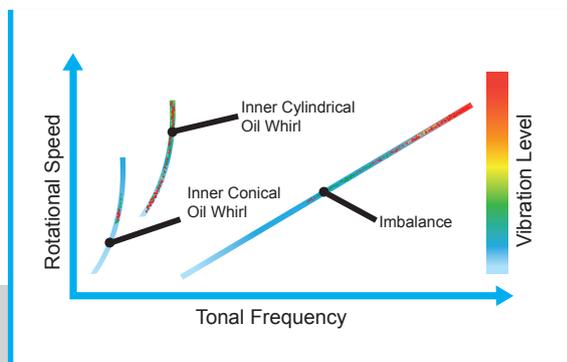
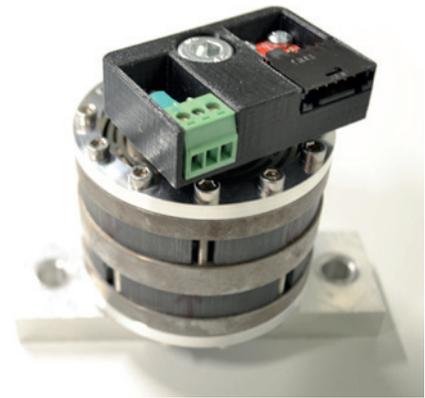


Figure 1: Schwingungsfrequenz und -pegel hängen stark von der Anregung ab, z. B. der Drehzahl eines Motors.



Elektromagnetischer Schwingungsdämpfer
Foto: LCM

Ein Standardansatz in der Robotik – in anderen Branchen aber noch unüblich – ist, durch geeignete, sanfte (glatte) Bahnen bewegter Maschinenteile, unerwünschte (Impuls-) Anregungen zu vermeiden. Es genügt nicht, bloß Sprünge in der gewünschten Geschwindigkeit oder Beschleunigung zu vermeiden, sondern auch im „Ruck“, also der ersten Ableitung der Beschleunigung.

Oft ist es jedoch nicht möglich (oder zulässig) Änderung an der Regelung der Anlage vorzunehmen und die Anregung dadurch zu verändern. Wenn auch konstruktive Änderungen an der Struktur nicht möglich sind, dann kommt aktive Schwingungsdämpfung als Lösung in Frage. Abhängig vom Frequenzbereich und den erforderlichen Amplituden verwendet man unterschiedliche Aktuatorkonzepte, wie zum Beispiel elektrodynamisch, piezoelektrisch, Lautsprecher, ... Diese Aktuatoren erzeugen Kräfte, die unerwünschten Anregungen entgegenwirken oder die Vibrationen an gewünschten Positionen der Struktur dämpfen. Aktive Schwingungsdämpfung erfolgt in der Praxis durch unterschiedliche Regelkonzepte, abhängig von der Art der Anregung (Impuls, periodisch, Einzelfrequenz, Breitband, ...) und der schwingenden Struktur. ■

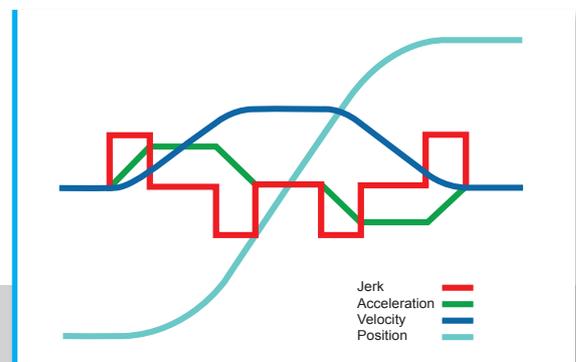


Figure 2: Typische Trajektorie mit Sprüngen im Ruck (erste Ableitung der Beschleunigung)

Quelle: Autopilot, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46643265>

WECHSELWIRKUNGEN ODER SYSTEMANSATZ

■ Sind die für den ursprünglichen Prozess notwendigen und vorhandenen Aktuatoren auch für die Schwingungsdämpfung zugänglich, kann die Gesamtleistung deutlich verbessert werden. Bewegungsprofile können so ausgelegt werden, dass sie nicht nur unerwünschte Anregungen grundsätzlich vermeiden (Feedforward), sondern auch aktiv zur Dämpfung von Schwingungen beitragen (Feedback). Je nach Komplexität der schwingenden Struktur wird das als einfache Ergänzung im ursprünglichen Regelgesetz oder zum Beispiel als maßgeschneiderte modellbasierte Regelung realisiert. Mit diesem Systemansatz ist es möglich, die Masse

und Steifigkeit der schwingenden Struktur zu reduzieren und damit eine höhere Geschwindigkeit bei gleichzeitig geringerem Energieverbrauch zu erreichen als mit herkömmlichen „starr“ Lösungen. Die resultierenden Genauigkeiten (z. B. der Trajektorie) bleiben mit dem Originalsystem mindestens vergleichbar. Reduziert man die Steifigkeit beispielsweise eines Manipulators, so senkt man auch unerwünschte mechanische Effekte (Vibration, Verschleiß, Lärm, ...) – zum Beispiel, wenn sich ein mechanischer Kontakt schließt, wie etwa beim Anfahren eines Werkstücks mit einem Werkzeug oder bei einem Endanschlag. ■

FAZIT

■ Um eine geeignete Lösung zu finden, sollten Sie als kurze Abschätzung die folgenden Fragen beantworten:

- Ist das Wissen über die schwingende Struktur und die Anregung ausreichend?
NEIN: Zusätzliche Simulationen oder Messungen
- Ist es möglich, die schwingende Struktur zu verändern?
NEIN: Sie müssen die Anregung ändern (inkl. aktiver Dämpfung).
- Ist es möglich, die Anregung zu ändern?
NEIN: Sie müssen die Konstruktion ändern (inkl. passive Dämpfung).
- Ist es möglich, die vorhandenen Aktuatoren zu verwenden?
JA: Gute Möglichkeit die Gesamtleistung zu verbessern
NEIN: Ein nachträgliches Add-On ist notwendig.

KONTAKT

DI Daniel Reischl, MLBT
Team Leader Adaptronics
Area Mechanics & Control
+43 (0)732 / 2468 – 6126
daniel.reischl@lcm.at



Foto: privat