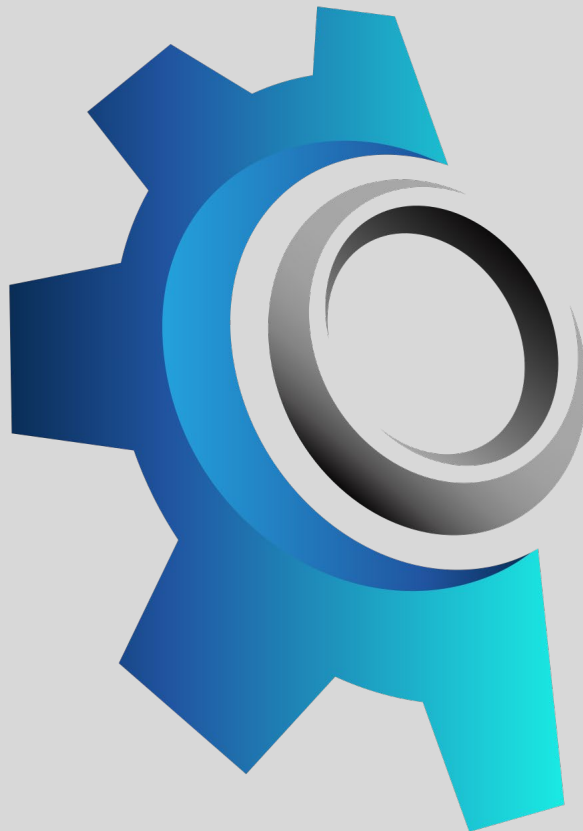


Tagungsband



TESTRIG

Interdisziplinäre Fachkonferenz zum Bau und Betrieb von Prüfständen

Universität der Bundeswehr München

Neubiberg

11./12.03.2026

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Kuttner, Universität der Bundeswehr München

ISBN 978-3-98997-007-6

DOI 10.18726/154656

<https://doi.org/10.18726/154656>

Programmausschuss:

Christian Dindorf, Robert Bosch GmbH

Carlos Fonseca, Inova GmbH

Peter Hübner, Hochschule Mittweida (beratend)

Jörg Hübler, Hochschule Mittweida

Thomas Kuttner, Universität der Bundeswehr München (Sprecher)

Bernd Locher, FORM+TEST Seidner&Co. GmbH

Harald Müller, DHM Prüfsysteme

Thomas Ribbe, Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft

Bernhard Schmidt, Instron GmbH

Gutachterausschuss:

Christian Dindorf, Robert Bosch GmbH

Jörg Hübler, Hochschule Mittweida

Thomas Kuttner, Universität der Bundeswehr München

Thomas Ribbe, Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft

Vorwort

Mit der erstmaligen Durchführung der Tagung *TestRig* im Jahr 2022 wurde ein Forum geschaffen, das den Prüfstand als zentrales Instrument technischen Erkenntnisgewinns in den Mittelpunkt stellt. Dass die Tagung nunmehr in die dritte Runde geht, unterstreicht die kontinuierlich wachsende Bedeutung der Prüfstandstechnik für Forschung, Entwicklung und industrieller Anwendung. Die nachhaltige Resonanz zeigt, dass Konzeption, Realisierung und Betrieb von Prüfständen weit mehr sind als infrastrukturelle Randthemen – sie bilden die methodische Grundlage belastbarer technischer Aussagen.

Die erfreulich hohe Zahl eingereicherter Beiträge sowie die starke Beteiligung von Wissenschaft und Industrie sind angesichts der aktuellen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen keineswegs selbstverständlich. Sie verdeutlichen jedoch, dass Validierung, Absicherung und Nachweisführung gerade in Zeiten erhöhter Unsicherheit an Relevanz gewinnen. Prüfstände sind dabei nicht nur Mittel zur Erfüllung externer Anforderungen, sondern strategische Werkzeuge zur Beherrschung technischer Komplexität.

Die Treiber für die Entwicklung und Weiterentwicklung von Prüfständen lassen sich systematisch in drei zentrale Kategorien einordnen:

Normative Anforderungen.

Für das Inverkehrbringen von Produkten sowie für Abnahme- und Zulassungsverfahren sind experimentelle Nachweise häufig zwingend vorgeschrieben. Typische Beispiele sind Festigkeits- oder Schwingprüfungen sicherheitsrelevanter Fahrzeugkomponenten oder die Qualifikation elektronischer Baugruppen unter definierten Umweltbedingungen. Prüfstände gewährleisten hier reproduzierbare Randbedingungen und normkonforme Nachweisführung.

Qualitätssicherung.

Im Rahmen der Serienfertigung dienen Prüfstandsversuche der Überwachung von Prozessstabilität und Produktqualität. Sie ermöglichen die objektive Beurteilung technischer Eigenschaften und unterstützen die Einhaltung spezifischer Qualitätsversprechen. Insbesondere im Wettbewerb technologisch anspruchsvoller Märkte sind nachvollziehbare, experimentell abgesicherte Kennwerte ein wesentlicher Bestandteil der Markenpositionierung.

Forschung und Entwicklung.

Neue Bauweisen, Werkstoffe und Technologien erfordern experimentelle Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen, bevor sie in die Anwendung überführt werden. Prüfstände erlauben es, grundlegende technische Zusammenhänge zu analysieren, Modellannahmen zu überprüfen und numerische Simulationen zu validieren. Sie sind damit integraler Bestandteil eines methodisch geschlossenen Entwicklungsprozesses.

Vor diesem Hintergrund stellt sich nicht die Frage „Berechnung oder Versuch“. Vielmehr gilt:

Keine Berechnung ohne experimentelle Verifikation – kein Versuch ohne fundierte modellbasierte Vorauslegung.

Erst das Zusammenspiel aus numerischer Simulation und experimenteller Validierung ermöglicht belastbare Aussagen über Strukturintegrität, Festigkeit und Funktionssicherheit technischer Systeme.

Die Tagung *TestRig* bietet ein interdisziplinäres Forum, in dem diese Wechselwirkung zwischen Modellbildung, Messmethodik und Prüfstandskonzeption diskutiert und weiterentwickelt wird. Sie fördert den Austausch zwischen Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Industrie und trägt damit zur methodischen Weiterentwicklung der Prüfstandstechnik bei.

Als Sprecher des wissenschaftlichen Beirats danke ich allen Autorinnen und Autoren für ihre hochwertigen Beiträge sowie dem Programmausschuss für die engagierte inhaltliche Gestaltung. Unser besonderer Dank gilt dem ITIS e. V. und dem UniCasino für die organisatorische Unterstützung und Ausrichtung der Veranstaltung.

Ich wünsche allen Teilnehmenden eine erkenntnisreiche Tagung, anregende Diskussionen und neue Impulse für Forschung und industrielle Praxis. Möge der vorliegende Tagungsband dazu beitragen, die Prüfstandstechnik als unverzichtbaren Bestandteil moderner Ingenieurwissenschaften weiter zu stärken.

Sprecher des Programmausschusses
Prof. Dr.-Ing. Thomas Kuttner
Universität der Bundeswehr München
Fakultät Maschinenbau, Neubiberg

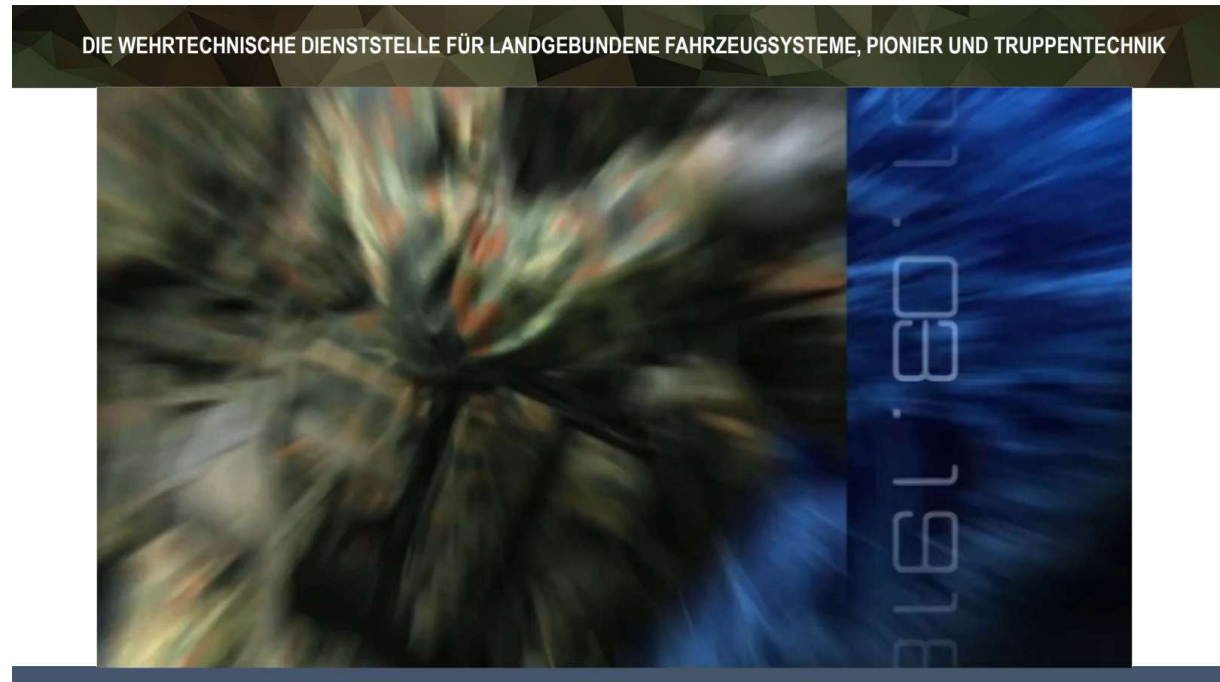
Dieser Text wurde mit Werkzeugen eines LLM analysiert und verbessert.

Aufgaben und Herausforderungen von Prüfständen für die Absicherung von militärischen Fahrzeugen

Dr. Johannes Kloppenburg

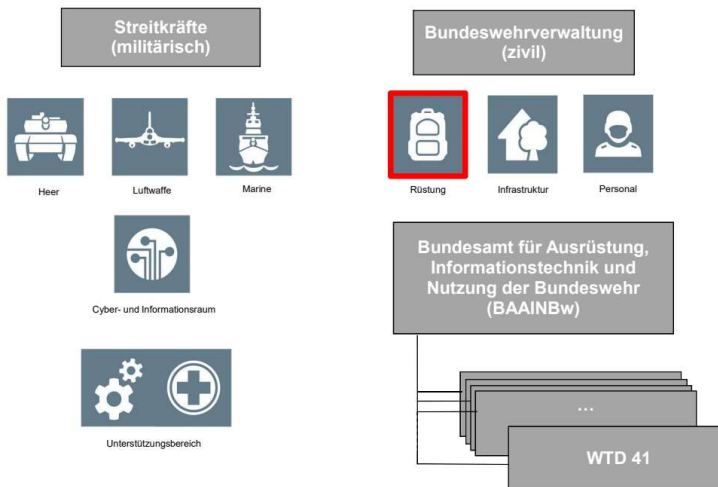
Wehrtechnische Dienststelle für landgebundene Fahrzeugsysteme, Pionier- und Truppentechnik Trier

Vortrag



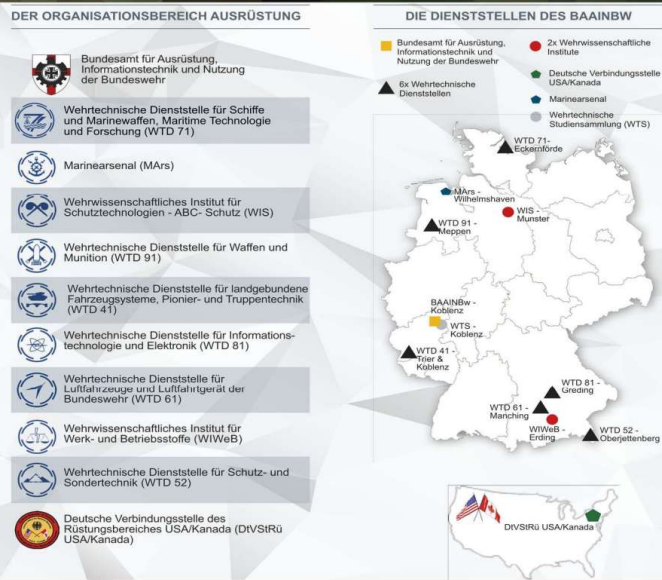
DIE WEHRTECHNISCHE DIENSTSTELLE FÜR LANDGEBUNDENE FAHRZEUGSYSTEME, PIONIER UND TRUPPENTECHNIK

Überblick
Organisation



DIE WEHRTECHNISCHE DIENSTSTELLE FÜR LANDGEBUNDENE FAHRZEUGSYSTEME, PIONIER UND TRUPPENTECHNIK

Überblick
Organisation



DIE WEHRTECHNISCHE DIENSTSTELLE FÜR LANDGEBUNDENE FAHRZEUGSYSTEME, PIONIER UND TRUPPENTECHNIK

WTD
41

Aufgabe:
Amtl. Untersuchung und Bewertung landgebundener Fahrzeugsysteme, Pionier- und Truppentechnik

Mitarbeiter(innen):
448 (496) (Stand 01/2026)

Liegenschaften:

- ☉ Trier Grüneberg
- ☉ Koblenz Metternich
- ☉ Koblenz Rübenach 1
- ☉ Koblenz Rübenach 2
- ☉ Föhren
- ☉ Baumholder
- ☉ Saarlouis-Fraulautern

Hauptauftraggeber: BAAINBw
Abteilungen K und U

Erprobungsbahnen

Werkstätten

Prüfstände

Wasserten. Anlage

Straßenkurs 6,2 km

Geländekurs 1 1,8 km

Geländekurs 2 1,7 km

Kolonnenweg, Zufahrt aus der Stadt Trier

Technische Verwaltung

Lehmmessfeld für Vorversuche L x B: 170 m x 12 m

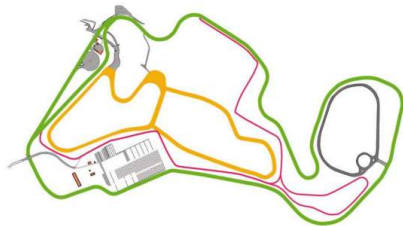
Feld- u. Waldwege 4,7 km

Schotterkurs 1,3 km

ERPROBUNGSKURSE WTD 41

Folgende Erprobungskurse stehen auf der WTD 41 zur Verfügung:

Rundkurse Trier:



grün	Straßen-Rundkurs
orange	Geländekurs
dunkelgrau	Schotterkurs
rot	Schlechtwegstrecke

Rundkurse Außenplätze Baumholder, Föhren und Saarlouis-Fraulautern:



Außenplatz Baumholder



Außenplatz Föhren

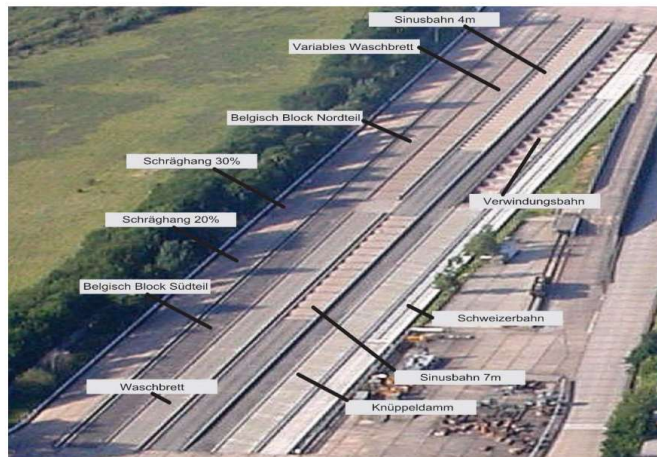


Außenplatz Saarlouis-Fraulautern

ERPROBUNGSBAHNEN WTD 41

Erprobungsbahnen WTD 41 zur Verfügung:

- Schweizer Bahn
- 400m-Messbahn
- Schrägbahn (20% + 30% Neigung)
- Belgisch Block
- Waschbrett und Variables Waschbrett
- Sinuswellenbahn 4m / 7m
- Verwindungsbahn
- Knüppeldamm
- Steilhänge
- Variable Stufe
- Variabler Graben



PRÜFSTÄNDE WTD 41

Trier:

- Rad-Kfz-Trommelprüfstand mit Sonnensimulationsanlage
- Motorprüfstände
- Getriebepfstände
- Hydraulikprüfstände
- Berstdruckprüfstand
- Klimaprüfschrank
- Kältekammer
- Hydraulische Schwingprüfanlage
- Container-Schwingprüfanlage
- Klima- und Umweltsimulationsanlage
- Reifenprüfmaschine
- Auflaufversuchanlage
- Wat- und Tauchbecken
- Gummiprüfabor
- Halle Multiaxialer Prüfstand
- Straßensimulator
- Werkstoffprüfmaschinen
- Überschlags- und Rettungssimulator (ÜReS)

Koblenz:

- Pipeline-Anlage
- Pumpenprüfstand
- Zug- und Berstprüfstand
- Frei- und Betonflächen zum Prüfen von Betriebsstoffversorgungsgeräten mit Ölauffangvorrichtungen/Ölabscheidern/Betonwannen
- Labore Klimatechnik
- Erprobungseinrichtungen für Schwimmgerät (Hafenanlage, Wassereinfahrt, höhenverstellbare Rampe)
- Erprobungshügel und -gruben zur Brückenerprobung
- Robotikhalle mit Standardtestelementen für Kleinroboter



RAD-KFZ-TROMMELPRÜFSTAND MIT SONNENSIMULATIONSANLAGE

TECHNISCHE DATEN PRÜFSTAND:

Leistung 4 x 400 kW motorisch, 4 x 440 kW generatorisch
Geschwindigkeit 1 - 100 km/h
Spurbreite 1000 - 3000 mm, Achsabstand 2000 - 5800 mm
Trommelumfang 6000 mm
Max. zul. Achslast 160 kN
Temperatur 49 °C
Massensimulation 1000 - 40000 kg
simulierbare Fahrwiderstände 30 kN (Roll-, Luft- und Steigungswiderstand)
Kurvenfahrt $\pm 100\%$ der Nenngeschwindigkeit Geschwindigkeitsdifferenz VA / HA $\pm 100\%$ der Nenngeschwindigkeit Beschleunigung / Verzögerung $\pm 6,6 \text{ m/s}^2$

TECHNISCHE DATEN SONNENSIMULATIONSANLAGE:

Leistung 4 kW pro Strahler
Anzahl Strahler 18 Strahlerdimmung Stufenlos von 50 - 100 %
Leistung Bestrahlungsstärke max. 1120 W/s^2 (gem. STANAG 4730)
Bestrahlte Fläche 5,0 x 2,5 m Gleichmäßigkeit in der Fläche $\pm 10\%$
Einstellbare Höhe 2 - 9 m
Gewicht 3,5 t

Einsatz in der Untersuchung:

- Rollwiderstandsmessungen
- Beschleunigungs-/Verzögerungsmessungen
- Geschwindigkeitsmessungen
- Leistungsprüfungen
- Zugkraftmessungen
- Fahren von Prüfzyklen
- Fahrzeugkühlanlagenuntersuchungen
- Dauervollastuntersuchungen unter reproduzierbaren Bedingungen
- Längs- und Querdifferentialuntersuchungen
- Abgastests im stationären und dynamischen Betrieb



DYNAMOMETER MESSFAHRZEUG MF60N

TECHNISCHE DATEN ALTFahrZEUG:

Dieselelektrisches Antriebskonzept mit 225 kW pro Achse
zulässige Gesamtmasse im fahrbereiten Zustand 80 t
Fahrzeughöhe 4120 mm
maximale (Dauer-) Zug/Bremskraft 600 kN
Zulassung zum öffentlichen Straßenverkehr bis 70 km/h basierend auf der StVZO von 1974
kraftgeregelter Betrieb war eingeschränkt möglich

TECHNISCHE DATEN NEUFahrZEUG:

Batterieelektrisches Antriebskonzept mit 225 kW pro Achse
Batteriekapazität mindestens 1000 kWh
maximale (10s) Zug/Bremskraft 750 kN
zulässige Gesamtmasse im fahrbereiten Zustand 60 t
Fahrzeughöhe 4120 mm
Zulassung zum öffentlichen Straßenverkehr nach §21 StVZO
kraftgeregelter Bremsbetrieb bis 350 kN

Einsatz in der Untersuchung:

- Rollwiderstandsmessungen
- Beschleunigungs-/Verzögerungsmessungen
- Geschwindigkeitsmessungen
- Leistungsprüfungen
- Zugkraftmessungen
- Fahren von Prüfzyklen
- Fahrzeugkühlanlagenuntersuchungen
- Dauervollastuntersuchungen unter reproduzierbaren Bedingungen
- Abgastests im stationären und dynamischen Betrieb



MOTORPRÜFSTÄNDE

Einsatz in der Untersuchung:

- Durchführung von standardisierten Dauerläufen (z.B. "400-Std.-Nato-Dauerlauf") zur Zertifizierung
- Anwendungsbezogene Untersuchungen und Beurteilung von Kraftstoffen, Schmierölen und Kühlmitteln
- Vorbereitung auf Abgasemissionsprüfungen
- Durchführung von Kälte- und Hitzetests mit Motoren und Triebwerken gem. militärischen Normen
- POL Analysen während der Untersuchung im eigenen Betriebsstofflabor

Technische Daten:

- 6 Prüfstände, davon 2 für transienten Motorbetrieb
- 2 – 2020 kW effektive Motorleistung abgreifbar
- Kraftstoffverbrauchsmessung stationär und dynamisch
- Verbrennungsluftmassenmessung
- Vorbereitung f. moderne Abgasmessung (fest + gasförmige Abgasschadstoffe)
- Abgasschwächung (FSN)
- Hitzetest bis zu +49 °C Verbrennungslufttemperatur
- Kaltstarttest bis zu -32 °C
- Heißstartverhalten
- Untersuchung des Schräglagebetriebes
- Kraftstoffkonditionierung / Temperatur, Druck)
- Kurbelgehäuseentlüftungsmengenbestimmung „blow-by“
- Erfassung aller zum Motorbetrieb gehörenden Messgrößen
- E-Gas Anbindung



Motorprüfstand (Quelle WTD41)



Motorprüfstand (Quelle WTD41)

GETRIEBEPRÜFSTÄNDE

Einsatz in der Untersuchung:

- Funktions- und Leistungsprüfung von Schalt- und Lenkgetrieben
- Dauerschaltversuche (10000 Lastschaltzyklen) von Getrieben mit Verbrennungsmotor oder Elektroantrieb
- Wirkungsgradmessungen, Leerlaufverlustmessungen
- An- und Abschleppversuche
- Bremsenuntersuchungen (Funktionsprüfung, Messung der Bremsmomente)

Auf dem Prüfstand können folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

- statische Lenkuntersuchungen bei Kettenfahrzeugen
- Wenden um die Hochachse
- Schalten unter Last
- Lastläufe des Triebwerkes
- Dauerstandsuntersuchungen
- Leistungsprüfung des Motors
- Ermittlung der Getriebeverlustleistung
- Hitzetests für verschiedene Klimazonen

Der Prüfstand ist bei allen Untersuchungsarten für den Dauerbetrieb ausgelegt.

Technische Daten:

- Leistung: bis 1500kW, max. Drehmoment bis 4650 Nm bei 1500 1/min
- bis ca. 50°C Umgebungstemperatur



Universalgetriebeprüfstand mit Leopard 2 Triebwerk (Quelle WTD41)



Getriebeprüfstand mit SPz Marder Triebwerk(Quelle WTD41)

MULTIAXIALER PRÜFSTAND

Einsatz in der Untersuchung:

Der Multiaxiale Prüfstand zur Erprobung von militärischen Nutzfahrzeugen bis 45 t Gesamtmasse oder kurz **HMP** (Halle Multiaxialer Prüfstand) ist ein Ganzfahrzeugprüfstand für ein oder mehrere Radfahrzeuge. Dabei handelt es sich um ein modulares System, bestehend aus acht reifengekoppelten und vier radträgergekoppelten Belastungseinheiten. Auf diesem Prüfstand können bis zu zwei zweiachsige Fahrzeuge oder ein vierachsiges Fahrzeug mit einem Gewicht von 2 bis 45 t geprüft werden.

TECHNISCHE DATEN:

- Prüfanlage Multiaxialer Prüfstand
- Fertigstellung: 02/2022
- Hydraulische Förderleistung 5000 l/min
- Betriebsdruck 315 bar
- Prüffeld 18 m x 12 m bzw. 216 m² Spannfläche, Seismische Betonmasse 1800 t, Aufspannplatte 200 t

Nutzlast (Prüfstand und Prüflinge):

- Masse Prüfstand ca. 200 t. Masse Prüfling ca. 45 t, Nutzlast ges.: ca. 250t, 8 x reifengekoppelte Belastungseinheiten
- Zylinderweg ± 250 mm, max. Beschleunigung 25 g, Nennkraft 70 kN
- max. Geschwindigkeit 4 m/s, Frequenzbereich 0 - 50 Hz
- 4 x radträgergekoppelte Belastungseinheiten
- Vertikalkrafteinleitung 200 kN, max. Weg ± 200 mm, max. Geschwindigkeit 1,5 m/s
- Längskrafteinleitung 120 kN, max. Weg ± 150 mm, max. Geschwindigkeit 2 m/s
- Seitenkrafteinleitung 100 kN, max. Weg ± 150 mm, max. Geschwindigkeit 4 m/s
- Frequenzbereich 0 - 50 Hz



Halle Multiaxialer Prüfstand (HMP) (Quelle WTD41)



GTK Boxer beim Einbringen auf Multiaxialen Prüfstand (Quelle WTD41)

ÜBERSCHLAG- UND RETTUNGSSIMULATOR (ÜRES)

Einsatz in der Untersuchung:

ÜReS dient zur reproduzierbaren Einstellung von Fahrzeugneigungswinkeln und zur Nachstellung von Fahrzeugzwangslagen um das Konzept zur Insassenrettung prüfen, bewerten und optimieren zu können.

Des Weiteren können Werkzeuge zur Notöffnung des Fahrzeugs / des Containers von außen in ihrer Handhabung und Verwendungsfähigkeit, jeweils abhängig der Fahrzeugposition untersucht und bewertet werden.

Technische Daten:

- Aufnahme von Fahrzeugzellen geschützter und gepanzerter Radfahrzeuge
- Aufnahme von bis zu 20 Fuß ISO-Containern oder in die Bundeswehr eingeführte Kabinen
- Maximal aufzunehmende Masse: 25 t
- Max. 4 Umdrehungen pro Minute um die Längsachse
- Positionierung um die Hochachse + / - 180 °



Wiesel auf ÜReS_02 (Quelle WTD41)

KÄLTEKAMMER

Einsatz in der Untersuchung:

- Kaltstartversuche von Verbrennungskraftmaschinen
- Temperaturprüfungen von Baugruppen und Komplettsystemen, z.B. Heizgeräte

TECHNISCHE DATEN:

- Leistungsaufnahme 70 kW
- Temperaturbereich -40 °C bis +50 °C
- Regelgenauigkeit ± 1 K
- Luftdurchsatz max. 3.600 kg/h
- Prüfzellenabmessung 4.500 x 3.000 x 3.800 (LxBxH)



Kältekammer(Quelle WTD41)

CONTAINER-SCHWINGPRÜFANLAGE

Einsatz in der Untersuchung:

Der Containerprüfstand ist ein mehraxialer Schwingtisch zur Simulation von im Fahrversuch gemessenen Beschleunigungen. Der Prüfstand dient der Darstellung einer Fahrsimulation. Der Prüfling ist nicht der Container selbst, sondern die in dem Container eingebauten Rüstsätze und Feldlagerkomponente. Insgesamt sechs Prüfmaschinen sind horizontal und vertikal an den Schwingtisch gekoppelt, um das Beschleunigungsmuster aus zuvor ermittelten realen Fahrversuchen in den Prüfcontainer einzuleiten. So kann eine Fahrt auf verschiedenen Fahrbahnen und Geländeprofilen dargestellt werden.

TECHNISCHE DATEN:

- Vertikal Hinterachse links: 160 kN
- Hinterachse rechts: 160 kN
- Vorderachse (Königszapfen): 400 kN
- Horizontal in Fahrtrichtung: 250 kN
- quer zur Fahrtrichtung (Hinterachse): 160 kN
- quer zur Fahrtrichtung (Vorderachse): 100 kN
- Kolbenhub der Prüfmaschinen jeweils ± 125 mm Beschleunigung max. 3g Container max. 20 Fuß-Container
- Containergewicht max. 7500 kg
- Fangvorrichtung zum Abfangen eines Containers bei Vorrichtungsbruch



Container-Schwingprüfanlage (Quelle WTD41)

REIFENPRÜFSTAND

Einsatz in der Untersuchung:

Zur Freigabe und zum Einsatz von Reifen an Fahrzeugen der Bundeswehr ist die Kenntnis der Charakteristik der verwendeten Reifen erforderlich. Diese Reifenkenndaten sind unerlässlich, wenn keine Freigabe des Fahrzeugherstellers für einen bestimmten Reifen vorliegt oder für Untersuchungen nach aufgetretenen Reifenschäden und Unfällen. Außerdem sind im Rahmen besonderer militärischer Anforderungen spezielle Einsatzrandbedingungen wie Notlaufeigenschaften und der Einfluss von Reifenluftdruck-Regelanlagen zu untersuchen.

Mit der Reifenprüfmaschine werden hauptsächlich folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Überprüfung der thermischen Dauerbelastbarkeit von Reifen nach ECE R 54
- Radialkraftschwankung
- Reifen-Federkennlinien bei verschiedenen Radlasten und Reifenluftdrücken
- Reifen-Aufstandsflächen, Bodendruckverteilung und Reifen-Ausbeulung bei verschiedenen Radlasten und Reifenluftdrücken

TECHNISCHE DATEN:

- Prüfstand Zweifach-Vertikal-Reifenprüfmaschine Fabrikat Hasbach / Bosch Rexroth
- Trommeldurchmesser 2000 mm
- Prüfgeschwindigkeit 16 - 160 km/h
- Reifendurchmesser 650 - 1700 mm
- Reifengrößen z.B. 185 R 14 bis 23,5 R 25
- Radlast 0 - 100 kN, Reifenluftdruck 0 - 10 bar, Schräglauf $\pm 8^\circ$ Sturz $\pm 6^\circ$



Reifenprüfstand (Quelle WTD41)

REIFENPRÜFSTAND

Einsatz in der Untersuchung:

Zur Freigabe und zum Einsatz von Reifen an Fahrzeugen der Bundeswehr ist die Kenntnis der Charakteristik der verwendeten Reifen erforderlich. Diese Reifenkenndaten sind unerlässlich, wenn keine Freigabe des Fahrzeugherstellers für einen bestimmten Reifen vorliegt oder für Untersuchungen nach aufgetretenen Reifenschäden und Unfällen. Außerdem sind im Rahmen besonderer militärischer Anforderungen spezielle Einsatzrandbedingungen wie Notlaufeigenschaften und der Einfluss von Reifenluftdruck-Regelanlagen zu untersuchen.

Mit der Reifenprüfmaschine werden hauptsächlich folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Überprüfung der thermischen Dauerbelastbarkeit von Reifen nach ECE R 54
- Radialkraftschwankung
- Reifen-Federkennlinien bei verschiedenen Radlasten und Reifenluftdrücken
- Reifen-Aufstandsflächen, Bodendruckverteilung und Reifen-Ausbeulung bei verschiedenen Radlasten und Reifenluftdrücken

TECHNISCHE DATEN:

- Rollendurchmesser 1700 / 2000 mm
- Prüfgeschwindigkeit stufenlos bis 192 km/h
- Reifendurchmesser bis 1600 mm
- Radlast 0 - 100 kN, Schräglauf $\pm 15^\circ$ Sturz $\pm 10^\circ$



Reifenprüfstand



Special Testing – mit modularen Lösungen zum spezifischen Sondertest von kritischer Infrastruktur

Philipp Eickhoff; Lisa Knost, Dr. Roger Schäfer

Competence Center Protection, Impact and High Risk Tests, IABG mbH, Burghof 1, 33165 Lichtenau

Zusammenfassung

Geänderte geopolitische Rahmenbedingungen und Bedrohungslagen bringen höhere Anforderungen an den Schutz kritischer Infrastruktur mit sich. Dies beeinflusst auch die Testmethodik und Nachweisführung. In dieser Betrachtung wird anhand von Beispielen dargestellt, wie aus der Bedrohungslage Verfahren, Prüfstand und Prüfling abgeleitet werden können, um eine systematische Nachweisführung der Resilienz kritischer Infrastrukturen zu ermöglichen.

Nomenklatur

FSP – Fragment Simulating Projectile

HV - Hochvolt

KE – Kinetic Energy

TROSS – Test Rig for Occupant Safety System (in diesem Fall E-TROSS, aufgrund der Anwendung für (elektrische) Energiespeicher)

1. Einleitung

Geopolitische Spannungen und aktuelle Ereignisse rücken die Resilienz kritischer Infrastruktur ins Scheinwerferlicht. Spätestens mit Inkrafttreten der geänderten BSI-Kritisverordnung [1] ist eine vollumfängliche Definition der sogenannten KRITIS erfolgt, inklusive der Schwellenwerte, Meldepflichten und Anforderungen, die zum Erhalt der Funktionen an die Betreiber gestellt werden.

Wie genau jedoch kann dieser Funktionserhalt sichergestellt werden? In welcher Form kann eine Nachweisführung zur Resilienz, genauer der Widerstandsfähigkeit der entsprechenden Systeme oder Komponenten kritischer Infrastruktur erfolgen? Und wie kann die jeweilige Bedrohung bzw. der Wirkmechanismus hergeleitet werden? Zu diesen Fragestellungen sollen in dieser Betrachtung Denkanstöße gegeben werden.

Um im Folgenden den Beitrag des IABG Competence Center Protection, Impact und High Risk Testing darstellen zu können, soll zu Beginn eine Einordnung der Tätigkeitsfelder erfolgen. Der IABG-Standort in Lichtenau wurde 1969 als Teil der IABG als bundeseigener Betrieb gegründet. Seit Beginn erfolgt eine kontinuierliche Integration neuer Leistungen in der technischen Beratung, im Testing und Engineering, wobei stets die Überlebensfähigkeit (militärisch) bzw. die Resilienz (zivil) von Systemen, Komponenten und Materialien im Fokus steht. Das IABG-Kompetenzzentrum in Lichtenau ist ein nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiertes Prüfinstitut.

Unter Überlebensfähigkeit oder Resilienz wird die Fähigkeit eines Systems verstanden, eine Bedrohung bzw. einen schadhafte Einfluss zu meiden oder ihr zu widerstehen, ohne eine Minderung der Befähigungen zu erleiden, die zur Erfüllung der zugeordneten Aufgabe notwendig sind. Eine hohe Überlebensfähigkeit erfordert möglichst geringe Anfälligkeit, geringe Verwundbarkeit sowie eine hohe Wiederherstellbarkeit.

Bezogen auf das konkrete Leistungsportfolio im Competence Center Protection, Impact und High Risk Tests haben sich unter o.g. Schwerpunkt folgende Portfolioelemente mit entsprechenden Beispieltests und exemplarisch genannten Prüfstandards entwickelt:

- **Schutz:** Zertifizierung und Qualifikation geschützter Plattformen, Gesamt- und Teilsystemen und Komponenten in Sprengversuchen, STANAG 4569, STANAG 2280, VPAM ERV
- **Ballistik:** Ballistische Untersuchung von Gesamt- und Teilsystemen, Komponenten und

Materialien (KE Kaliber .357 Mag bis 40 mm; FSP Kaliber 5.56 mm bis 20 mm),
Güteprüfbeschluss nach TL, STANAG 4569, STANAG 2280, VPAM

- **Impact:** Erprobung von Gesamt- und Teilsystemen, Komponenten und Materialien in z.B. Hagel-, Reifen- oder Vogelschlag, Steinschlag, Erprobung des Unterbodenschutzes oder Windschutzscheiben, ASTM F320, ASTM F330, DIN EN 15152, GMRT 2100
- **High Risk:** Untersuchung der Strukturintegrität von Gesamt- und Teilsystemen sowie Komponenten in Brand-, Druck-, Berst- oder Fallversuchen, z.B. Brandversuche an H2-Tanks, ECE R134, DIN EN 17339, DIN EN 12245
- **Battery Abuse:** Erprobung von HV-Gesamtspeichern, -modulen oder Gesamtfahrzeugen in Sicherheits- und Missbrauchstests, wie z.B. Crush-, Drop-, Fuel Fire- oder Propagationstests, ECE R100, GB

Neben den genannten Tests, die sowohl als standardisierte und teilweise akkreditierte Prüfdienstleistung als auch als entwicklungsbegleitende Untersuchungen durchgeführt werden, erfolgt die Ableitung kunden- und produktspezifischer Nachweisführungen, die im Rahmen dieser Betrachtung unter der Begrifflichkeit Sondertest bzw. Special Testing intensiv betrachtet werden. Einem mittlerweile stetig wachsenden Anteil dieser Sondertests liegt hierbei die Nachweisführung zur Sicherheit kritischer Infrastrukturen gegenüber diversen Bedrohungen bzw. Einflüssen zugrunde. Die Anforderungen an die Resilienz und die Sicherheit kritischer Infrastruktur sind aufgrund der dynamischen geopolitischen Entwicklung in einem kurzen Zeitraum gestiegen. Dementsprechend ist zum einen die Bedrohungsseite unklar bzw. häufig noch nicht hinreichend spezifiziert, zum anderen existieren teilweise keine reproduzierbaren Verfahren zur Nachweisführung.

Die IABG versteht sich an dieser Stelle als Bindeglied – wir verfügen auf der einen Seite über die Kenntnis und die Analysefähigkeiten der Bedrohungsszenare, auf der anderen Seite liegt unsere Expertise in der Ableitung und Definition valider Testverfahren zur Nachweisführung. Bevor im Folgenden detaillierter auf eine solche Methodik eingegangen wird, mit deren Hilfe für kritische Infrastrukturen bzw. darin enthaltene Systeme und Komponenten ein passendes Verfahren zum Nachweis der Überlebensfähigkeit bzw. Resilienz entwickelt werden kann, soll der Begriff Sondertest aufgegriffen und in diesem Kontext erläutert werden.

2. Definition des Begriffes Sondertest

Zur Herstellung der Klarheit des Begriffes Sondertest dient die unten gezeigte Abb. 1, wobei hier zu beachten ist, dass diese Definition zur IABG-internen Einordnung erfolgt ist. Die Testdurchführung lässt sich dabei abhängig vom Hintergrund und der Motivation in vier verschiedene Testkategorien einteilen:

- **Zulassungstest:** Ein Prüfling durchläuft einen Test nach Norm, um eine Zulassung für einen bestimmten Einsatzzweck zu erhalten (hier z.B. Propagationstest an einer HV-Batterie gemäß ECE R100), i.d.R. ist hier ein akkreditiertes Verfahren notwendig sowie die Testbegleitung durch einen unabhängigen Gutachter oder Homologen
- **Modifizierter Zulassungstest:** Ein Prüfling durchläuft einen Test in Anlehnung an eine Norm, häufig in einem verschärften Verfahren zur Bestimmung der Belastungsgrenzen (hier z.B. Propagationstest an einer HV-Batterie bei hoher Umgebungstemperatur)
- **Übertragung von Prüfstandards:** Ein Prüfling durchläuft einen Test, der nicht ursprünglich für diesen Prüflingstyp vorgesehen ist, z.B. die Auswirkungen einer simulierten Batteriepropagation auf andere Komponenten (z.B. Treibstofftanks) wird untersucht
- **Sondertest:** Ein Prüfling durchläuft einen Test, dem keine festgeschriebene Norm zu Grunde liegt, z.B. ein Nicken-/Wanken-Test einer HV-Batterie bei gleichzeitigen Salzwassereintrag mit Propagation als möglicher Folge.

Neben der Zuordnung zu einem existierenden Prüfstandard unterscheiden sich die oben genannten Tests vor allem hinsichtlich des Grades der Einzigartigkeit des Prüfaufbaus. Ein Sondertest zeichnet sich in der Regel durch einen

Prüfaufbau bzw. einen Prüfstand aus, der ausschließlich für diesen Test konzipiert wurde. Hierbei können auch bestehende Prüfaufbauten oder Prüfstände für den definierten Testzweck modifiziert werden.



Abb. 1: Einteilung der Tests nach Einzigartigkeit des Prüfaufbaus

3. Entwicklung einer Methode zum Nachweis der Überlebensfähigkeit bzw. der Resilienz kritischer Infrastrukturen

Dieser Abschnitt behandelt die methodische Vorgehensweise zum Nachweis der Resilienz sicherheitskritischer Infrastrukturen bzw. deren Teilsysteme und Komponenten. Zu Beginn wird jedoch anhand eines Studienbeispiels eine Methodik zur Nachweisführung zur insassensicheren Integration von Batteriesystemen in geschützte, militärische Fahrzeuge vorgestellt. Dieses Beispiel lässt sich in den Kontext dieser Betrachtung einordnen, da die Überlebensfähigkeit und der Funktionserhalt militärischer Fahrzeuge als Teil von Logistikketten oder im Rahmen der Landesverteidigung ebenso entscheidend sind.

a. Beispiel: Studie zur Integration von 6T Li-Ionen-Batterien in geschützte Fahrzeugplattformen

Das vorliegende Beispiel, welches im Rahmen einer Studie für das BAAINBw (Abteilung U4.1) entwickelt wurde, bezieht sich auf die insassensichere Integration von 6T Lithium-Ionen Batterien in militärisch geschützte Fahrzeuge.

Die zunehmende Elektrifizierung, beispielsweise zur Versorgung der Bordkomponenten von geschützten, militärischen Fahrzeugen erfordert den Einsatz hochenergetischer elektrischer Energieträger. Mit der Nutzung von Lithium-Ionen Batterien zur Deckung dieser Energiebedarfe geht das in der Batterietechnologie begründete gestiegene Sicherheitsrisiko im Vergleich zur Verwendung konventioneller Batteriesysteme einher. Gleichzeitig erfordern zunehmende geopolitische Spannungen und die damit verbundene notwendige Systemeinsatzfähigkeit eine schnelle und pragmatische Absicherung und Integration der Batteriesysteme in die entsprechenden Fahrzeuge.

Als Startpunkt der Studie wurde die Einbausituation als Starter- und Rüstsatzbatterie im mgSan Kfz betrachtet, die Methodik ist jedoch fahrzeug- und auch systemunabhängig. Da es sich bei dieser Fahrzeuganwendung um ein Sanitätsfahrzeug handelt, wurden allerdings Aspekte wie die Vermeidung von katastrophalen Batterieverhalten (bspw. Thermal Runaway) besonders hoch priorisiert.

Ein wesentliches Teilziel bestand in der Entwicklung einer Methodik zur Nachweisführung, die es erlaubt, verschiedene Mitigationsmaßnahmen, also Technologien, die zur Vermeidung bzw. Unterdrückung einer Batteriepropagation in einem Fahrzeug dienen, reproduzierbar vergleichen und hinsichtlich ihrer Effektivität bewerten zu können. Hierzu wurde ein Batteriesubstitut entwickelt, welches in der Nachweisführung das Propagationsverhalten der Originalbatterien abbildet. Zu den Anforderungen an dieses Substitut zählten die Kostenreduktion durch den Ersatz der Originalbatterien und die einfachere Handhabung im Test (Assemblierung, Implementierung von Zellsensorik etc.). Des Weiteren sollte das Augenmerk auf die Zellverfügbarkeit gelegt werden, um eine Verkürzung der Nachweiszyklen zu ermöglichen. Im Folgenden werden die Einzelschritte zur Definition einer Substitutbatterie für den beschriebenen Zweck kurz umrissen:

- Wie oben bereits erläutert, ist der zu betrachtende Worst Case die Batteriepropagation der Gesamtbatterie. Aus diesem Grund wird im ersten Schritt die **Triggervariante gewählt**, die sicher zum Thermal Runaway der getriggerten Zelle(n) und möglichst auch zur Propagation des Gesamtaufbaus führt sowie gleichzeitig möglichst definiert ist.
- Mittels **Einzelzellversuchen** soll geklärt werden, inwieweit das Zellformat der Substitutionsbatterie (Rund- vs. prismatisch) dem der Originalbatterie entsprechen muss, um vergleichbare thermische, elektrische und mechanische Reaktionen zu erzeugen, und ob die im Einzelzellen enthaltene Energiemenge das Reaktionsverhalten signifikant beeinflusst.
- Bei den **Propagationsversuchen** wird das thermische Weiterleiten entlang einer Kette identischer Zellen untersucht. Nach Anordnung mehrerer Zellen in direktem Kontakt wird die mittlere Zelle mittels Heizstab zum Thermal Runaway gebracht. Anschließend wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit des entstehenden Temperatur-/Energieereignisses auf benachbarte Zellen gemessen. Außerdem wird geprüft, ob unterschiedliche Formfaktoren die Ausbreitungsgeschwindigkeit beeinflussen.
- In **Referenzversuchen** wird zunächst ein 1-kWh-Zellverbund aufgebaut, um die Erkenntnisse aus den Vorversuchen kostengünstig und im kleineren Maßstab zu validieren. Diese Kapazität erlaubt bereits die Kombination mehrerer Einzelzellen, bleibt aber in Herstellung und Testaufwand überschaubar – auch bei unterschiedlichen Zellformaten und Energiegehalten. Für die Messungen wird der eigens konzipierte Prüfstand E-TROSS verwendet, der reproduzierbare Testbedingungen gewährleistet.
- Im letzten und abschließenden Schritt erfolgt der Aufbau und Test des **finalen Substituts** auf Basis der vorgelagerten Erkenntnisse. Neben der experimentellen Erprobung wird auch ein Abgleich mit vorliegenden Simulationsergebnissen durchgeführt.

Im Studienverlauf zeigte sich, dass diese methodische Vorgehensweise unabhängig der Originalbatterie (Energieinhalt, Zellchemie) funktioniert und validierte Substitute entwickelt werden können. Auch für potentiell andere Batterietypen statt der betrachteten Starter- und Rüstsatzbatterien ist eine Übertragung möglich. Auf diese Weise kann der Aspekt der sicheren Integration von Batteriespeichersystemen auch beispielsweise für stationäre Speicher als Teilsystem kritischer Infrastruktur gezielt und reproduzierbar mittels eigens dafür entwickelter Prüfstände und Vorgehensweisen im Test dargestellt werden.

b. Klassifizierung kritischer Infrastruktur hinsichtlich der Risikogrößen

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Herleitung von der Herausforderung („Li-IO Batterien müssen in militärisch geschützte Fahrzeuge sicher integriert werden“) zum abgeleiteten Sondertest (Erprobungsumgebung für Mitigationsmaßnahmen mit eigens dafür entwickeltem Prüfstand und Substitutbatterie) erläutert wurde, sollen in den folgenden Abschnitten ähnliche Herleitungen in Bezug auf Systeme und Komponenten aus unterschiedlichen Sektoren der KRITIS auszugsweise dargestellt werden.

Im ersten Schritt erfolgt zu diesem Zweck eine Klassifizierung beispielhaft ausgewählter einzelner KRITIS-Sektoren hinsichtlich der Risikogrößen bzw. der Komponenten, die physischen Schutz erfordern.

Die nach der BSI-Kritisverordnung [1] zur kritischen Infrastruktur zählenden Sektoren sind in Abb. 2 dargestellt. Über die Definition von Schwellenwerten wird zusätzlich bestimmt, ab wann die Betreiber KRITIS-Betreiber sind und somit weitreichenderen Pflichten nach §8a BSIG unterliegen. In der Regel sind dies quantitative Werte, z.B. zur Anzahl versorgter Personen, qualitative Werte sind allerdings ebenfalls möglich. Nicht zum grundsätzlich definierten Umfang der KRITIS, aber für die Betrachtung ebenso relevant (siehe oben) und daher aufgeführt, ist der Aspekt der Landesverteidigung, der beispielsweise Stützpunkte, Logistikzentren oder militärische Liegenschaften im Allgemeinen umfasst.

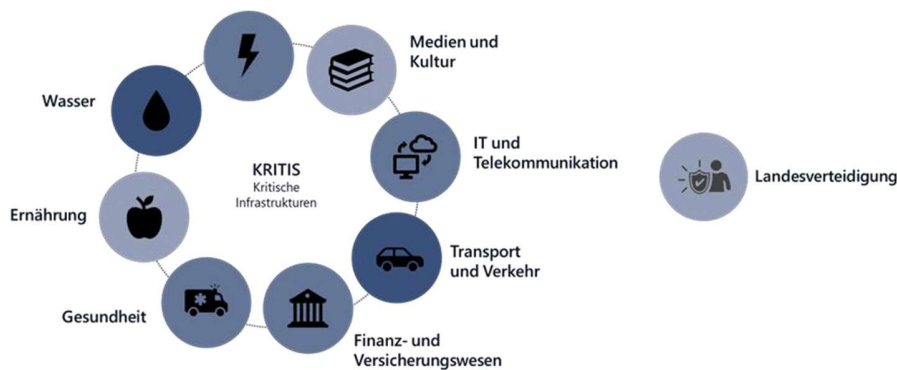


Abb. 2: Übersicht der Sektoren im KRITIS

Die oben genannten Sektoren sind grundsätzlich weit gefasst und umfassen diverse Elemente und Komponenten, sodass deren Resilienz und Funktionalität in der Regel jeweils einzeln nachgewiesen und sichergestellt sein muss. In der Tabelle 1 sind für vier ausgewählte KRITIS-Sektoren exemplarisch Komponenten ausgewählt, die physischen Schutz oder Maßnahmen zum Nachweis der sicheren Funktionalität auch außerhalb der üblichen Belastungsgrenzen erfordern. Die Tabelle ist nicht umfassend und fokussiert an dieser Stelle zum einen Systeme und Komponenten, die als Energiespeicher oder -träger dienen aufgrund der potentiellen Gefährdung durch die gespeicherte chemische oder elektrische Energie. Zum anderen werden Komponenten betrachtet, deren Resilienz gegenüber mechanischen Einflüssen zur Absicherung der Funktionalität der jeweiligen KRITIS erforderlich ist. Selbstverständlich benötigen alle KRITIS und die in der Tabelle genannten insbesondere ein hohes Maß an Sicherheit der IT- und Telekommunikationsnetze. Diese werden allerdings in dieser Betrachtung nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 1: KRITIS-Sektoren mit beispielhaften physisch zu schützenden Komponenten

KRITIS	Exemplarische (physisch) zu schützende/abzusichernde Komponenten
Energie	Transformatoren, Freileitungssysteme, Pipelines
Transport & Verkehr	Treibstoff- und Medienversorgung, (elektrische) Energiespeicher
Gesundheit	Generatoren f. Notstromversorgung, medizinische Geräte
Landesverteidigung	Militärische Liegenschaften, Fahrzeuge für Personen- und Gütertransport

c. Methoden zur Nachweisführung in Sondertests

In Verbindung mit den oben genannten zu schützenden bzw. abzusichernden Komponenten sollen im nächsten Abschnitt exemplarische Sondertests zur Nachweisführung der Resilienz bzw. der Überlebensfähigkeit dargestellt werden. Besonderes Augenmerk liegt zuvor auf der Rückführung auf die relevanten mechanischen Einflussgrößen, das heißt basierend auf den zu erwartenden Einflüssen im Betrieb und im Katastrophenfall, werden Eingangsgrößen identifiziert. Für die in der Einleitung genannten Testarten können diese die Folgenden mit jeweils breitbandigen Testausprägungen sein:

- Mechanische Einwirkung durch Druckänderungen: Einfluss von Druckwellen aus Anspannungen auf bauliche Strukturen, Auswirkungen schlagartigen Druckverlustes auf Luftfahrtkomponenten, Verhalten von H2-Speichertanks bei Überschreiten des Arbeitsdrucks

Special Testing – mit modularen Lösungen zum spezifischen Sondertest von kritischer Infrastruktur

- Mechanische Einwirkung durch Projektilen: Strukturintegrität von Flugzeugstrukturen bei Vogel-, Reifen- oder Hagelschlag, Einfluss von ballistischem Beschuss auf Schutztechnologien, Widerstandsfähigkeit von Frontscheiben für Bahnanwendungen bei Vandalismusvorfällen
- Mechanische Einwirkung durch Feuer bzw. Wärme: Einfluss eines Treibstoffbrands auf HV-Batterien, Thermal Runaway Verhalten einer HV-Batterie bei punktueller Überhitzung einer Zelle, Verhalten von H₂-Speichertanks im Feuer
- Mechanische Einwirkung durch Vibration und Schockeintrag: Pyroshocktests an Raumfahrtkomponenten, Auswirkungen von Schockeintrag auf Rüstsätze in militärischen Fahrzeugen bei Anspannung

Der nachfolgende Schritt der Identifikation von Eingangsgrößen zur Ableitung der Nachweisführung ist die Festlegung des passenden Prüfaufbaus bzw. des Prüfstands. Bereits in der Definition der Sondertests wurde der hohe Grad der Einzigartigkeit des Prüfaufbaus herausgestellt. Hieraus ergibt sich die Anforderung möglichst modularer, multifunktionaler Prüfumgebungen. Ein erster, nicht vollständiger Auszug ist in [Abb. 3](#) zu sehen, wobei die Genannten sich hier hinsichtlich der Anwendungsbereiche stark unterscheiden.

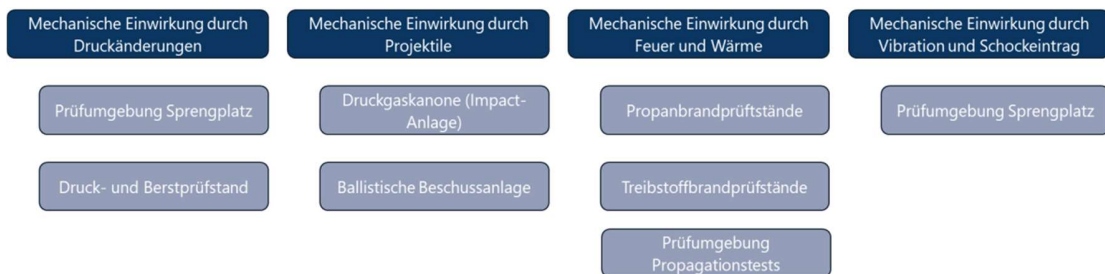


Abb. 3: Exemplarische Prüfumgebungen und -stände zugeordnet zu Einflussgrößen

Diesen Eingangsgrößen gegenüber stehen diverse Analysemöglichkeiten zum Nachweis der Überlebens- und Funktionsfähigkeit des Systems bzw. der Strukturintegrität der Komponente. Hierzu zählen beispielsweise:

- Elastische und plastische Deformation, Bruchverhalten; ermittelt durch Hochgeschwindigkeitskameras, optische Verformungsmessung, bildgebende Post-Test-Analysen
- Restenergie im Prüfling, Funktionalität der Energiespeicherung; ermittelt durch Spannungs- oder Druckmessungen (elektrische oder chemische Energie)
- Funktionsfähigkeit der internen Steuerung; ermittelt durch CAN-Diagnostik

Letztlich können durch die Kombination der o.g. Elemente und modulare Testkonzepte (Einflussgröße bestimmt Prüfumgebung/-stand, Nachweisgröße bestimmt zu verwendende Analysemöglichkeiten und Messtechnik) spezifische Testaufbauten entsprechend der Prüflingsanforderungen realisiert werden.

d. Weitere Beispiele zur Herleitung exemplarischer Sondertests mit Bezug zu kritischer Infrastruktur

Über die vorgestellte Studie zur Entwicklung eines Batteriesubstituts hinaus wird in diesem Abschnitt ein weiteres Beispiel zu Sondertests gezeigt, welches auf Nachweisführungen zur Resilienz kritischer Infrastrukturen beruht. Auf weitere Beispiele wird aus Platzgründen im Vortrag eingegangen.

Tabelle 2: Projektbeschreibung Beschussversuche auf Schutznetze

WTD 52 – Beschussversuche auf Schutznetze (C-UAS)	
Hintergrund: Im Falle eines Versagens von Aktivmaßnahmen zur Drohnenabwehr bleiben passive Maßnahmen zum Schutz von Personal, Fahrzeugen und Infrastruktur. Während für kleinere Drohnen übliche CamouflageNetze ausreichenden Schutz bieten, ist dies bei größeren UAS nicht der Fall.	
Ziel: Zielsetzung der Untersuchungen ist der Nachweis, wie ein zuvor definiertes Drohnensurrogat bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf verschiedene Netze wirkt.	Mehrwert für unseren Kunden: Erkenntnisgewinn zur Funktionalität verschiedener Netztypen ggü. einem reproduzierbaren Projektil
Methode: <ul style="list-style-type: none"> • Ableitung eines Drohnensurrogats anhand der Kundenanforderungen (• Beschleunigung des Projektils durch Verwendung von Druckgas auf mit der IABG ImpactAnlage (ID220) • Messtechnische Erfassung über drei HS-Kameras und vier Kraftmessdosen • Untersuchung von vier verschiedenen Prüflingskonfigurationen • Ermittlung der Vorspannung und max. Kraft abhängig des Netztyps und der Projektilgeschwindigkeit, Auswertung der max. Netzdurchbiegung 	

4. Einordnung der Methodik in einen umfassenden Bewertungsprozess

Im Zuge der dargestellten Herleitung der Einflussgrößen anhand der zu schützenden Komponenten kann die Frage gestellt werden, gegenüber welchen physischen Bedrohungen kritische Infrastrukturen abgesichert werden müssen. Gerade die aktuelle Bedrohungslage erfordert auch die Analyse, Bewertung und Schutzauslegung gegen Sabotage und militärische Bedrohungen. Vorgelagert zur technischen Herleitung können hierzu beispielsweise Table-Top-Übungen wie „NATO Nordic Pine 2025“ eingesetzt werden, bei denen Energieversorger und KRITIS-Betreiber hybride Angriffsszenarien simulieren und so eine erhöhte Sensibilität gegenüber diesen Bedrohungen schaffen. Auf diese Weise kann Preparedness geschaffen werden, um z.B. dafür zu sorgen, dass aktuelle Brandanschläge auf single-points-of-failure nicht zu längerfristigen Stromausfällen mit weitreichenden Folgen führen, sondern Betriebsmittel der Stromversorgung weniger offen zugänglich und besser geschützt sind. Die so erreichte durchgängige Verknüpfung von Analyse, Simulation, Training und Tests stärkt die Robustheit gegenüber hybriden Bedrohungen und sichert die Resilienz und Überlebensfähigkeit kritischer Infrastrukturen.

5. Schlussfolgerung

In dieser Betrachtung wurde die Methodik zur Herleitung maßgeschneiderter Testszenarios zum Nachweis der Resilienz kritischer Infrastrukturen bzw. deren Komponenten betrachtet. Über die Kombination möglichst modularer Prüfstände, die eine spezifische Einflussgröße variabel abbilde, mit breitbandigen Analysemöglichkeiten können spezifische Sondertests mit gezielten Erkenntnissen zu Schwachstellen abgebildet werden.

Dabei ist zum einen festzuhalten, dass KRITIS-Komponenten, die baulichen Schutz benötigen, eine entsprechende Nachweisführung erfordern, zum anderen aber weisen insbesondere Energieträger oder speicher potentielle Schwachstellen gegenüber hybriden Bedrohungen auf, die im Extremfall erhebliche Schäden verursachen können. Des Weiteren konnte am Beispiel der sicheren Integration von Batteriesystemen dargestellt werden, dass die methodische Nachweisführung häufig auch auf andere Einsatzbereiche übertragbar ist.

Special Testing – mit modularen Lösungen zum spezifischen Sondertest von kritischer Infrastruktur

Betont wurde auch die Weiterentwicklung der aktuellen Bedrohungslage, die in Teilen vorgelagerte Schritte erfordert, um von der noch unspezifischen Bedrohungssituation zur definierten Einflussgröße zu gelangen. Ein geeignetes Beispiel sind die Freiluftleitungssysteme, die derzeit offen zugänglich und kaum physisch geschützt sind.

Literatur

- [1] Verordnung zur Bestimmung kritischer Anlagen nach dem BSI-Gesetz;
<https://www.gesetze-iminternet.de/bsi-kritisv/> (abgerufen am 01.02.2026)

Virtuelle Simulationsmodelle für Prüfstandsentwickler und Prüfstandsbetreiber

Michael Ruisinger, Jens Härten

Renk Test System GmbH, Ohmstraße 8a, 86199 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

Die steigende Dynamik und Komplexität moderner Prüfstände erfordert neue Methoden zur Auslegung, Inbetriebnahme und zum Betrieb. Insbesondere mehrachsige Aktuatorik, hochdynamische Regelungen und der Einfluss des Prüflings führen zu stark gekoppelten Gesamtsystemen, deren Verhalten mit klassischen Entwicklungsansätzen nur eingeschränkt beherrschbar ist. In diesem Beitrag wird eine systematische Methodik zum Einsatz virtueller Simulationsmodelle und digitaler Zwillinge für Prüfstände vorgestellt. Am Beispiel eines Prüfstands für Luftfahrtgetriebe werden simulationsgestützte Ansätze zur mechanischen Auslegung, zum Regelungsentwurf sowie zur virtuellen Inbetriebnahme beschrieben und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einbindung von Simulationsmodellen im Entwicklungs- und Engineeringprozess zur Reduktion von Risiken, Zeitaufwand und Kosten beiträgt. Darüber hinaus wird diskutiert, wie digitale Zwillinge über die Entwicklungsphase hinaus im laufenden Prüfstandsbetrieb genutzt werden können und welche Grenzen sich aus Modellannahmen, Validierung und Echtzeitfähigkeit ergeben. Die Arbeit zeigt, dass Simulation den physischen Prüfstand nicht ersetzt, diesen jedoch sinnvoll ergänzt.

1. Einleitung

Die Entwicklung moderner Prüfstände ist durch hohe Anforderungen an Dynamik, Flexibilität und Variantenvielfalt geprägt. Mehrachsige Aktuatorik und der ausgeprägte Einfluss des Prüflings führen zu stark gekoppelten Gesamtsystemen, deren dynamisches Verhalten mit klassischen, überwiegend empirischen Entwicklungsansätzen nur eingeschränkt beherrschbar ist. Der modellbasierte Ansatz (Model Based Design) bietet für Prüfstandsentwickler die Möglichkeit, das Systemverhalten bereits in frühen Entwicklungsphasen zu analysieren, ihre Auslegung damit zu validieren und mit Hilfe einer Virtuellen Inbetriebnahme Risiken und Inbetriebnahmephasen zu reduzieren. Während Prüfstandsentwickler vor allem bei Machbarkeitsanalysen und im Engineering von einem virtuellen Simulationsmodell profitieren, ermöglicht dieses als „digitaler Zwilling“ auch für Betreiber eine verbesserte Absicherung von Umbauten, Prüflingsänderungen und Betriebsstrategien [1]. Ziel dieses Beitrags ist es, eine strukturierte Methodik für den Einsatz virtueller Simulationsmodelle und digitaler Zwillinge im Prüfstandsbereich vorzustellen. Es werden Kriterien zur Bewertung der Einsatzsinnhaftigkeit und der erforderlichen Modelltiefe definiert sowie Vorgehensweisen zur Erstellung, Validierung und Nutzung der Modelle am Beispiel eines Prüfstands für Luftfahrtgetriebe beschrieben. Die dargestellte Vorgehensweise ist auf vergleichbare Prüfstände übertragbar.

2. Prüfstandsbeschreibung und Methodik

2.1 Beschreibung des Prüfstands

Der betrachtete Prüfstand der Renk Test System GmbH dient zur Erprobung von leistungsstarken Luftfahrtgetrieben unter realitätsnahen Lastbedingungen. Er dient zur Entwicklung, Zertifizierung und Serienerprobung des Prüflingsgetriebes. Unter anderem wird er für Untersuchungen von Wirkungsgrad, Geräuschemissionen und Haltbarkeit bei Extrembelastung genutzt. Der Prüfstand verfügt über einen mechanisch komplexen Antriebsstrang und hoher Varianz bei den Prüflingen, somit eignet er sich als praktisches Beispiel ideal, um den systematischen Einsatz von Simulationsmodellen zu zeigen.

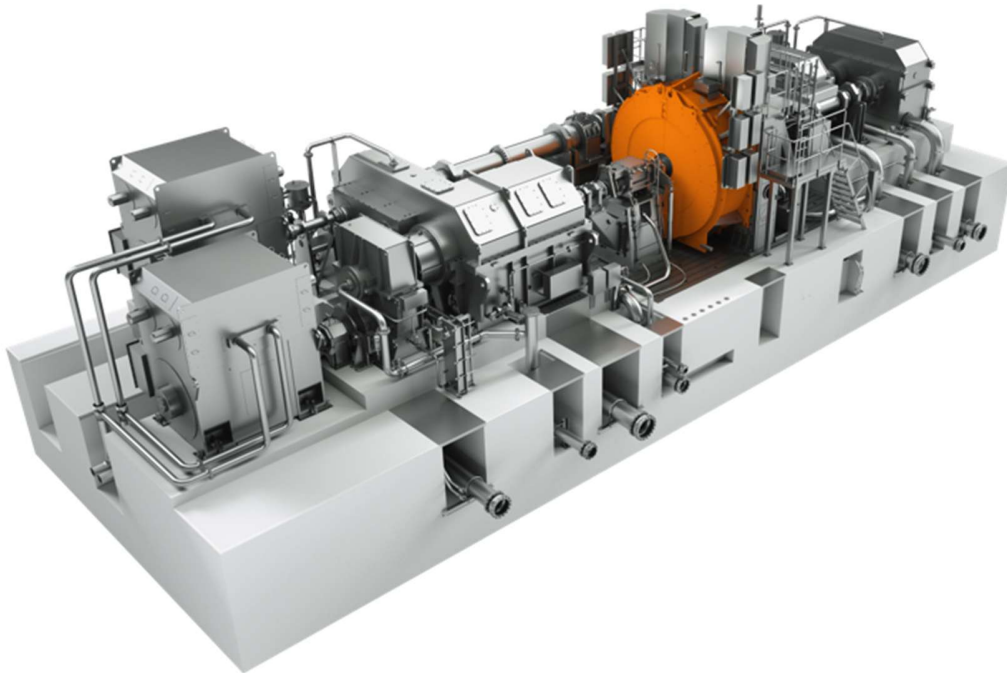


Abb. 1: Gesamtansicht des Prüfstands mit der Schutzeinhausung für das Prüflingsgetriebe (orange)

Der elektrische Hauptantrieb treibt über ein Lastverteilergetriebe den Prüfling an. Die Ausgangswelle des Prüflings ist über Stirnradgetriebe wieder mit dem Lastgetriebe verbunden, sodass ein mechanischer Verspannkreis entsteht. Der zweite Antrieb dient als Überlagerungsantrieb und bringt über ein Planetengetriebe im Lastverteilergetriebe Drehmoment auf. Der Prüfling wird außerhalb des Prüfstands in einer Schutzeinhausung montiert und mit der notwendigen Sensorik ausgestattet. Anschließend wird die komplette Einheit in den Prüfstand eingebracht und mechanisch sowie medientechnisch gekoppelt. Dieses Konzept erlaubt einen Wechsel zwischen verschiedenen Prüflingstypen [2]. Um die reale Belastung des Prüflings in mehreren Achsrichtungen nachzubilden ist ebenfalls eine hydraulische Belastungseinheit (siehe Abbildung 2) zur Aufbringung von Schubkraft, Biegemoment, Querkraft und Axialkraft im Prüfstand integriert.

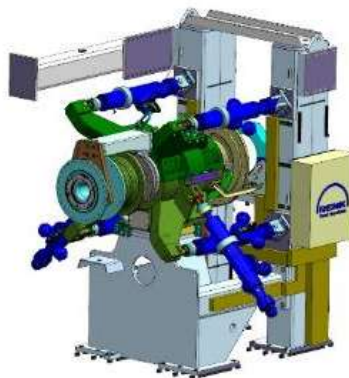


Abb. 2: CAD-Modell der hydraulischen Belastungseinheit

Komplettiert wird die Anlage durch eine Öl- und Hydraulikversorgung zur Schmierung und Aktuatorik, sowie der übergeordneten Prüfstandssoftware zur Steuerung und Regelung, Überwachung und Datenerfassung. Ein Layout der Steuerung ist in Abbildung 3 ersichtlich.

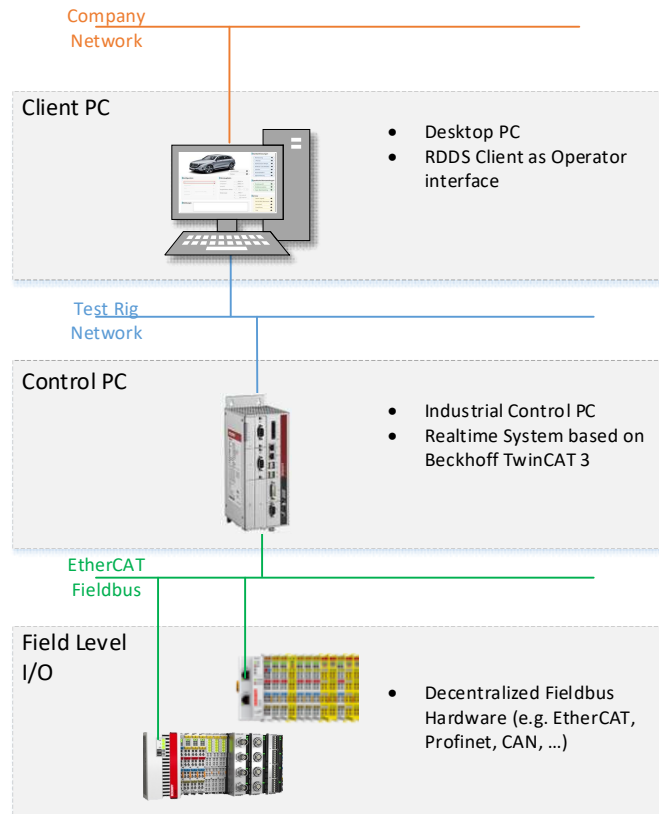


Abb. 3: Schematischer Aufbau der Prüfstandsteuerung Renk Dynamic Data System (RDDS)

2.2 Methodischer Ansatz zur Nutzung virtueller Simulationsmodelle

Zur systematischen Nutzung virtueller Simulationsmodelle im Kontext des beschriebenen Prüfstands werden drei methodisch klar abgegrenzte Einsatzszenarien unterschieden. Diese orientieren sich an der jeweiligen Fragestellung, dem erforderlichen Detaillierungsgrad sowie am Zeitpunkt im Lebenszyklus des Prüfstands.

2.2.2 Model Based Design

Bei diesem Ansatz stellt das Simulationsmodell das zentrale Element in der Entwicklung eines Prüfstands dar. Typische Ziele sind die Auslegung von Komponenten und des mechanischen Systems, beispielsweise durch die Ermittlung von Eigenfrequenzen und deren potenzieller Anregung im Betrieb. In diesem Beitrag wird das Model-Based Design exemplarisch anhand des Reglerentwurfs für die Belastungseinheit des Prüfstands sowie dessen Absicherung dargestellt. Die Regelstrecke wird hierzu in Matlab/Simulink als reduziertes Mehrkörpersystemmodell abgebildet, das die relevanten Freiheitsgrade von Prüfstand, Aktuatorik und Prüfling berücksichtigt. Auf Basis dieses Modells werden Regelungsstrategien entworfen und bewertet. Für einfache Regelungsaufgaben werden klassische PID-Strukturen direkt in der Prüfstandssteuerung implementiert. Die in diesem Beitrag betrachtete Belastungseinheit erfordert jedoch eine komplexere Regelungsstrategie für das gekoppelte Mehrkörpersystem sowie eine

Beobachterstruktur zur Kompensation von Verformungen während des Betriebs. Der in Matlab/Simulink entwickelte Regler wird mithilfe des Matlab Coder als echtzeitfähiger Code für Beckhoff TwinCAT generiert und direkt in die Prüfstandssteuerung (RDDS) integriert [3]. Dieser Ansatz ermöglicht eine reproduzierbare und systematische Entwicklung der Regelungsstrategie sowie eine erste Auslegung der Regelungsparameter vor der realen Inbetriebnahme.

2.2.3 Virtuelle Inbetriebnahme

Der zweite Ansatz beschreibt den Einsatz virtueller Simulationsmodelle im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme. Dabei wird ein echtzeitfähiges Simulationsmodell des Prüfstands einschließlich Prüfling mit der realen Steuerung gekoppelt. Ziel ist es, Steuerungsfunktionen, Prüfabläufe und Fehlerszenarien bereits vor der physischen Inbetriebnahme zu testen. Auf diese Weise lassen sich Risiken reduzieren, Inbetriebnahmezeiten verkürzen und Prüfsequenzen sowie erwartete Ergebnisse frühzeitig mit dem Kunden abstimmen. Typische untersuchte Szenarien umfassen Sensorfehler, Aktuatorbegrenzungen, Grenzlastfälle sowie Abweichungen im Systemverhalten. Darüber hinaus können Fehlerfälle simuliert werden, die im realen Betrieb zu irreparablen Schäden am Prüfstand oder am Prüfling führen würden [4].

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der simulationsgestützten Reglerauslegung

Für die Regelung der Belastungseinheit wurde ein dynamisches Modell für die Regelstrecke erstellt. Wie in Abbildung 4 dargestellt, besteht die Strecke aus einem hydraulischen und einem mechanischen Teilsystem. Das Modell ermöglicht die Analyse des Übertragungsverhaltens. Schnittstelle zwischen beiden Systemen ist die Zylinderkraft.

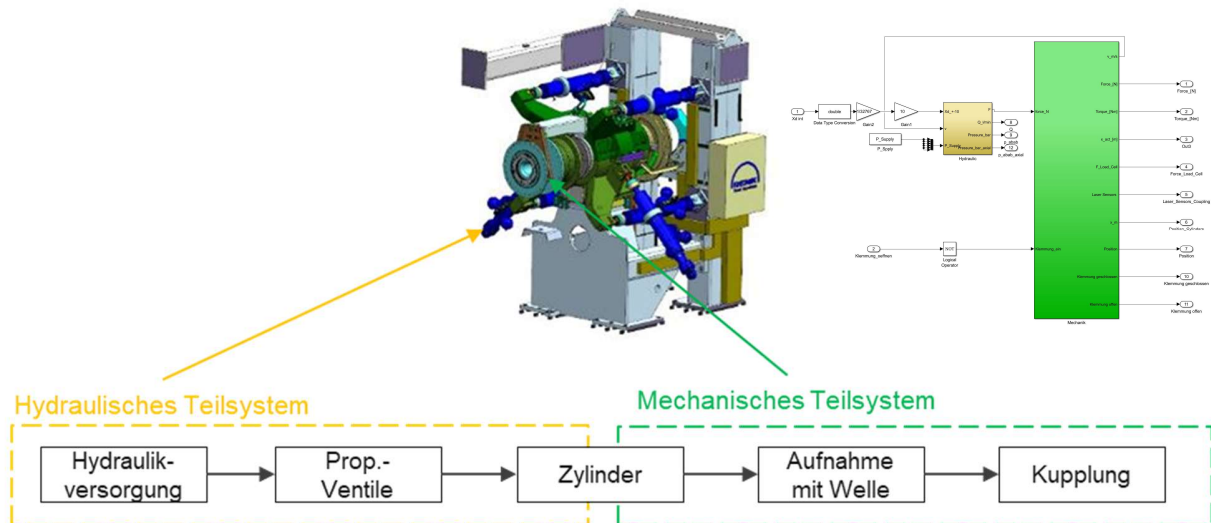


Abb. 4: Schematische Darstellung der Regelstrecke für die Belastungseinheit

Als nächstes folgt das Reglermodell. Dieses umfasst eine kombinierte Kraft- und Wegregelung mit fünf Freiheitsgraden. Außerdem werden mehrere Berechnungsmodule zur Kompensation struktureller Verformungen integriert, diese berücksichtigen z.B. die Richtungsänderung der Kraftvektoren aufgrund von Verformungen.

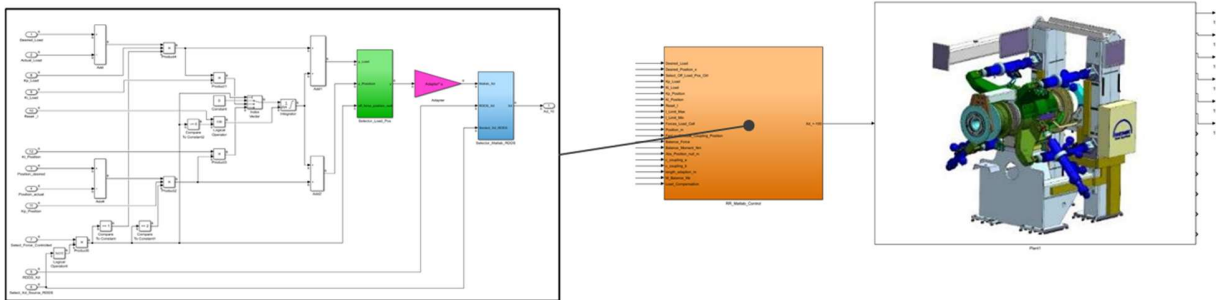


Abb. 5: Regelung und Regelstrecke in Matlab/Simulink

Exemplarisch wird in der Abbildung 6 der Nachweis erbracht, dass das volle Biegemoment in weniger als vier Sekunden aufgebracht werden kann. In der Abbildung sieht man ebenfalls, dass die starke mechanische Kopplung fast keinen Einfluss auf die Regelung hat.

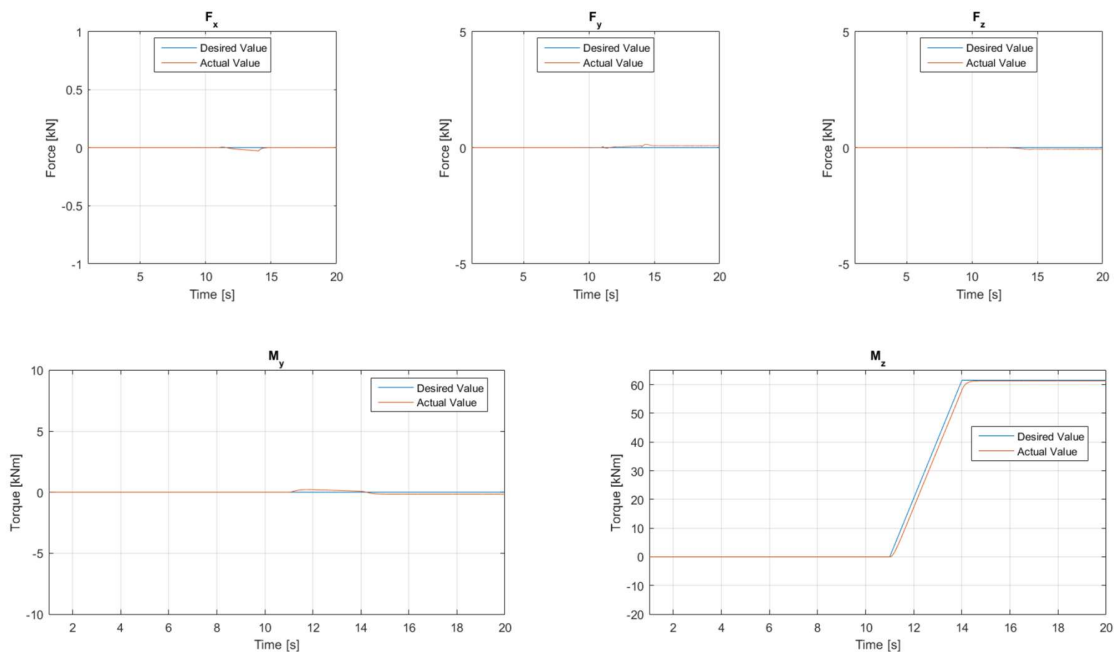


Abb. 6: Simulationsergebnisse der Regelung des Biegemoments mit maximaler Dynamik

Darüber hinaus wurden zahlreiche weitere Analysen durchgeführt, unter anderem zur erreichbaren Regelbandbreite und zur Stabilität der Regelung. Auf dieser Basis konnte die geforderte Dynamik der Kundentests validiert sowie die erforderliche Durchflussmenge der Stellventile und damit die notwendige hydraulische Versorgung ausgelegt werden. Die durchgeführten Analysen sind beliebig erweiterbar und hängen maßgeblich von der gewählten Modellierungstiefe ab. Da in diesem Beitrag die Methodik und das grundsätzliche Vorgehen im Vordergrund stehen, werden diese Ergebnisse hier nicht weiter im Detail dargestellt.

3.3 Ergebnisse der virtuellen Inbetriebnahme

Im Rahmen der virtuellen Inbetriebnahme wurde das echtzeitfähige Simulationsmodell mit der realen Prüfstandsteuerung gekoppelt. Dadurch konnten Steuerungslogik, Prüfsequenzen und Sicherheitsfunktionen vor der physischen Inbetriebnahme getestet werden.

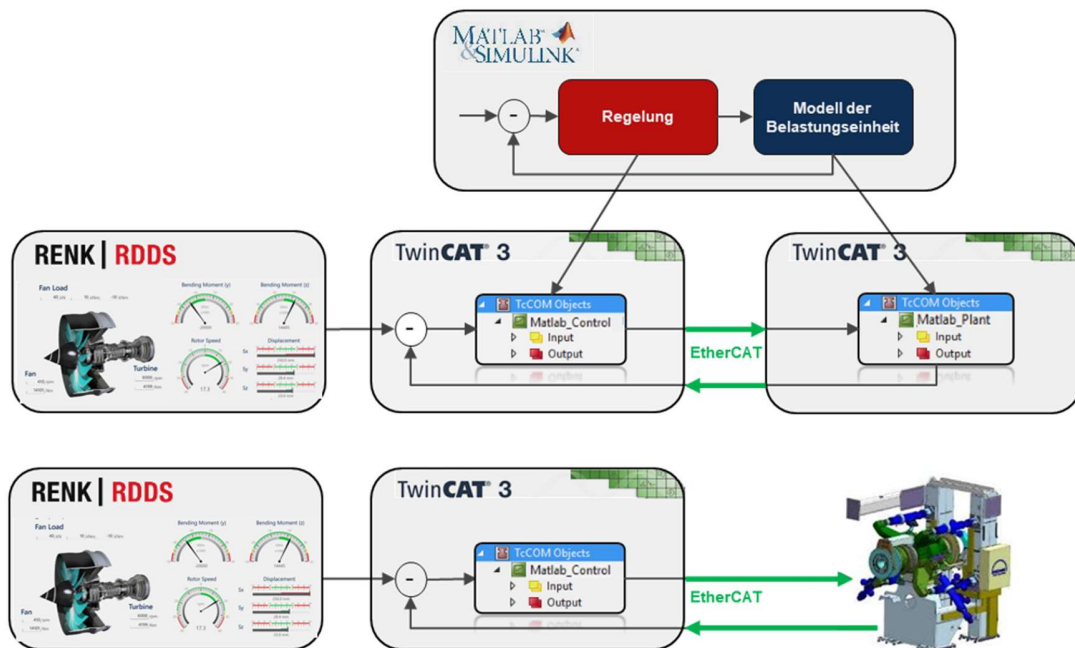


Abb. 7: Darstellung der Entwicklungsschritte, von der Simulation über die virtuelle Inbetriebnahme bis hin zur Inbetriebnahme der realen Anlage

Abbildung 7 zeigt den prinzipiellen Ablauf der virtuellen Inbetriebnahme: Als erstes erfolgt eine rein modellbasierte Analyse in Matlab/Simulink. Anschließend werden das Reglermodell und die Regelstrecke als echtzeitfähige Modelle erstellt. Die Code-Generierung erfolgt in diesem Fall mit dem Simulink Coder für Beckhoff TwinCAT 3. Anschließend werden die Code-Module in die Prüfstandsteuerung RDDS integriert und virtuell in Betrieb genommen. Zuletzt erfolgt die Inbetriebnahme der tatsächlichen Anlage mit einer bereits getesteten Software. Im virtuellen Betrieb wurden unter anderem folgende Szenarien untersucht:

- Normalbetrieb
- Zu- und Abschaltung
- Not-Aus bzw. Stromausfall
- Mechanische Fehlerfälle, z.B. Prüflingsbruch

Die Ergebnisse zeigen, dass Fehlerszenarien reproduzierbar getestet werden können, ohne Risiken für Hardware oder Personal einzugehen. Zudem können Prüfsequenzen vorab abgestimmt und optimiert werden, was die reale Inbetriebnahmezeit deutlich reduziert.

Exemplarisch wurden die Aufwände in der folgenden Abbildung dargestellt. Für diese Auswertung wurde ein anderer Prüfstandstyp (Helikoptergetriebe-Prüfstand) herangezogen, da hierfür mehrere Vergleichsdaten verfügbar waren. Es zeigte sich eine Reduktion der Inbetriebnahmezeit beim Kunden um etwa 50 %. Dem gegenüber steht ein erhöhter Aufwand für die Erstellung des digitalen Zwillings, der jedoch durch zusätzliche Effekte wie das reduzierte Risiko von Schäden oder Fehlentwicklungen überkompensiert wird.

4. Diskussion

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass virtuelle Simulationsmodelle einen signifikanten Beitrag zur Beherrschung der steigenden Komplexität moderner Prüfstände leisten können. Insbesondere bei mehrachsigen, dynamischen und

stark gekoppelten Systemen ermöglicht der Einsatz von Simulation eine frühzeitige Identifikation kritischer Betriebszustände und reduziert technische Risiken bereits in frühen Projektphasen.

4.1 Wann ist der Einsatz von Simulationsmodellen sinnvoll?

Der Nutzen virtueller Simulationsmodelle ist stark abhängig von der Art des Prüfstands und der zugrunde liegenden Fragestellung. Besonders sinnvoll ist der Einsatz bei:

- Prüfständen mit komplexen Antriebssträngen und entsprechenden Schwingungsphänomenen,
- mehrachsigen Belastungssystemen mit gekoppelten Freiheitsgraden,
- variantenreichen Prüflingskonfigurationen,
- sowie bei komplexen Regelungsaufgaben.

Demgegenüber ist der Mehrwert bei einfachen, rein statischen Prüfungen begrenzt. In solchen Fällen übersteigt der Modellierungsaufwand häufig den erzielbaren Erkenntnisgewinn. Nicht jede Fragestellung rechtfertigt also die Erstellung eines digitalen Zwillings. Für komplexe Prüfstände mit langen Lebenszyklen überwiegt jedoch der Nutzen deutlich. Die notwendige Detailtiefe des Modells ist ebenfalls anwendungsabhängig. Während für Auslegungsfragen oft reduzierte Mehrkörpersystemmodelle ausreichend sind, erfordern Regelungsentwurf und virtuelle Inbetriebnahme detailliertere und teilweise echtzeitfähige Modelle. Die Ergebnisse bestätigen das Prinzip, Modelle so einfach wie möglich, aber so genau wie nötig zu halten.

4.2 Nutzen der Modellierung im Entwicklungs- bzw. Engineeringprozess

Die simulationsgestützte Reglerauslegung und die Virtuelle Inbetriebnahme sind zwei elementare Vorteile im Prüfstandsbereich. Die Grenzen und Bandbreite der Regelung lassen sich quantitativ vorab bewerten. Dadurch können Regelungsstrukturen und Aktuatorgrößen zielgerichteter ausgelegt werden. Die virtuelle Inbetriebnahme erweitert diesen Ansatz, indem Steuerungsfunktionen und Prüfabläufe bereits vor der realen Inbetriebnahme getestet und abgestimmt werden können. Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass Simulation nicht nur zur einmaligen Machbarkeitsanalyse, sondern im Rahmen des „Model Based Design“ als durchgängiges Entwicklungswerkzeug eingesetzt werden kann.

4.3 Interpretation im Kontext des digitalen Zwillings

Bei der Renk Test System GmbH werden Simulationsmodelle primär als Entwicklungswerkzeug eingesetzt, wobei auch deren Nutzung im Betrieb zunehmend an Bedeutung gewinnt. Naheliegende Anwendungsfälle sind die Absicherung neuer Prüflingsvarianten oder Umbauten am Prüfstand. Darüber hinaus zeigt sich ein zunehmendes Potenzial in der kontinuierlichen Nutzung digitaler Zwillinge über den gesamten Lebenszyklus eines Prüfstands. Erst durch fortlaufende Validierung, die Anpassung an reale Messdaten sowie die Kopplung mit der realen Steuerung entsteht ein „lebendes“ Modell mit nachhaltigem Nutzen. Mithilfe sogenannter Pre-Simulation-Tools können Betreiber beispielsweise Prüfaufbauten oder Testsequenzen virtuell absichern, bevor wertvolle Prüfstandszeit in Anspruch genommen wird.

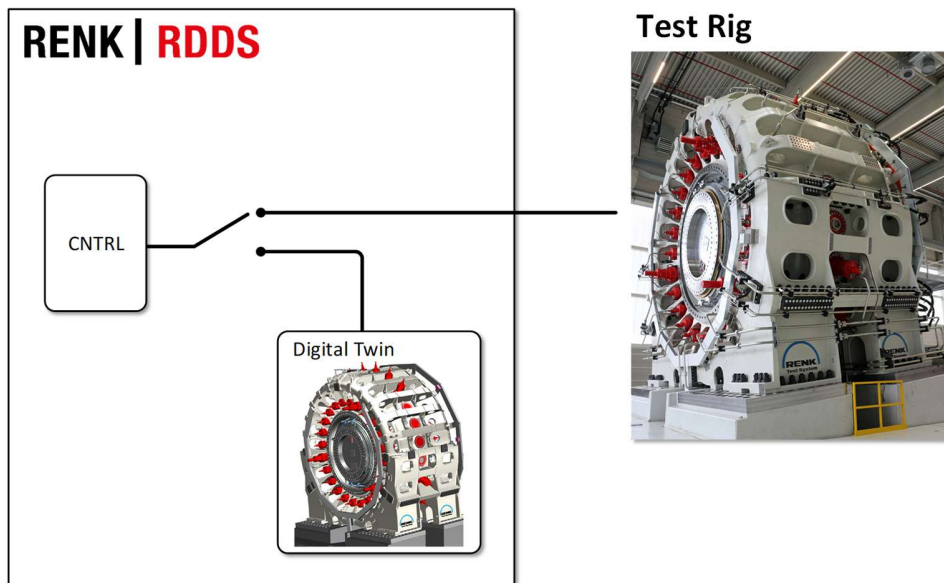


Abb. 9: Schematische Darstellung des Pre-Simulation-Tools am Beispiel eines Windkraft-Lagerprüfstands

4.4 Grenzen und Unsicherheiten der Simulation

Trotz der gezeigten Vorteile unterliegt der Einsatz virtueller Simulationsmodelle klaren Grenzen. Die Qualität der Ergebnisse hängt maßgeblich von den zugrunde liegenden Modellannahmen ab. Insbesondere die realistische Einschätzungen von Parametern (z.B. Dämpfungswerte oder realistische Schwingungsanregungen) benötigt entsprechende Erfahrung. Auch sind nichtlineare Effekte und reale Randbedingungen (z.B. Verschleiß, Ausrichtungsfehler etc.) nur eingeschränkt modellierbar. Desweiteren gibt es wirtschaftliche Grenzen (Aufwand) und technische Einschränkung (Echtzeitfähigkeit), insbesondere bei detaillierten Modellen mit einer hohen Anzahl an Freiheitsgraden. Hier ist ein bewusster Kompromiss zwischen Modellgenauigkeit und Aufwand bzw. Rechenzeit erforderlich. Die Ergebnisse unterstreichen, dass Simulation reale Messungen nicht ersetzen kann. Vielmehr ergänzen sich Simulation und Experiment, indem Messdaten zur Validierung und kontinuierlichen Verbesserung der Modelle herangezogen werden.

5. Schlussfolgerung

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass der methodische Einsatz virtueller Simulationsmodelle und digitaler Zwillinge einen wesentlichen Beitrag zur Auslegung, Inbetriebnahme und zum Betrieb komplexer Prüfstände leisten kann. Anhand eines Prüfstands für Luftfahrtgetriebe wurde eine strukturierte Vorgehensweise beispielhaft vorgestellt, die von der simulationsgestützten Regelungsentwurf bis hin zur virtuellen Inbetriebnahme reicht. Bereits reduzierte dynamische Modelle reichen aus, um betriebliche Anforderungen zu validieren und potenzielle Designfehler frühzeitig zu identifizieren. Dadurch können konstruktive Anpassungen und Randbedingungen gezielt abgeleitet werden. Die simulationsgestützte Reglerauslegung ermöglicht zudem eine quantitative Bewertung der Regelungsfunktionen. Die virtuelle Inbetriebnahme erweist sich schließlich als effektives Werkzeug zur Risikominimierung und zur Verkürzung der realen Inbetriebnahmephase. Der Nutzen virtueller Simulationsmodelle hängt stark von der Fragestellung und der gewählten Modelltiefe ab. Simulation ist kein Selbstzweck, sondern entfaltet ihren Mehrwert insbesondere bei hochdynamischen, gekoppelten und variantenreichen Prüfständen. Reale

Virtuelle Simulationsmodelle für Prüfstandsentwickler und Prüfstandsbetreiber

Messungen bleiben unverzichtbar, da sie sowohl der Validierung als auch der kontinuierlichen Verbesserung der Modelle dienen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Simulation und physischer Prüfstand keine konkurrierenden, sondern komplementäre Werkzeuge sind. Der digitale Zwilling erweitert den Prüfstand um eine virtuelle Ebene, reduziert Risiken und Entwicklungsaufwände und trägt damit zu einer effizienteren und sichereren Prüfstandsentwicklung bei.

Literatur

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin
- [2] <https://www.renk.com/de/produkte/pruefsysteme/luftfahrt/pruefstaende-fuer-turbinengetriebe>
- [3] <https://www.beckhoff.com/de-de/produkte/automation/matlab-r-and-simulink-r-fuer-twincat-3/>
- [4] VDI/VDE 3693 Blatt 1 - Virtuelle Inbetriebnahme - Modellarten und Begriffe

QLab4.0 für TestRigs – Ein Blick auf die Zukunft

Dipl.-Ing. Ben Haest

Quality Electronics Design S.A., 32, rue des Romains, 6478 Echternach, Luxemburg

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit die Produktivität allgemein zu steigern und eine Lösung, basierend auf eine Standard Schnittstelle, wird präsentiert. Die Lösung QLab4.0 bietet die Flexibilität, einheitliche Bediener-Oberfläche und einen modularen Aufbau um komplexen Prüfstände zu synchronisieren und zu überwachen.

Einleitung

Die Prüfaufgaben werden immer komplexer. Während eine Prüfung, müssen die Prüflinge betriebsfähig sein und müssen gesteuert werden bzw. angetrieben werden. Oft sind die Prüflingen Prototypen und sollten überwacht und geschützt werden. Die Prüfaufgaben werden auch immer komplexer und der Kunde liefert zusätzlich seine Steuereinheit um die unterschiedliche Betriebsbedingungen vom Prüfling zu simulieren. Das wäre noch die einfachste Herausforderung.

In 2025 habe ich die wirtschaftlichen Herausforderungen der Umweltsimulationslabore untersucht. Die Ergebnisse werden im Tagungsband der Jahrestagung 2025 der GUS e.V. (Gesellschaft der Umwelt Simulation) übernommen.

Die vorgeschlagene Lösung, QLab4.0, ist basierend auf die GUS Standard Schnittstelle, entwickelt durch den Arbeitskreis (AK) „Standard Schnittstelle“ der GUS. Die Definition erhalten Sie auf die Webseite der GUS: www.gus-ev.de oder auf die Webseite www.gus-interface.com

Herausforderungen der Umweltsimulationslabore

Die aktuelle Lage der Prüflabore in der Umweltsimulation ist aufgrund vielfältiger Herausforderungen schwierig. Darüber hinaus treten die Herausforderungen gleichzeitig auf.

1. Demografischer Wandel

Dass die Bevölkerung älter wird müssen wir nicht mehr bezweifeln. Es gibt genügend Studien [1] die über den demografischen Wandel und deren Folgen berichten. Viele Unternehmen haben es ganz schwierig neue Arbeitnehmer zu finden, und da sind die Prüflabore keine Ausnahme.

Abbildung 1 zeigt wie die Demografie sich seit 1990 geändert hat.

Altersaufbau der Bevölkerung 2022
im Vergleich zu 1990

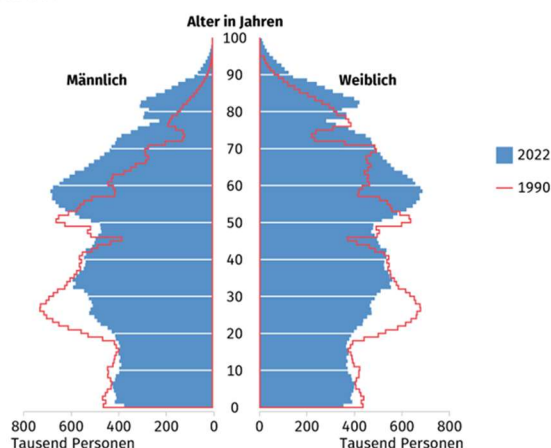


Abb. 1: Statistisches Bundesamt 2023

Auch auf europäische Ebene wird über diese Lage nachgedacht und gibt es Studien, die zeigen was zu erwarten ist. Wir müssen uns auf die Zukunft vorbereiten.

Die Studie von McKinsey [2] spielen noch weitere Phänomene eine wichtige Rolle. Aufgrund der Überalterung der Bevölkerung dürfte die Zahl der Erwerbsfähigen in Europa bis 2030 um 13,5

Millionen Menschen (oder 4 Prozent) schrumpfen. Der Trend zu kürzeren Arbeitswochen könnte das Arbeitskräfteangebot um weitere 2 Prozent reduzieren. Seit 2000 ist die Arbeitswoche im Durchschnitt mit eine Stunde verkürzt.

2. *Geografischer Wandel*

Zitat [2]: „48 dynamische Städte, darunter Amsterdam, Kopenhagen, London, Madrid, München und Paris, in denen 20 Prozent der europäischen Bevölkerung leben, erwirtschafteten zwischen 2007 und 2018 43 Prozent des europäischen BIP-Wachstums, 35 Prozent des Nettoarbeitsplatzwachstums und 40 Prozent des Bevölkerungswachstums. Im Gegensatz dazu verzeichnen 438 schrumpfende Regionen mit 30 Prozent der Bevölkerung, vor allem in Ost- und Südeuropa, rückläufige Erwerbstätigenzahlen, eine ältere Bevölkerung und ein niedrigeres Bildungsniveau.“

3. *Ausbildung*

Zitat [2]: „Mehr als die Hälfte der europäischen Arbeitnehmer wird mit tiefgreifenden Veränderungen konfrontiert sein. Die Automatisierung wird von allen Arbeitnehmern den Erwerb neuer Fähigkeiten erfordern. Etwa 94 Millionen Arbeitnehmer müssen zwar nicht ihren Beruf wechseln, aber sie werden vor allem eine Umschulung benötigen, da 20 Prozent ihrer derzeitigen Tätigkeiten von der Technologie übernommen werden. Während einige Arbeitnehmer in Berufen, die im Niedergang begriffen sind, möglicherweise ähnliche Arbeit finden können, müssen 21 Millionen bis 2030 möglicherweise ihren Beruf wechseln. Den meisten von ihnen fehlt eine Hochschulbildung. Neu geschaffene Arbeitsplätze werden anspruchsvollere Fähigkeiten erfordern, die heute schon Mangelware sind.“

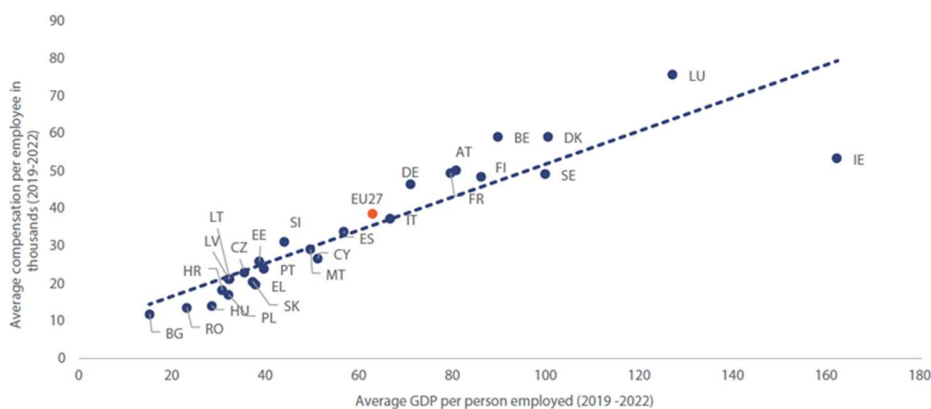
4. *STEM (Science Technology Engineering Mathematics)*

Oder in Deutsch MINT (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik). Es braucht einige Jahre um einen neuen Mitarbeiter auszubilden. Wir müssen feststellen, dass sehr oft nicht den richtigen Arbeitnehmer angestellt wurde. Besser gesagt: wird nicht die Person mit der richtigen Ausbildung gesucht. Da gibt es auch eine Nichtübereinstimmung zwischen den Arbeitsmarkt und den Unterricht. Langsam wird die Politik sich von der Lage bewusst und versucht, zusammen mit dem Unterricht, die STEM-Fachbereiche zu promoten. Da liegen für die Arbeitnehmer in die Zukunft auch die meiste Chancen.

5. *Produktivität*

Wir versuchen alle, unseren Wohlstand zu behalten und zu verbessern. Aber, was oft nicht berücksichtigt wird, ist die Tatsache, dass unseren Wohlstand durch die Produktivität bestimmt wird.

Graph 2.10: Average salary and average productivity, 2019-2022



Note: Amounts in euro.

Source: Own calculations based on Eurostat, Average full time adjusted salary per employee (nama_10_ft), GDP and main components (output, expenditure and income) (nama_10_gdp), and Population and employment (nama_10_pe).

Abb. 2: Lohn und Produktivität

In alle Studien und Veröffentlichungen, wird darauf hingewiesen, dass in die Zukunft die MINT-Ausgebildeten bessere Chancen ein Job zu finden haben und dass der Bedarf an diese Erwerbstätigen auch am höchsten wächst. Aber ohne Steigung der Produktivität helfen neue Kollegen auch nicht. Es gibt ein klares lineares Verhältnis zwischen die Produktivität und den Wohlstand. Die Grafik [2] zeigt den Zusammenhang zwischen Wohlstand und Produktivität in die EU. Die vertikale Achse steht für das Gehalt pro Arbeitnehmer und horizontal steht der Beitrag von

dem Angestellten zu das BIP zwischen 1019 und 2022. Da liegt Deutschland knapp über den EU-Durchschnitt. Noch klarer sieht man die Proportionalität in einer Grafik von Australien [3].

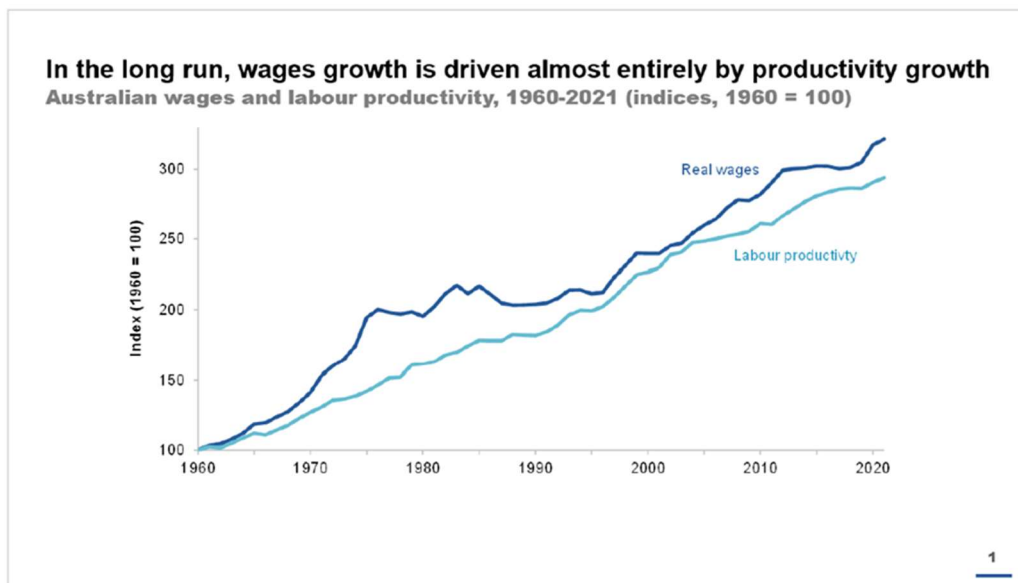


Abb. 3: Wachstum Lohn und Arbeitsproduktivität zwischen 1960 und 2021

Das bringt uns zum Thema, wie die Produktivität im Prüflabor gesteigert werden kann? Die Produktivität bestimmt nicht nur unseren Wohlstand, aber auch die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens. Da kämpfen wir international mit China und die VS.

6. *Standardisierung*

Jeder Arbeitnehmer erwirtschaftet heute mehr als die doppelte Leistung als vor 50 Jahren. Ein Viertel des Wachstums der Arbeitsproduktivität ist auf Standards zurückzuführen [3]. Collaboris [4] fasst zusammen wo Standardisierung beiträgt und definiert auch den Unterschied zwischen „Standardisierung“ und „Automatisierung“. Durch die Einführung von einem Standard in der Kommunikation von unterschiedlichen Systemen, entsteht Flexibilität die weiterführt zu eine Prozessstandardisierung, gesteigerte Effizienz und Produktivität, die zu höherer Rentabilität und Wachstum führen. Weniger Fehler und Nacharbeiten senken die Kosten und erhöhen die Kundenzufriedenheit.

Die GUS Standard Schnittstelle

Die Idee, die Kommunikation zwischen die Prüfgeräte zu standardisieren, entstand schon Ende 1999. Anfang 2000 wurde der AK „Standard Schnittstelle“ gegründet. Am Anfang war das Ziel hauptsächlich die Kommunikation zwischen Schwingungsreglern und Klimakammern zu standardisieren. Es gab immer das gleiche Problem: wenn die Klimakammer fehlerhaft war, hat die Klimakammerprüfung angehalten, aber die Schwingungsprüfung lief weiter, und umgekehrt. Das Ergebnis: Energieverlust, das Prototyp könnte grundsätzlich nicht weiterverwendet werden und die Kundenzufriedenheit war geschadet. Damals war die einzige Lösung eine Hardwarelösung mit zwei Drähtchen zwischen beide Geräte. Halt das eine Gerät an, stoppt auch das andere Gerät. Aber das ist keine Lösung für die immer komplexer werdende Prüfstände und bietet auch keine Flexibilität oder Schutz von Prüflingen.

1. *Definition*

Die meiste Geräte oder Systeme (Schwingungsregler, Klimakammer, Multimeter, Messsysteme, Spannungsversorgung, Datenlogger, usw.) verfügen über eine API (Application Programming Interface). Typischerweise ist diese API ein ActiveX-Komponente. Aber ebenso braucht die Kommunikation mit einem Gerät möglicherweise eine RS-232, RS-485, LAN oder sonstige Hardware Schnittstelle. Die GUS Standard Schnittstelle ist eine Softwareschnittstelle und bestimmt nicht wie die Kommunikation hardwaremäßig aufgebaut wird.

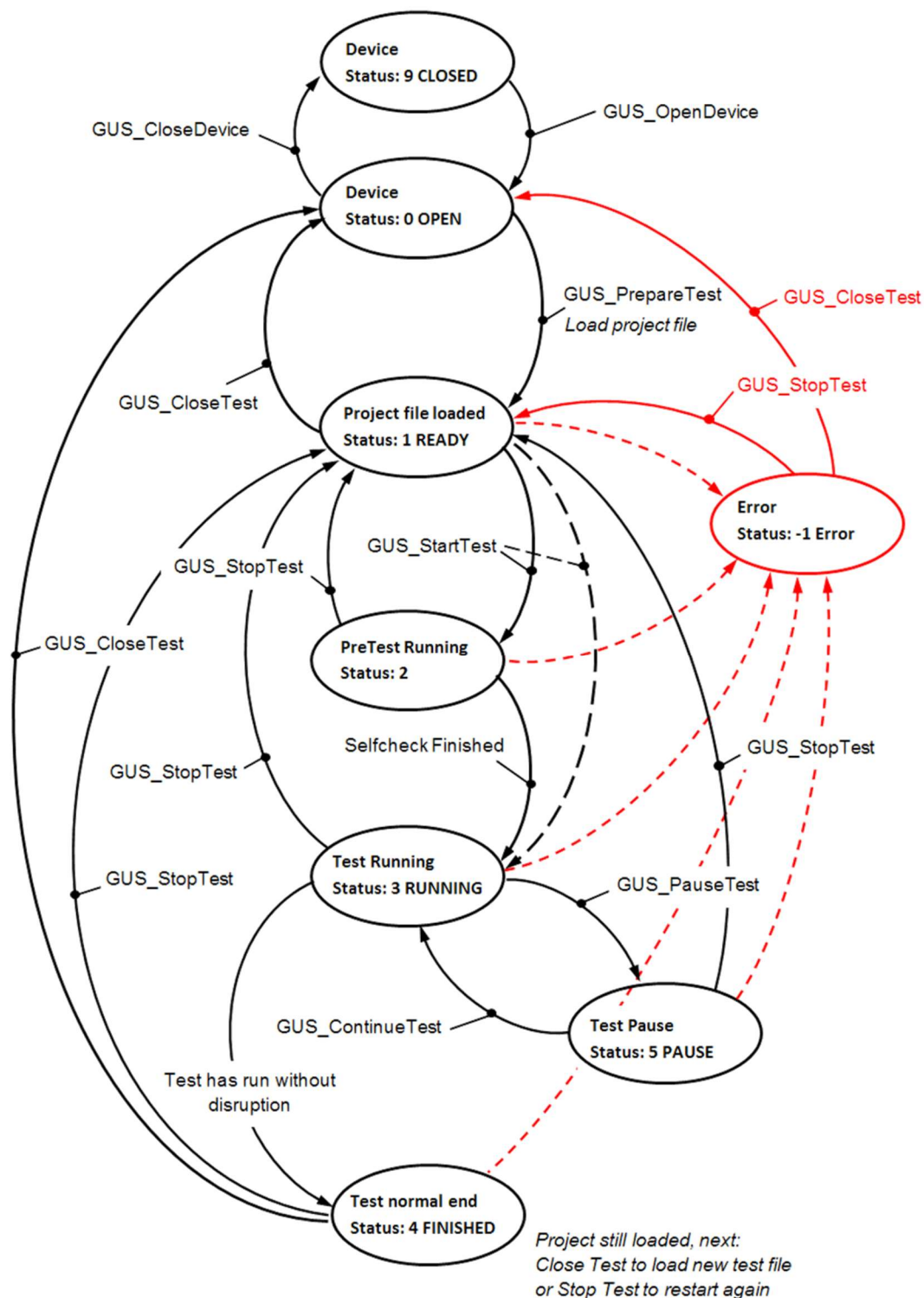


Abb. 4: GUS Standard Status Diagramm

Die GUS Standard Schnittstelle bestimmt den Ablauf von einer Prüfung mit einem Gerät. Der Status bestimmt in welchen Zustand das Gerät und die Prüfung sich befinden. Zuerst wird die Verbindung mit dem Gerät aufgebaut, wird ein Prüfprofil geladen und gestartet. Die Prüfung kann angehalten werden oder pausiert, kann wiederholt werden usw. Der Status und die Befehle sind standardisiert und bestimmen wie man mit einem Gerät kommuniziert, unabhängig vom Geräte-Art.

2. XML-Format

Die Daten, ausgetauscht mit einer übergeordneten Anwendung, werden in ein XML-Format weitergegeben. Beispiele erhalten Sie auf der Webseite www.gus-interface.com. Die Daten werden

in „Groups“ zusammengefasst:

- DeviceInfo Einzelne Infos über das Gerät
- ControlledValues Sollwerte und Aktuelle Wert der Regelkreise.
- Measurements Werte von zusätzliche Messkanäle
- Operation Einzelheiten bzgl. Regel Art, usw.
- Testing Einzelheiten bzgl. Prüfprogrammschritte, Prüfzeit, usw.

Durch das XML-Format kann für jedes Gerät die Kommunikation festgelegt werden, ist der Datenaustausch flexibel und erweiterbar, abhängig vom Gerät.

3. Vorteile

Durch die Anwendung von eine Standard Schnittstelle, entstehen unterschiedliche Vorteile:

- Einheitliche Kommunikation mit allen Geräten.
- Ein gleiches Datenformat für alle Messergebnissen.
- Kontrolle und Synchronisierung von unterschiedlichen Geräten.
- Die Möglichkeit ein Übergeordnetes System zu installieren um die Prozesse zu standardisieren.
- Die gleiche Bedienung von allen Geräten und die Lehrkurve von Neuestellten zu kürzen.
- Die Zeit, nötig für die Protokollierung, zu kürzen.
- Neue Geräte von unterschiedlichen Herstellern schnell einzubinden, ohne Software-Änderungen oder Erweiterungen. (Prinzip: „Plug-and-Play“).
- Da alle Geräte gleich kontrolliert werden, ist es einfacher die Erfahrungen und die Kompetenz vom Labor in die Standard Prozesse zu sichern.

QLab4.0 ein Blick auf die Zukunft

Eine Standard Schnittstelle bringt nichts, wenn keine Anwendung verfügbar ist. In 2015 wurde damit angefangen, die Anwendung „Leonardo“ zu entwickeln, um zu prüfen, ob die Definition der GUS Standard Schnittstelle in der Praxis brauchbar ist. Prüfungen mit Leonardo und Geräte mit eine GUS Standard Schnittstelle werden bei BMW in München, Phoenix Testlab in Blomberg und Aucoteam in Berlin durchgeführt. Die Ergebnisse werden auf der GUS Jahrestagung in 2018 veröffentlicht.

Aber, ein Blick voraus, Leonardo bietet schon die Möglichkeit die Prüfungen zu überwachen und ein Skript zu bestimmen. Ein Skript ist ein sequentielles Programm, ähnlich wie ein SPS-Programm. Die Befehle zu ein oder mehrere Geräte, werden Schritt per Schritt durchgeführt. Damit hat man die Möglichkeit verschiedene Geräte in einem Prüfstand zu synchronisieren und zu überwachen.

In 2023 begann die Entwicklung von QLab4.0. Die Erfahrung mit Leonardo ist der Basis für QLab4.0.

Eine QLab4.0 Konfiguration sieht so aus wie im Bild [5] gezeigt. Der Backbone des Systems ist das LAN.

1. Device Server

Der Device Server (DS) pollt die Geräte. Der DS hat viele Funktionen. Anhand des Befehls „GUS_GetDeviceInfo“ erhält der DS die Konfiguration des Gerätes. Damit kennt der DS welche Regelkanäle zur Verfügung stehen, wie viele Messkanäle das Gerät hat und welche zusätzlichen Signale noch zur Verfügung stehen, inklusive die Einheiten. Ein Regelkanal, Messkanal usw. nennen wir ein „Property“.

Aber wichtig dabei, im DS kann man pro Gerät auch die Abfragefrequenz bestimmen. Nicht jedes Gerät braucht jeder Sekunde die Werte an QLab4.0 weiterzugeben. Die Werte werden mit dem Befehl „GUS_GetInfo“ abgefragt.

Der DS bestimmt auch welche Properties und deren Übersetzung an QLab4.0 übertragen werden. Dies bedeutet, dass nicht alle Info an QLab4.0 weitergeleitet wird und dass die Anzahl Werte, die durch QLab4.0 verarbeitet werden müssen, stark reduziert werden können. Dann bekommt der Benutzer auch nur die Daten woran er interessiert ist.

In der DS ist auch vorgesehen der Name von einem Property zu Übersetzen. Im DS kann man der Name von jeder Property in einem sinnvollen Namen übersetzen.

Verschiedene DS können in einem Netzwerk installiert werden und ein DS kann verschiedene Geräte gleichzeitig abfragen.

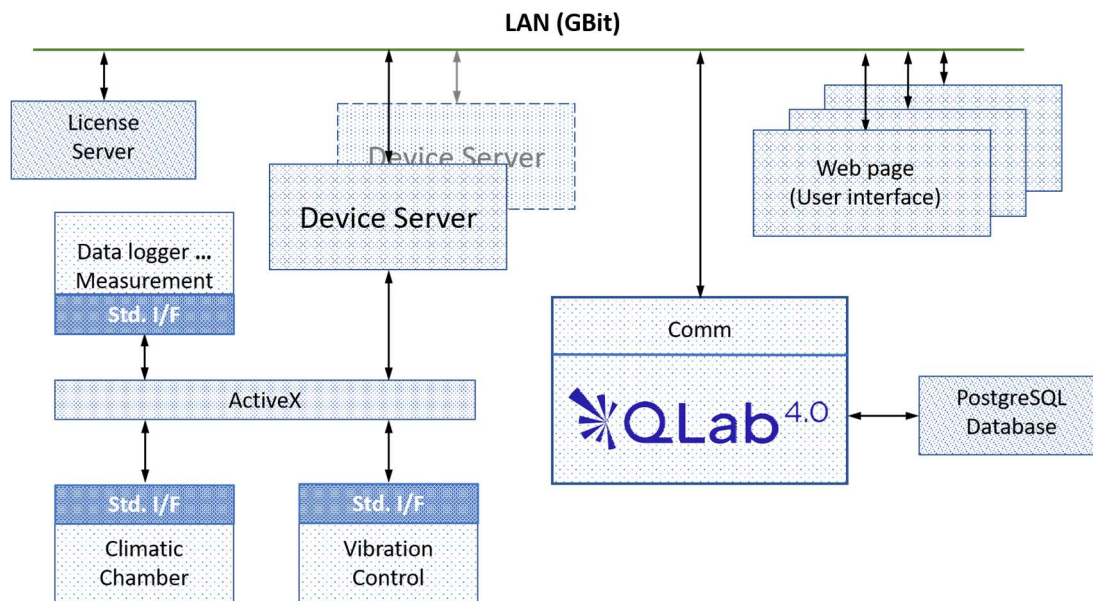


Abb. 5: QLab4.0 Konfiguration

2. *QLab4.0*

Die Anwendung QLab4.0 speichert die Daten der Prüfungen auf die Festplatte. Wenn die Prüfung abgelaufen ist, werden die Ergebnisse in eine SQL-Datenbank kopiert.

Die Anwendung ist wie ein Backend/Frontend oder Client/Server entwickelt. Verschiedene Benutzer haben die Möglichkeit sich gleichzeitig in QLab4.0 anzumelden, die Daten, während eine Prüfung, grafisch auszuwerten und den Status von jeder Prüfung anzuschauen.

Sehr wertvoll dabei ist, dass jedes Gerät mit den gleichen Befehlen bzw. Bedienoberfläche bedient werden kann. So schafft QLab4.0 es alle Geräte gleichzeitig anschaulich zu machen.

Ein Beispiel zeigt das Bild [6].

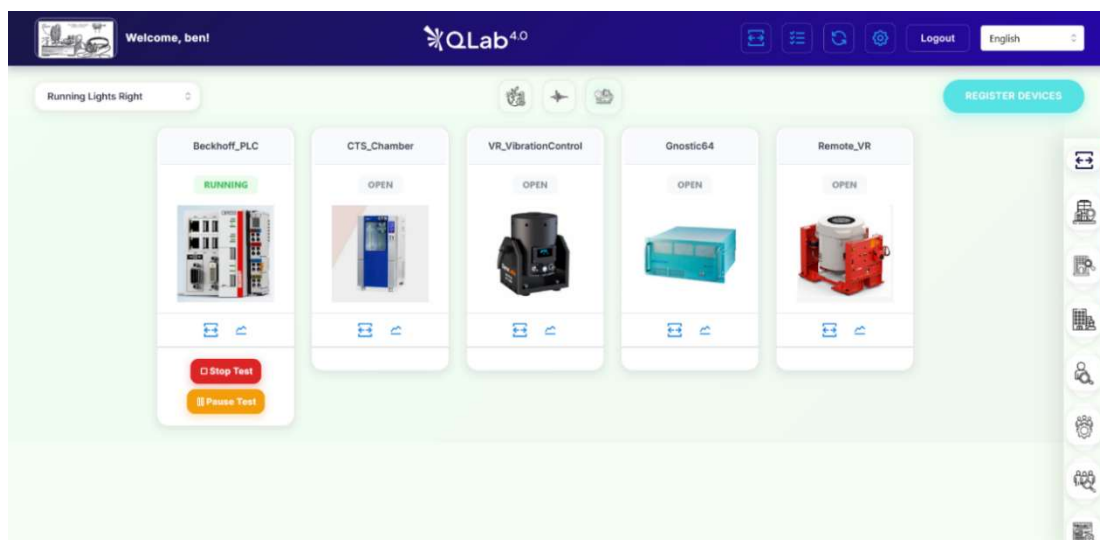


Abb. 6: ein Überblick mit unterschiedlichen Geräten

3. *Skript*

Auf diese Art gibt es die Möglichkeit komplexe Prüfstände aufzubauen, ohne jedes Mal ein neues Steuerprogramm, neue Schnittstellen oder sonstige Abläufe zu entwickeln. In QLab4.0 hat man die Möglichkeit „Cluster“ zu definieren, z.B. eine Klimakammer mit Schwingtisch, und für dieses Cluster ein „Skript“ zu entwickeln.

In QLab4.0 wird es einfach ein Skript oder ein Sequentiellen Ablauf von einem Prüfprogramm zu definieren. Anhand grafischer Symbole oder Blöcke, wird definiert welche Befehle an die Geräte gesendet werden und unter welche Bedingungen gezielte Aktionen gestartet werden müssen. Ein

Kunde bzw. Bediener müssen nicht unbedingt das GUS Standard Status Diagramm kennen um ein Skript aufzubauen. Ein Beispiel der Bedieneroberfläche sieht man im Bild [7].

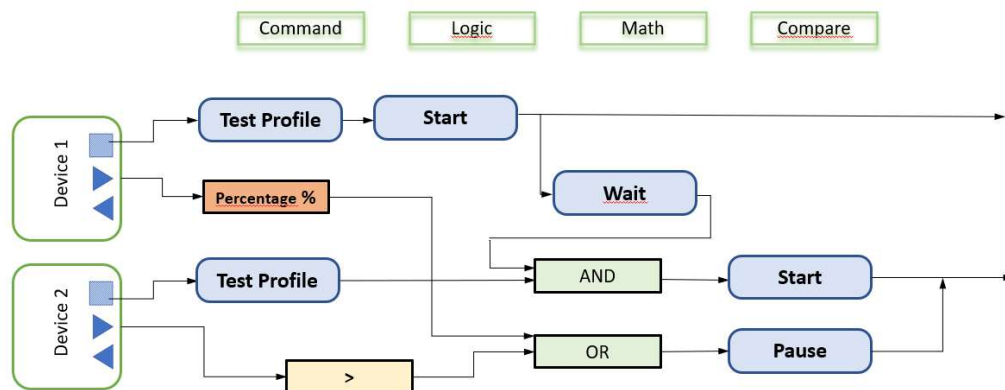


Abb. 7: Bedieneroberfläche um ein Skript aufzubauen.

Durch die GUS Standard Schnittstelle, kann man beliebig jedes Gerät in einem Skript einbinden. Beispielsweise hat man die Möglichkeit eine SPS (wie Beckhoff) oder ein Messgerät (wie ein GnΩstic64-Messsystem) im Skript einzubinden. Besonders eine SPS bietet die Möglichkeit ein anderes System ohne GUS Standard Schnittstelle zu steuern, Ventile zu schalten, Spannungen zu messen, Sollwerte zu definieren, usw. Da die GUS Standard Schnittstelle eigentlich eine Software Schnittstelle definiert kann man auch bequem mit andere Software-Systeme kommunizieren, wie z.B. LabVIEW. Kurz zusammengefasst, fungiert die GUS Standard Schnittstelle als Dolmetscher. Auf der einen Seite wird die API-Sprache des Gerätes gesprochen, auf der anderen die Sprache der GUS Standard Schnittstelle.

Schlussfolgerung

Durch die Einführung von eine Standard Schnittstelle, gibt es jetzt die Möglichkeit alle Daten von einem Prüfstand in nur einem Format zu speichern und zu verarbeiten, die Bedienung von allen Geräten wird einheitlich und hat man die Möglichkeit auf eine einfache Art und Weise ein sequentielles Prüfprogramm zu definieren. Letztendlich ist das Ziel die Produktivität und unsere Wettbewerbsfähigkeit von den Laboren zu steigern.

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/inhalt.html#>
- [2] McKinsey Global Institute / The future of Work in Europe. Discussion paper
June 2020.
- [3] Macroeconomics Benefits of Standardisation / Evidence from six Northern
European countries / MENON Publication No. 43/2023 / By Øyvind
Vennerød, Linn Skyum, Jonas Erraia and Kristoffer Midtømme
- [4] Collaboris / Telford, Shropshire / UK
<https://www.collaboris.com/process-standardization-business-success/>

Vergleich eines Aluminium-Karbon-Gleittisches mit einem Magnesium-Gleittisch

Simon Nutsch, Peter Sikora, Matthes Kirchmeier, Michael Sauer

htw saar, Goebenstraße 40, 66117 Saarbrücken, Deutschland

TIRA GmbH, Eisfelder Str. 23-25, 96528 Schalkau, Deutschland

Vibration Research Europe GmbH, Marker Höh 16, 96524 Förnitztal, Deutschland

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine Gleittisch aus Aluminium-Karbon-Verbundmaterial mit einem herkömmlichen Gleittisch aus Magnesium verglichen. Mit dem Aluminium-Karbon-Gleittisch konnte eine Gewichtsreduktion von 16 kg erreicht werden. Zum Vergleich der beiden Gleittische wurde Eigenfrequenzen mithilfe einer Rauschanregung und Messung der Beschleunigungsdichte an vier Positionen auf beiden Gleittischen bestimmt. Aus den Messungen der Beschleunigungsdichte konnten für den Magnesium-Gleittisch 512 und 1422 Hz und für den Aluminium-Karbon-Gleittisch 335 und 1207 Hz als Eigenfrequenzen identifiziert werden. Als Resonanzfrequenzen der beiden Gesamtsystem konnten 1214 Hz (Magnesium-Gleittisch) und 963 Hz (Aluminium-Karbon-Gleittisch) bestimmt werden. In einer zweiten Messreihe wurde an 62 Messpunkten auf beiden Gleittischen an 17 diskreten Frequenzen Amplituden bei einer Regelung auf eine Soll-Beschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ an den Tischenden in drei Achsen bestimmt. Beim Vergleich der Amplituden konnte eine höhere Dämpfung des Aluminium-Karbon-Gleittisches in der im Vergleich zum Magnesium-Gleittisch in der x-Achse festgestellt werden. In der y- und z-Achse wurden tendenziell höhere Amplituden auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch gemessen. Insgesamt zeigen beide Gleittische ein vergleichbares räumliches Schwingungsverhalten. Damit konnte ein wesentlicher Zwischenschritt erreicht werden, um die Eignung des Aluminium-Karbon-Gleittisches für die Durchführung von Belastungsprüfungen zu bestätigen.

Nomenklatur

A – Amplitude

a – Beschleunigung

B – Iterationen

m – Masse

1. Einleitung

Die Belastungsprüfung von Bauteilen wird mit Schwingprüfanlagen z.B. nach DIN EN 60068-2-6 durchgeführt [1]. Hierbei werden Prüflinge auf Gleittischen fixiert und definiert durch periodische Schwingungen, Rauschanregungen oder Impulsbelastungen beansprucht. Neben dem Prüfling und der Fixtur stellt auch der Gleittisch eine bewegte Masse dar, die durch den Schwingerreger beschleunigt werden muss. Nach aktuellem Stand der Technik werden in der Bauteilprüfung überwiegend Magnesium-Gleittische eingesetzt, da Magnesiumlegierungen aufgrund ihres günstigen Verhältnisses von Festigkeit zu Masse häufig bevorzugt werden [2]. Der Einsatz von Verbundwerkstoffen bietet das Potenzial, die Masse eines Gleittisches signifikant zu reduzieren. Eine Gewichtsreduktion des Gleittisches ermöglicht es, bei gleicher Erregerleistung höhere Belastungsamplituden zu erzielen, Prüflinge mit größerer Masse zu testen oder den Energieaufwand zu verringern. Darüber hinaus werden Verbundmaterialien aufgrund ihrer schwingungstechnischen Eigenschaften, insbesondere ihrer modalen Dämpfung in der Literatur als alternative zu Magnesium als Gleittischmaterial diskutiert [3]. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit die Frequenzantwort eines Aluminium-Karbon-Gleittischprototyps mit einem Magnesium-Gleittisch unter Rausch- und Sinusanregung experimentell verglichen. Ziel ist es zu bewerten, ob Aluminium-Karbon-Gleittische grundsätzlich für den Einsatz in der normgerechten Bauteilprüfung geeignet sind.

Der Beitrag wurde in einem doppelt anonymisierten Peer-Review-Verfahren begutachtet und angenommen.

2. Prüfstands Beschreibung und Methodik

Beide Gleittische wurden mit der Vibrationsschwinganlage TV 57315/LS-340 [4] angeregt. Als Leistungsverstärker kam das Modell A 3 01 11 042 [5] zum Einsatz. Der Magnesium-Gleittisch ist das Modell TGT MO 30 L [4] und repräsentiert den aktuellen Stand der Technik. Der Aluminium-Karbon-Gleittisch ist ein Prototyp in Hybridbauweise. Er besteht aus einem Karbongrundkörper und Aluminiumschaumguss (Kern) sowie Epoxidplatten als untere und obere Deckschicht. Die Gleittische verfügen über ein Befestigungsrastrer aus 64 (Magnesium) bzw. 62 (Aluminium-Karbon) M8-Gewinden mit einem Rasterabstand von $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, wie in Abbildung 1 dargestellt. Das Gewicht des Magnesium-Tisches beträgt 46,5 kg und das des Aluminium-Karbon-Gleittisches 30,5 kg. Im Aluminium-Karbon-Gleittisch sind an den Rasterpositionen 8D und 8E keine Gewinde vorgesehen.



Abb. 1: Rasterpositionen des Magnesium-Gleittisches (links) und des Aluminium-Karbon-Gleittisches (rechts). In Rot sind die Rasterpositionen dargestellt an denen sich kein Gewinde befindet. An den blauen Positionen wurde mit dem VR1000 Regelsystem gemessen an den schwarzen mit dem VR9500

Im Magnesium-Gleittisch sind die Gewinde direkt in das Grundmaterial eingeschnitten. Im Aluminium-Karbon-Gleittisch sind Gewindehülsen in die Struktur integriert, wie in Abbildung 2 dargestellt. Beide Gleittische sind über fünf M10 Schrauben am Schwingerreger befestigt.



Abb. 2: Magnesium-Gleittisch mit direkt ins Material eingebrachten M8 Gewinden Koordinatensystemdefinition (links), als ein Ausschnitt des Aluminium-Karbon-Gleittisches mit integrierten M8 Gewindehülsen (Mitte) und einer gefrästen Tasche mit Querschnitt des Schichtaufbaus (rechts)

Als Messsensoren sowie als Regelsensor wurde der piezoelektrische Beschleunigungssensor KS78C.100 [6] eingesetzt. Zum Auslesen der Sensorsignale wurden die Regelsysteme VR9500 [7] und OBSERVR 1000 [8] verwendet.

Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen der Gleittische sowie der Resonanzfrequenzen des Gesamtsystems wurde die spektrale Beschleunigungsdichte im Frequenzbereich von 5 bis 2000 Hz für beide Schwingtische ermittelt. Hierfür wurde die Beschleunigung an 4 Messpositionen (A, B, G, H in Reihe eins) in x-Richtung gemessen. Die Abtastrate betrug 8192 Hz. Die Messsensoren wurden mithilfe von Messingadaptern auf den jeweiligen Messpunkten befestigt, wie in Abbildung 3 dargestellt. Als Anregungssignal wurde $0,1\text{ V}_{\text{rms}}$ Breitbandrauschen genutzt. Es erfolgte keine Regelung, um eine Beeinflussung der Resonanzlagen durch den Regler zu vermeiden. Die Messdauer betrug jeweils 3 Minuten.

Vergleich eines Aluminium-Karbon-Gleittisches mit einem Magnesium-Gleittisch

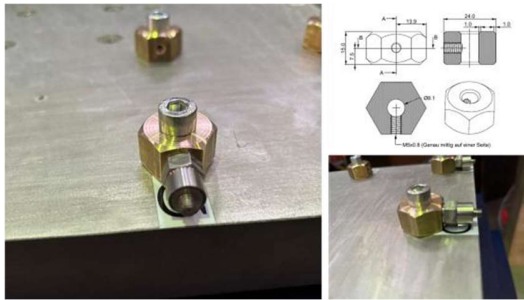


Abb. 3: Mithilfe eines Messingadapters in x-Richtung positionierter KS78C.100 Beschleunigungssensor von vorne (links) und von der Seite (rechts unten) sowie eine technische Zeichnung des Messingadapters (rechts oben)

Zur Messung der Amplituden an den in Abbildung 1 dargestellten Rasterpositionen in x-, y-, und z-Richtung wurden die piezoelektrischen Beschleunigungssensoren mithilfe des Montagewürfels 030 [9] von MMF an den jeweiligen Messpositionen montiert, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Durchführung der Messungen erfolgte abhängig vom eingesetzten Regelsystem entweder sequenziell an jeder Messposition einzeln (Regelsystem VR9500) oder in Gruppen von vier Messpositionen (Regelsystem VR1000). Die Regelung erfolgte auf eine Sollbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ mittels eines Regelsensors in x-Richtung, der jeweils zentral in der Mitte des Gleittisches am Kopfende positioniert war. Am Magnesium-Gleittisch wurde der Regelsensor direkt über eine M5 Gewindebohrung befestigt. Beim Aluminium-Karbon-Gleittisch erfolgte die Befestigung hingegen über einen Stahladapter mit M5 Gewinde, der mittels 2-Komponentenharz fixiert wurde, wie in Abbildung 2 gezeigt.



Abb. 4: Montagewürfels 030 (rechts), KS78C.100 Beschleunigungssensoren in (x-, y-, z-Richtung) auf dem Montagewürfels 030 auf dem Magnesium-Gleittisch montiert (rechts)

Die Amplituden-Messung erfolgte für die Frequenzen 8 Hz und 128 Hz bis 2048 Hz (Schrittweite 128 Hz) über eine Dauer von 70 s. Die Amplituden wurden über das Betragsspektrum einer reell wertige Fast Fouriertransformation (RFFT) über die gesamte Messdauer berechnet, was zu einer Frequenzauflösung von 0,014 Hz führt. Um Fehler durch eine nicht exakt auf einem FFT-Bin liegende Anregung zu vermeiden, wurde die Amplitude als Maximum bzw. über ein kleines Frequenzfenster um die Anregungsfrequenz bestimmt. Für alle Rasterpunkte mit gültigen Amplitudenwerten (alle außer 8G und 8E) wurde die prozentuale Differenz zwischen beide Schwingtischen bestimmt. Daraus wurden der Median, das 25%- und 75%-Quantil als robuste Lage- und Streuungsmaße berechnet. Als Maß für die Stärke der lokalen Abweichungen wurde der Anteil der Zellen bestimmt, die einen Betragsschwellwert von 50 % für die x-Achse sowie 500 % für die y- und z-Achse überschreiten. Der typische globale Unterschied zwischen beiden Prüflingen wurde als multiplikativer Unterschied über das geometrische Mittel der zellenweisen Amplitudenverhältnisse bestimmt. Die Streuung der Verhältniswerte wurde über die geometrische Standardabweichung quantifiziert. Aufgrund räumlicher Autokorrelation benachbarter Rasterzellen wurde die 95%-Konfidenzintervalle über eine räumliche Block-Bootstrap Methode [10], [11] (Blockgröße 2×2 , $B=5000$) mit zufälligem Offset in beiden Rasterrichtungen und Zurücklegen mit den Intervallgrenzen 2.5%- und 97.5%-Quantil berechnet.

3. Ergebnisse

Aus den in Abbildung 5 dargestellten Verläufen der spektralen Beschleunigungsdichte an den Positionen 1A und 1-H bzw. 1-B und 1-G konnten für das Shaker System die Resonanzfrequenzen 1214 Hz für mit dem Magnesiumtisch und 963 Hz mit dem Aluminium-Karbon-Tisch identifiziert werden. Außerdem konnten für den Magnesiumtisch Eigenfrequenzen von 512 und 1422 Hz und für den Aluminium-Karbon-Tisch 335 und 1207 Hz beobachtet werden, die als Schnittpunkte zwischen den Beschleunigungsdichteverläufen der gegenüberliegenden Messpunkte 1-A, 1-B mit 1-G, 1-H sichtbar werden.

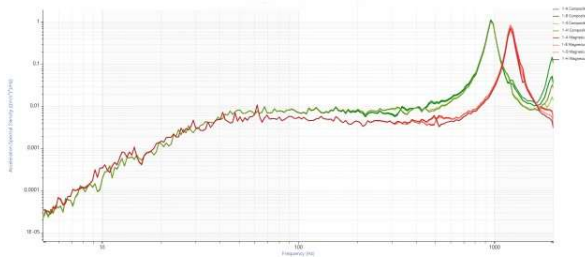


Abb. 5: spektralen Beschleunigungsdichten des Magnesium-Gleittisch (rot) und des Aluminium-Karbon-Gleittisches (grün)

Aus den statistischen Kennzahlen für die Amplitudenwerte der x-Achse in Tabelle 1 lassen sich drei unterschiedliche Fälle aus der Lage und dem Vorzeichen des 95%-Konfidenzintervalls (CI95 low, CI95 high) ableiten. Liegen CI95 low und CI95 high beide unter null Prozent sind die Amplituden auf dem Aluminium-Karbon-Tisch typischerweise kleiner als die auf dem Magnesium-Tisch. Dies ist für die Frequenzen 8, 128, 256, 640, 768, 896, 1024, 1152 und 1280 Hz zu beobachten (Δtyp -0,5% bis -18,39 %). Bei niedrigen Frequenzen zwischen 8 und 256 Hz werden diese Befunde durch die Quartile gestützt und eine geringe Streuung (GSD) nahe 1 und der Outlier-Anteil von null Prozent lassen auf ein homogene Amplitudenverteilung schließen. Sind CI95 low und CI95 high größer als null Prozent sind die Amplituden auf dem Aluminium-Karbon-Tisch typischerweise größer als die auf dem Magnesium-Tisch. In der x-Achse ist das ausschließlich für eine Frequenz von 2048 Hz der Fall (Δtyp 108,39 %). Auch der Median sowie die Quartile sind entsprechend positiv. Eine GSD von 3,04 und der hohe Outlier-Anteil von 61,29% lassen auf stark heterogene Amplitudenverläufe schließen. Im dritten Fall umfasst das Konfidenzintervall Werte mit entgegengesetztem Vorzeichen. Ein eindeutiger typischer Unterschied zwischen den Amplitudenwerten der Gleittische ist statistisch nicht erklärbar. Dies ist für die Frequenzen 384, 512, 1408, 1536, 1664, 1792 und 1920 Hz der Fall. Auch die Quartile weisen an diesen Frequenzpunkten eine große Spannbreite und gemischte Vorzeichen, was auf eine zunehmend heterogene räumliche Amplitudenverteilung hindeutet. Diese Annahme wird durch die steigenden GSD-Werte und Outlier-Anteile gestützt.

Vergleich eines Aluminium-Karbon-Gleittisches mit einem Magnesium-Gleittisch

Tabelle 1: Statistische Zusammenfassung der rasterbasierten Amplitudenabweichungen in x-Richtung (8×8-Raster; Δ_{typ} / GSD auf Basis der zellweisen Amplitudenverhältnisse; 95%-Konfidenzintervalle via räumlichem Block-Bootstrap, 2×2-Blöcke, B=5000, randomisierter Offset

Frequenz [Hz]	Δ_{typ} [%] (GM)	GSD	CI95 low [%]	CI95 high [%]	Median [%]	Q25 [%]	Q75 [%]	Anteil $ \Delta > 50\%$ [%]
8	-0,98	1,02	-1,73	-0,7	-0,65	-1,1	-0,5	0,0
128	-0,5	1,01	-0,72	-0,33	-0,54	-0,75	-0,12	0,0
256	-1,13	1,02	-1,89	-0,65	-1,19	-1,81	-0,64	0,0
384	-0,59	1,07	-3,62	2,64	-1,22	-7,18	6,6	0,0
512	-2,94	1,27	-12,29	7,76	-4,67	-22,1	18,66	0,0
640	-2,51	1,04	-4,64	-1,13	-1,28	-4,36	0,29	0,0
768	-4,35	1,06	-7,81	-2,31	-2,67	-6,87	-0,6	0,0
896	-4,81	1,11	-10,15	-1,21	-1,36	-8,13	2,2	0,0
1024	-10,27	1,2	-19,13	-4,43	-4,24	-14,94	0,29	3,23
1152	-18,06	1,54	-34,97	-5,91	-9,36	-20,03	1,6	8,06
1280	-18,39	1,41	-30,57	-7,75	-13,34	-28,59	0,7	9,68
1408	-12,46	1,85	-30,62	1,69	-2,67	-26,73	7,31	14,52
1536	-12,15	1,85	-27,47	7,9	-5,26	-32,44	9,9	20,97
1664	-10,47	2,39	-31,02	17,41	-2,22	-36,19	15,17	30,65
1792	9,06	2,41	-20,12	49,78	7,91	-22,62	41,7	35,48
1920	32,71	2,48	-10,06	81,23	19,71	-20,91	142,04	53,23
2048	108,92	3,04	49,56	230,05	89,28	15,04	215,21	61,29

In der y-Achse weisen die statistischen Kennzahlen in Tabelle 2 auf eine deutlich heterogenere Verteilung Amplituden hin. Das Konfidenzintervall schneidet in weiten Teilen des beobachteten Frequenzbereichs null Prozent. Ein klarer negativer Unterschied ist ausschließlich bei einer Frequenz von 512 Hz mit einer typischen Abweichung von -77,06% zu beobachten. Für die Frequenzen 896, 1024, 1280, 1536, 1664, 1920 und 2048 Hz liegt das Konfidenzintervall komplett im positiven Bereich und die Mediane sowie die Quartile liegen überwiegend im positiven Bereich. Damit sind bei diesen Frequenzen die Amplitudenwerte auf dem Raster großflächig positiv verschoben. Bei 8, 128, 256, 384, 640, 768, 1152, 1408 und 1792 Hz sind positive und negative Werte innerhalb des Konfidenzintervalls und ein eindeutiger statistischer Unterschied kann nicht festgestellt werden. In den meisten Fällen haben die Quartile bei diesen Frequenzen eine hoher Spannweite und einen Vorzeichenwechsel, was für stark ausgeprägte lokale Amplitudenabweichungen spricht.

Tabelle 2: Statistische Zusammenfassung der rasterbasierten Amplitudenabweichungen in y-Richtung

Frequenz [Hz]	Δ_{typ} [%] (GM)	GSD	CI95 low [%]	CI95 high [%]	Median [%]	Q25 [%]	Q75 [%]	Anteil $ \Delta > 50\%$ [%]
8	1,23	3,88	-37,43	45,42	-15,03	-49,66	96,13	14,52
128	14,06	3,58	-17,12	61,48	13,83	-39,85	122,66	9,68
256	45,32	3,57	-0,33	129,52	96,86	-33,95	232,67	8,06
384	54,58	3,29	-3,05	114,35	48,22	-32,86	268,36	14,52
512	-77,06	3,33	-84,97	-64,49	-72,96	-86,91	-63,8	1,61
640	14,13	2,99	-16,35	48,54	29,27	-26,11	86,4	9,68
768	32,87	2,73	-13,37	66,41	37,39	-8,76	154,83	4,84
896	56,95	2,71	5,69	103,66	42,16	1,14	179,37	9,68
1024	40,53	2,45	5,62	82,97	51,51	-8,62	94,23	3,23
1152	36,32	2,61	-5,29	99,18	54,83	-22,78	113,43	4,84
1280	71,28	2,19	30,23	124,66	68,6	5,89	136,08	4,84
1408	10,78	1,91	-15,39	39,63	14,63	-14,66	82,94	0,0
1536	40,9	2,17	7,19	80,94	44,91	11,48	104,95	3,23
1664	37,63	1,99	11,04	72,68	57,9	22,53	99,97	0,0

Vergleich eines Aluminium-Karbon-Gleittisches mit einem Magnesium-Gleittisch

1792	47,49	2,81	-3,22	104,9	65,73	6,7	118,68	6,45
1920	104,63	2,34	39,69	155,18	106,22	50,05	168,31	8,06
2048	239,31	3,22	107,9	416,19	184,74	51,13	481,65	24,19

Auch in der z-Achse können aus Tabelle 3 drei Fälle anhand des 95%-Konfidenzintervalls abgeleitet werden. Bei 512, 640, 896 und 1664 Hz sind die Konfidenzintervalle und Quartile vollständig im negativen Bereich. Die Amplituden auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch sind typischerweise geringer (Δ_{typ} -12,61% bis 84,34%) als auf dem Magnesium-Gleittisch. Insbesondere bei 512 Hz ist der Unterschied mit - 84,34% stark ausgeprägt. Bei 8, 1152, 1792, 1920 und 2048 Hz liegen die Konfidenzintervalle über null Prozent und die Amplituden sind auf dem Magnesium-Gleittisch typischerweise stärker ausgeprägt als auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch. Besonders bei 8 Hz (Δ_{typ} 144,39%) 1152 Hz (Δ_{typ} 173,90%) sowie bei 2048 Hz (Δ_{typ} 314,07%) sind die positiven Unterschiede besonders deutlich ausgeprägt, was auch für den Median und die Quartile gilt. Sowohl negative als auch positive Werte umfasst das 95%-Konfidenzintervall für 128, 256, 384, 768, 1024, 1280, 1408 und 1536 Hz. Die Quartile haben häufig eine hohe Spannweite die ebenfalls positive und negative Werte beinhaltet, was auf lokale Abweichungen auf dem Raster hinweist.

Tabelle 3: Statistische Zusammenfassung der rasterbasierten Amplitudenabweichungen in z-Richtung

Frequenz [Hz]	Δ_{typ} [%] (GM)	GSD	CI95 low [%]	CI95 high [%]	Median [%]	Q25 [%]	Q75 [%]	Anteil $ \Delta > 500\%$ [%]
8	144,39	3,54	76,8	261,33	209,68	15,14	453,1	19,35
128	44,03	2,45	-10,17	81,11	45,9	1,76	121,97	3,23
256	-20,79	2,13	-39,01	3,08	-28,91	-45,28	8,65	3,23
384	13,82	2,7	-29,52	60,25	41,26	-49,22	136,92	3,23
512	-84,34	3,14	-89,11	-78,36	-84,9	-93,3	-67,58	0,0
640	-37,25	1,82	-50,36	-27,36	-32,91	-54,29	-6,09	0,0
768	-24,45	2,64	-49,79	2,54	-16,13	-59,19	37,19	3,23
896	-54,7	2,23	-72,48	-44,51	-56,0	-74,11	-13,87	0,0
1024	35,73	2,61	-17,36	91,47	47,76	-34,61	201,89	3,23
1152	173,9	2,63	59,71	247,33	209,58	70,67	370,7	22,58
1280	36,73	1,81	-1,29	56,31	37,98	1,95	68,22	1,61
1408	8,14	2,53	-28,13	38,73	11,91	-49,32	107,9	3,23
1536	1,53	2,56	-28,82	41,48	-13,83	-48,93	92,72	3,23
1664	-12,61	1,42	-19,05	-0,99	-9,65	-23,4	10,13	0,0
1792	80,45	2,44	38,69	145,02	68,44	-6,31	157,26	9,68
1920	44,72	3,1	0,93	93,07	2,21	-32,27	172,94	11,29
2048	314,07	3,25	176,17	497,77	314,05	125,75	594,31	30,65

Beispielhaft sind in Abbildung 6 die Amplitudenverläufe und die prozentuale Differenz der Gleittische bei 896 Hz dargestellt.

Vergleich eines Aluminium-Karbon-Gleittisches mit einem Magnesium-Gleittisch

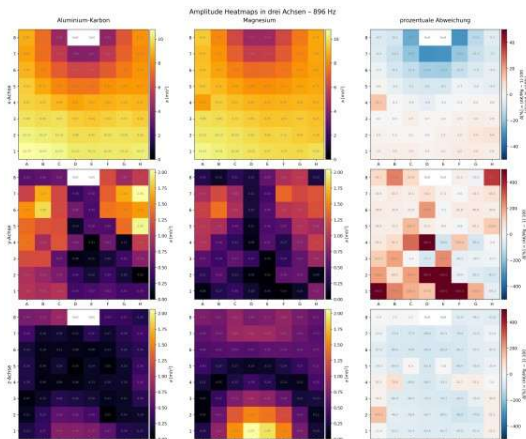


Abb. 6: Beschleunigungsamplitude bei einer Anregungsfrequenz von 896 Hz an den Rasterposition in x-Richtung auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch (links) und auf dem Magnesium-Gleittisch (Mitte), sowie die prozentuale Abweichung (rechts)

In der x-Achse sind die Amplituden auf dem Aluminium-Gleittisch typischerweise 4,81% geringer ausgeprägt als auf dem Magnesium-Gleittisch. Zusätzlich Ein räumlicher Amplitudenunterschied zu beobachten bei dem die prozentuale Abweichung zur Position der Schwingungseinleitung vom leicht positiven ins Negative wandert. In der y-Achse ist das Schwingungsmuster qualitativ zwar sehr ähnlich, quantitativ sind die Amplituden jedoch deutlich stärker ausgeprägt. In der z-Achse kann ähnliches beobachtet werden. Die Abweichungen sind jedoch negativ. In Abbildung 7 sind die Amplitudenverläufe und die prozentuale Differenz in allen drei Achsen für 2048 Hz dargestellt. In allen drei Achsen sind die Amplituden auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch zum größten Teil deutlich stärker ausgeprägt als auf dem Magnesium-Gleittisch. Es treten nur vereinzelt lokale Stellen mit Amplitudenminima auf dem Aluminium-Karbon-Tisch auf.

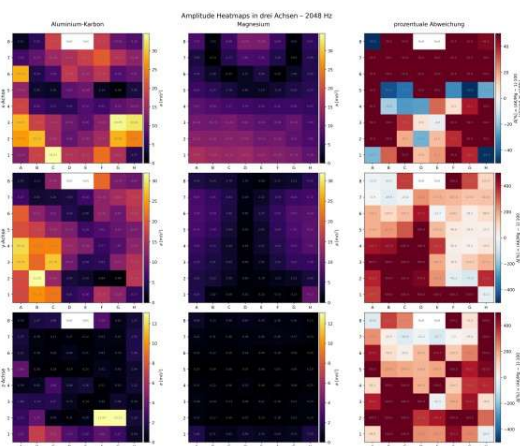


Abb. 7: Beschleunigungsamplitude bei einer Anregungsfrequenz von 2048 Hz an den Rasterposition in x-Richtung auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch (links) und auf dem Magnesium-Gleittisch (Mitte), sowie die prozentuale Abweichung (rechts)

Abbildung 8 zeigt die Amplitudenverläufe und die prozentuale Differenz in allen drei Achsen für 512 Hz. In allen drei Achsen treten auf dem Magnesium-Tisch ausgeprägte räumliche Modenstrukturen mit Amplituden-Minima und -Maxima in allen drei Achsen auf, was auf eine Eigenfrequenz hindeutet.

Vergleich eines Aluminium-Karbon-Gleittisches mit einem Magnesium-Gleittisch

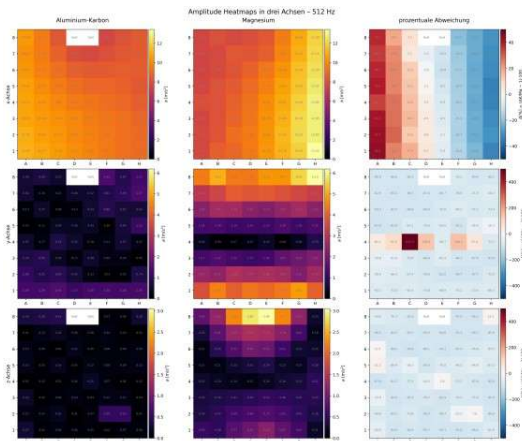


Abb. 8: Beschleunigungsamplitude bei einer Anregungsfrequenz von 512 Hz an den Rasterposition in x-Richtung auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch (links) und auf dem Magnesium-Gleittisch (Mitte), sowie die prozentuale Abweichung (rechts)

4. Diskussion

Beide Tische zeigen mit der Schwingprüfanlage ein ähnliches dynamisches Verhalten, wobei die beobachtete Eigenfrequenz des Aluminium-Karbon-Tisches geringer ist als beim Magnesium Tisch. Die Resonanzfrequenz des Gesamtsystems ist beim Aluminium-Karbon-Tisch ebenfalls niedriger. In der x-Achse sind die Amplituden auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch für tiefe Frequenzen (8 – 768 Hz) überwiegend leicht geringer als auf dem Magnesium-Tisch. Für Frequenzen im Bereich der Resonanzfrequenz beider Tische (896 – 1280 Hz) sind die Amplituden in der x-Achse auf dem Aluminium-Karbon-Tisch deutlich geringer als auf dem Magnesium-Tisch, was auf eine geringere dynamische Verstärkung und eine stärkere Dämpfung schließen lässt. Für hohe Frequenzen (1408 – 2048 Hz) dominieren lokale Schwingungsmuster auf beiden Tischen, wodurch sich Unterschiede zwischen den Gleittischen nicht mehr eindeutig als globaler Effekt trennen lassen. In der y- und z-Achse sind deutlich komplexere und ortsabhängigere Schwingverhalten zu beobachten. In der y-Achse sind die Schwingungsmuster auf beiden Tischen qualitativ häufig sehr ähnlich, jedoch treten über mehrere Frequenzbereiche auf dem Aluminium-Karbon-Gleittisch höhere relative Amplituden auf. In der z-Achse ist kein eindeutiger Trend zwischen negativen und positiven Abweichungen erkennbar. Bei der Interpretation, der y- und z-Achse muss, zudem berücksichtigt werden, dass die absoluten Amplituden insbesondere im Frequenzbereich unterhalb der Resonanzfrequenzen deutlich kleiner sind (teilweise um Größenordnungen) und Prozentwerte empfindlich auf kleine Absolutwert Änderungen reagieren. Dennoch sind die beobachteten Unterschiede mit einer geringeren Dämpfung und einer höheren dynamischen Antwort des Aluminium-Karbon-Tisches in der y- und z-Achse vereinbar. Die genannten Beobachtungen lassen sich vermutlich auf eine geringere Steifigkeit des Aluminium-Karbon-Tisches und der angewandten Verbindungstechniken zurückführen und stehen im Einklang mit Literaturbefunden, wonach Karbon-Verbundplatten gegenüber Magnesium-Platten eine Verschiebung der Eigenfrequenzen zu niedrigeren Frequenzen sowie eine erhöhte modale Dämpfung zeigen [3]. Darüber hinaus wird in der Literatur beschrieben, dass heterogene bzw. sandwichartige Strukturen eine erhöhte strukturelle Dämpfung aufweisen können [12]. Auch wenn in dieser Arbeit im Gegensatz zur Untersuchung von Hoksbergen et. al [3] kein reiner Karbonaufbau, sondern ein hybrider Aluminium-Karbon-Gleittisch mittels Rastermessungen unter realen Prüfstands Bedingungen untersucht wird liegen geringere Dämpfung in y- und z-Achse mit Literaturbefunden im Einklang, die ein richtungsabhängiges elastisches und dynamisches Schwingverhalten von Verbundmaterialien beschreiben [13], [14]. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die gemessenen Eigen- und Resonanzfrequenzen nicht ausschließlich vom Gleittisch bestimmt werden, sondern durch das Gesamtsystem beeinflusst werden können. Insbesondere können sich Reib- und Kontaktbedingungen an den Lagerstellen unter Schwinganregung frequenzabhängig verändern und dadurch die Übertragungscharakteristik beeinflussen, wie von Chowdhury und Helali gezeigt [15].

5. Schlussfolgerung

Diese Arbeit zeigt, dass ein Aluminium-Karbon-Gleitischprototyp auf einer Schwingprüfanlage ein insgesamt vergleichbares Schwingverhalten wie ein Magnesium-Gleitisch aufweist. Damit ist die grundsätzliche Machbarkeit des Einsatzes eines Aluminium-Karbon-Gleitisches für Belastungsprüfungen gezeigt. Für eine abschließende Bewertung der Eignung zur normgerechten Bauteilprüfung sind jedoch weiterführende Untersuchungen erforderlich. Hierzu zählen insbesondere der Nachweis einer ausreichenden Haltekraft der Gewindebuchsen unter Zugbelastung, die Korrelation der Eigenfrequenzen mit der strukturellen Steifigkeit (z.B. mittels Shock Response Spectrum, SRS) sowie der Nachweis einer adäquaten Leistungsdichte des Gesamtsystems. Insgesamt stellt diese Untersuchung einen wesentlichen ersten Schritt zur Implementierung eines Aluminium-Karbon-Gleitisches in der Schwingprüfung dar. Die reduzierte bewegte Masse bietet dabei das Potenzial, im Vergleich zu Magnesium-Gleitischen höhere Prüflingsmassen oder höhere erreichbare Beschleunigungsamplituden zu realisieren.

Danksagung

Für die Unterstützung dieser Arbeit gilt besonderer Dank der TIRA GmbH für die Bereitstellung der Vibrationschwinganlage sowie der Vibration Research Europe GmbH für die Bereitstellung der eingesetzten Regelsysteme und Software. Darüber hinaus gilt der htw saar besonderer Dank für die Bereitstellung der Laborräumlichkeiten sowie der technischen Infrastruktur zur Durchführung der Untersuchungen.

Literatur

- [1] „DIN EN 60068-2-6: Umweltprüfungen – Teil 2-6: Prüfverfahren – Prüfung Fc: Schwingen (sinusförmig)“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland, Norm, 2008.
- [2] Ö. K. Morgül, „Design of Slip Horizontal Table System For Shaker“, *Sakarya University Journal of Science*, Bd. 22, Nr. 5, S. 1371–1377, Okt. 2018, doi: 10.16984/taufenbilder.407959.
- [3] J. S. Hoksbergen, M. Ramulu, P. Reinhall, und T. M. Briggs, „A Comparison of the Vibration Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastic Plates with those of Magnesium Plates“, *Appl Compos Mater*, Bd. 16, Nr. 5, S. 263–283, Okt. 2009, doi: 10.1007/s10443-009-9093-7.
- [4] „Operating Manual Vibration Test System TV 57315/LS-340 TGT MO 30 L“, Tira GmbH, Schalkau, Datenblatt, Juni 2024.
- [5] „Digitalverstärker A 3 01 11 042“, Tira GmbH, Schalkau, Datenblatt, Jan. 2024.
- [6] M. Weber, „Standard Accelerometer KS78C100“, Metra Mess- und Frequenztechnik, Radebeul, 2023. Zugegriffen: 16. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://mmf.de/wpcontent/uploads/2023/08/ks78c100_en.pdf
- [7] „VR9500 Vibration controller“, Vibration Research, Datenblatt.
- [8] „OBSERVER 1000“, Vibration Research, Datenblatt.
- [9] „Directions for Use Triaxial Mounting Cubes Models 030 / 130 / 230“, Metra Mess- und Frequenztechnik, Radebeul, Datenblatt, Aug. 2005.
- [10] H. R. Kunsch, „The Jackknife and the Bootstrap for General Stationary Observations“, *Ann. Statist.*, Bd. 17, Nr. 3, Sep. 1989, doi: 10.1214/aos/1176347265.
- [11] M. Sherman, „Variance Estimation for Statistics Computed from Spatial Lattice Data“, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, Bd. 58, Nr. 3, S. 509–523, Sep. 1996, doi: 10.1111/j.2517-6161.1996.tb02097.x.
- [12] K. Attipou, S. Nezamabadi, E. M. Daya, und H. Zahrouni, „A multiscale approach for the vibration analysis of heterogeneous materials: Application to passive damping“, *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 332, Nr. 4, S. 725–739, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.jsv.2012.10.020.
- [13] „The composite materials handbook - MIL 17. 3: Materials, usage, design, and analysis“, Lancaster: Technomic Publ, 1999.
- [14] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 0 Aufl. CRC Press, 2005. doi: 10.1201/9781420058291.
- [15] M. A. Chowdhury und M. Helali, „The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials“, *Tribology International*, Bd. 41, Nr. 4, S. 307–314, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.triboint.2007.08.005.

STIEGELE

Datensysteme GmbH

UNSERE SOFTWARE FÜR IHREN PRÜFSTAND UND FAHRVERSUCH

- Prüfstandsteuerung
- Regelung
- Mixed-Data-Erfassung
- Mixed-Data-Auswertung



Prüfstandsteuerung

Steuerung mit iterativer Signalkorrektur und Spitzenwertkorrektur



Test-Sequenzler

Grafische und/oder textuelle Versuchsprogrammerstellung, Stufen/Block-Programme, Echtzeit/Nachfahr-Versuche



Auswertung

Gemischte Datenauswertung mit Daten, Video, Audio und Bildern. Verschiedenste Datenformate



Datenerfassung

Gemischte Datenerfassung mit bis zu 2 MHz pro Kanal und bis zu 10.000 Kanälen



Strom und Spannung

Hochfrequente Datenerfassung mit Echtzeitberechnung von Leistungsdaten



Simulationsmodelle

Integration von Matlab/Simulink-Modellen über einen Target und Kommunikation in Echtzeit



Bussysteme

CAN, μ AFDX, EtherCAT, Ethernet, Flexray, LIN, ProfiNet, RS485 usw.



Customizing

Python/COM-Automatisierung, Echtzeit-Scripting, benutzerdefinierte GUI, Kennwortschutz

sd.Solutions 2025 -
die MSR 4.0[®] Lösung
für Windows 11



Anmeldung Vortrag und Ausstellung Geräte

Titel des Vortrags

Laser-Doppler-Vibrometrie – Berührungslose Schwingungsmesstechnik zur Verbesserung von Shaker-Regelung und Prüfteilpositionierung

Autor & Kontaktdaten

Robert Mörl; Polytec GmbH
Polytec-Platz 1-7
76337 Waldbronn
Telefon: +49 7243 604-3620
Mobil: +49 172 7227732
E-Mail: r.moerl@polytec.de

Themenschwerpunkte

Schwerpunkt 2: Mehrachsige Prüfstände und deren Regelung

- Regelungskonzepte und Signalverarbeitung

Schwerpunkt 3: Modernisierung von Prüfständen

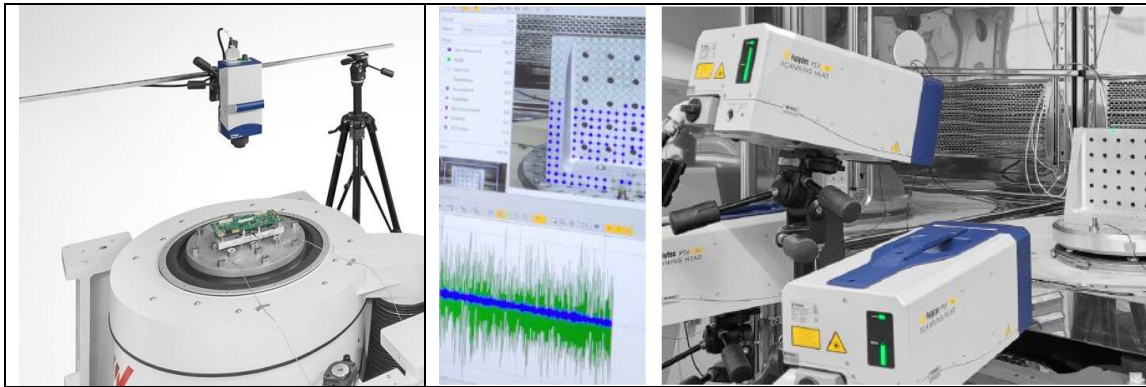
- Neue Aktuatoren, Sensorik und Regelungstechnik, Optimierung von Versuchsdurchführung und -auswertung

Abstract

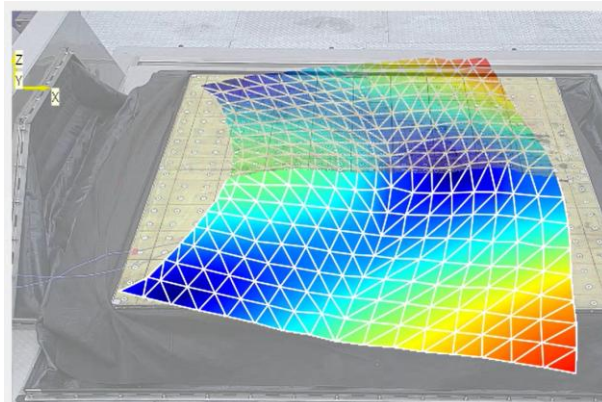
Prüfstände mit elektrodynamischen Shakern dienen dazu, Bauteile und Systeme realistischen Vibrations- und Belastungsszenarien auszusetzen – von Strukturbauteilen bis zu kompletten Baugruppen. Ziel ist es, Schwachstellen frühzeitig zu erkennen und die Dauerhaltbarkeit zu bewerten. Voraussetzung dafür ist, dass die Anregung gleichmäßig und korrekt am Prüfling ankommt.

Bei filigranen Bauteilen lassen sich Beschleunigungsaufnehmer oft nicht direkt am Prüfling anbringen und müssen daher auf der Aufspannung montiert werden, damit erfassen sie jedoch nicht das tatsächliche Signal, da Aufspannungen keine ideale Gleichbewegung gewährleisten. Dies führt zu Abweichungen und verfälschten Ergebnissen. Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) bieten hier eine präzise, berührungslose Alternative: Sie messen direkt am Prüfling, ohne Masseeintrag, und ermöglichen in Kombination mit Scanning-Systemen die Analyse flächenhafter Schwingungsformen sowie die optimale Prüfteilplatzierung.

Darüber hinaus lassen sich ganze Prüfstände überwachen, kritische Eigenformen erkennen und strukturelle Schäden vermeiden. Anwendungsbeispiele zeigen, wie LDV durch QTec®-Technologie eine stabile Regelung, schnelle Versuchsdurchführung und hochauflösende Schwingungsdaten ermöglicht – mit dem Ergebnis belastbarer Prüfungen und effizienterer Validierungen numerischer Modelle.



[Abbildung 1: Shakeraufbau und Regelung mit LDV / Messung mit Scanning LDV]



[Abbildung 2: Flächenhafte Schwingungsformanalyse Sliptable zur Prüfteilplatzierung und Prüfstandsüberwachung]

LDV zur Verbesserung von Shaker-Regelung und Prüfteilpositionierung

Robert Mörl – Vertrieb
TestRig 26

measure what matters

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung

Laser-Doppler-Vibrometer

Schwingungen berührungslos messen

- punktweise oder flächenhaft (1D oder 3D)
- hochauflösend - auf empfindlichen, rotierenden oder heißen Strukturen
- ohne Masseinflüsse
- aus großer Entfernung - an schwer zugänglichen Stellen
 - z.B. Spiegel, Wasser, Hochspannung
- an Makro- und Mikrostrukturen
- In F&E und Produktion
- 0Hz bis 8 GHz

27.02.2026 www.polytec.com © Polytec

Polytec – vibration is everywhere – Micro bis Makro

E-Motoren

Flugzeug Turbine- BLISK

Biologie/ Medizin

Gebäude/ Brücken

Gesamt-Fahrzeuge

www.polytec.com © Polytec

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung

Wie werden Schwingungen klassisch gemessen?

Beschleunigungsaufnehmer

- müssen kontaktiert werden
- benötigen Kabel
- Sehr zeitaufwendig/ unübersichtlich

Nachteile:

- zusätzliche Masse
- Einfluss auf Dämpfung- und Steifigkeit
- Grobe räumliche Auflösung
- begrenzte Bandbreite
- Koordinatenkorrelation zur FEM-Geometrie ist aufwendig
- Kalibrierung des Messwandlers

www.polytec.com © Polytec

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung

Wie werden Schwingungen ausgewertet?

2/27/2026 www.polytec.com © Polytec

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung

Wie werden Schwingungen mit LDV gemessen?

Laser-Doppler-Vibrometer

- Berührungslos
- Keine Installation / kein Kleben von Sensoren
- Schnell

Vorteile:

- Keine Massenbelastungseffekte
- Hohe räumliche Auflösung
- Nahezu unbegrenzte Bandbreite
- Gleiche Koordinaten wie bei der FEM in der Geometrie

www.polytec.com © Polytec

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung

Wie werden Schwingungen mit LDV ausgewertet?

Resonanzfrequenzen und Schwingmoden

www.polytec.com © Polytec

Vom Pionier zum Weltmarktführer

Waldbronn Polytec GmbH

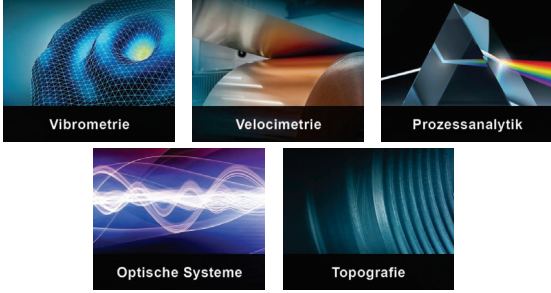
Heidelberg

Munich

Polytec weltweit

www.polytec.com © Polytec

Vom Pionier zum Weltmarktführer



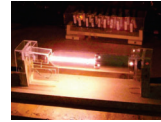
www.polytec.com

Einführung: Was ist ein Laser Doppler Vibrometer?



LASER

- Helium-Neon Laser mit 632,8nm
- Infrarotlaser mit 1550nm
- Laser Klasse 2 (augensicher)



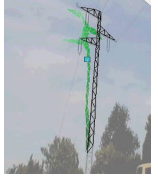
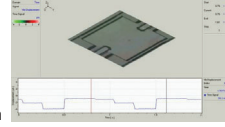
DOPPLER

- Optische Doppler Effekt – Frequenzverschiebung durch Doppler Effekt beim rückreflektierten Licht
- Frequenzverschiebung proportional zur Objektgeschwindigkeit



VIBROMETER

- Interferometrische Auswertung des dopplerverschobenen Lasersignals zur Messung von Weg oder Geschwindigkeit
- Zur Vibrationsmessung von Groß bis Klein



Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung



Mach-Zehnder Interferometer

$\Delta f = \frac{2 \vec{v} \cdot \vec{e}}{\lambda} = \frac{2v}{\lambda} \cdot \cos\theta$

Δf Dopplerverschiebung
 \vec{v} Oberflächen-Geschwindigkeit
 λ Wellenlänge

Bragg-Zelle verschiebt die Frequenz des Referenzstrahles um 40 MHz.
 Der Detektor sieht ein frequenz- und phasenmoduliertes Signal mit einer Trägerfrequenz von 40 MHz.

FM carrier 40 MHz $\pm f_0$
 $i_{det}(t) = I_{DC} + \hat{i} \cos(2\pi f_0 t + \phi_m + \phi_0)$

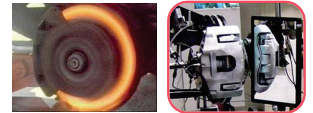
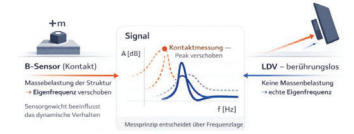
12

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung



Vorteile optischer Schwingungsmesstechnik

- **Licht hat keine Masse**
 - Keine zusätzliche Dämpfung
 - Keine Verschiebung der Eigenfrequenzen
- **Licht ist robust**
 - Bei allen Temperaturen
- **Licht ist flexibel**
 - Flexible Arbeitsabstände
 - Beliebige Messpunkt durch Scanning
 - Auflösung unabhängig vom Messfeld
- **Licht kann fokussiert werden**
 - μm -großer Laser-Messpunkt



www.polytec.com · © Polytec

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung



Messbare Geschwindigkeiten & Wege

Geschwindigkeit:

- Maximal: 120 km/h
- Minimal: 0.000000072 km/h = 0.072 mm/h = 0,000002mm/s = 2nm/s
- Haarwachstum: 3,47222 $\mu\text{m/s}$ (Faktor 1.500x)

Weg:

- Maximal: mehrere Meter
- Minimal: $<1\text{pm} = 0.000000001 \text{ mm} = <1 \times 10^{-12} \text{ m}$
- Mount Everest 8.849m $\sim 10^4 \text{ m}$ Viren 15nm $\sim 10^{-8} \text{ m}$
- Größe Wasserstoff-Atom = ca. 100 pm ($1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$) = 0,1 nm = 1 Å (Ångström)

Velocity:
 Maximum: 30 m/s (~120 km/h)
 Minimum: 0,000002 mm/s = 2 nm/s
 Hair growth: 3,47222 $\mu\text{m/s}$ (Faktor 1,500x)

Displacement:
 Maximum: several meters
 Minimum: $<1 \text{ pm}$
 Virus: 15 nm
 Size of hydrogen atom: $\sim 100 \text{ pm}$

2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

14

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung



Laser Doppler Vibrometer – Types



Einpunkt Vibrometer

- Schnelle Punktmessung, Referenzsignal, Monitoring kritischer Stellen
- z.B. vibro-akustik End of Line Qualitätskontrolle
- Elektro & Verbrennungsmotoren, Wälzlager, Getriebe, Haptik, Stecker

Scanning Vibrometer

- flächenhaft, 1D- oder 3D-Schwingform, Hotspots, Lärmquelle lokalisieren, FEM-Validierung
- z.B.: Gehäuse, Leiterplatte, Turbinenschaufel, Blechstruktur, Lautsprecher, Ultraschallprozesse

www.polytec.com · © Polytec

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung



Von der Einpunkt- zur flächenhaften Messung

Single Point
 Special Purposes
 Scanning
 Multi Point
 Microscope

2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

16

Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Schwingungsmessung



Typologie: Scanning-/ Full-Field Vibrometer

1D PSV-500 1D
 3D PSV-500 3D
 Automatic 3D Robo-Vib

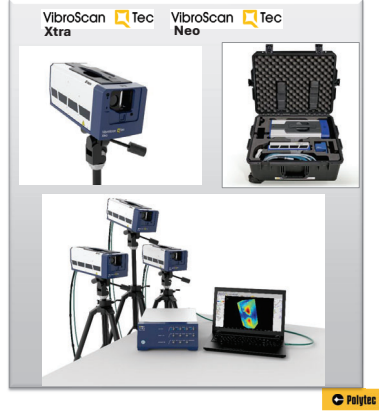
- Flächenschwingungen
 - Akustische Optimierung
 - Schwingformanalyse
- Strukturdynamik
 - FEM Validierung
 - Schwingformanalyse komplex-geformter Messobjekte
- Troubleshooting
- Dehnungs- und Spannungsanalyse

www.polytec.com · © Polytec

17

Increased flexibility Compact and portable

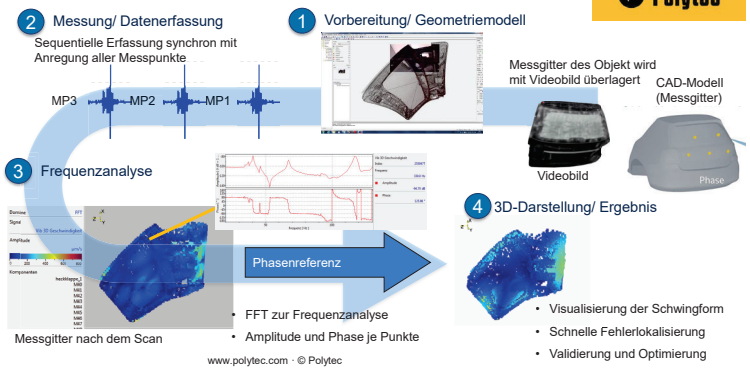
- All-in-one design
 - integriert Vibrometer, Datenerfassung und Signalgenerator
- PSV Software
 - vereint HW-Steuerung und Datenerfassung/Auswertung
 - Nutzen Sie Ihren Windows-PC für VibroScan-Konfigurationen.
- Verabschieden Sie sich von Dongle-basierter Lizenzierung.
- Das komplette VibroScan-Setup passt in einen einzigen Peli-Koffer.



2/27/2026

© Polytec

Scanning LDV Messprinzip



Laser-Doppler-Vibrometrie: Eine Einführung in die berührungslose Vibrationsmessung

Messung mit dem RoboVib Scanning-Vibrometer



8707 Messpunkte!!!

2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

23

QTec - Vibrometrie neu erfinden

QTec® - Der Unterschied – sichtbar gemacht



Schwierige Messbedingungen:

- Rauhe Oberfläche (Hand) im Strahl
- Außerhalb des Laserfokus
- Ohne QTec: Signalaussetzer durch Speckle
- Mit QTec: Interferometer: störungsfreies Signal



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

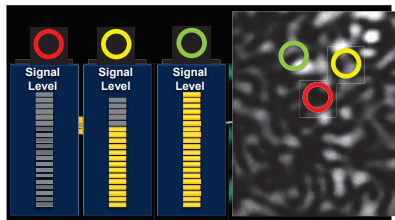
24

QTec - Vibrometrie neu erfinden

Wie funktioniert QTec®? – Zeitlicher Verlauf



- Signalpegel: Nutzbare Lichtmenge
- Signalpegel ist abhängig vom Speckle
- Dunkler Speckle → Kein Licht → Keine Information
- Mehr Licht – besser Information
- Mehrkanal-System hält den Pegel immer hoch
- Optimales Signal aus verschiedenen Perspektiven
- Auf jeder Oberfläche!**



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

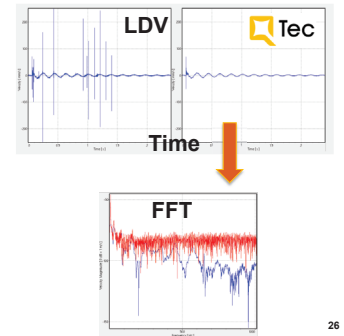
25

PSV QTec - reinventing Vibrometry

Leistungsfähigkeit von PSV QTec®



- Produktiver
 - Bis zu 10x schneller
 - Auf jeder Oberfläche – schnellerer Testaufbau
- Eindeutige und rauscharme Daten
 - Klare Daten - schnellere Nachverarbeitung
 - 20 dB SNR-Verbesserung
- Unempfindlich bezüglich Messwinkel
 - Spezieller Vorteil von QTec® für Polytecs 3D LDV-Systeme



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

26



Laser Doppler Vibrometer + Shaker =

- Berührungslos regeln.
- Präzise messen.
- Sicher prüfen.

Berührungslose Mehrkanal-Schwingungssensoren für Messung und Regelung von Shaker-Anwendungen

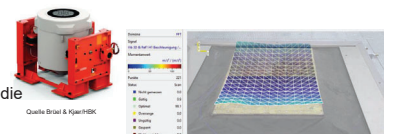
www.polytec.com · © Polytec

measure what matters

// Shaker-Messungen

Strukturdynamik flächig sichtbar machen

- Was wir messen:
- Scanning-LDV vermisst Shaker- und Spannplatten flächenhaft
 - Ermittlung von Amplitude und Phase über die gesamte Struktur



- Was Sie direkt erkennen:
- Wo Energie tatsächlich eingeleitet wird
 - Hotspots und schwach angeregte Bereiche
 - Kritische Zonen statt nur Einzelmesspunkte

- Ihr Nutzen:
- Optimale Wahl von Mess- und Regelstellen
 - Bessere Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsbewertung



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

28

// Shakeranregung + Scanning-LDV zur Struktur- und Resonanzanalyse



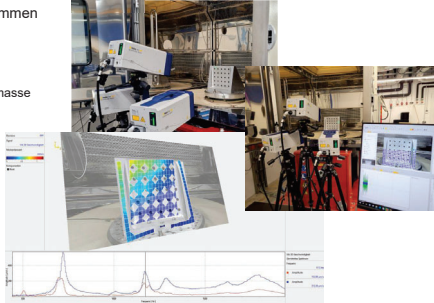
Eigenfrequenzen & Schwingformen bestimmen

Was die Messung liefert:

- Flächige Schwingformen (ODS / Moden)
- Eigenfrequenzen und Resonanzen ohne Sensormasse
- Hotspots und Kopplungen sofort erkennbar
- Schneller Abgleich mit FE-Modellen

Technischer Vorteil:

- Berührungslos – keine Sensor- oder Klebestellen
- Keine Beeinflussung der Dynamik
- Echte Strukturantwort sichtbar



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

29

// LDV für Leiterplatten (PCB) - Tests auf dem Shaker



Ideal für Shaker-Tests:

- Keine Verfälschung durch Sensor- oder Klebemasse
- Schneller Messaufbau
- Hohe Bandbreite und Dynamik
- Kleine Amplituden und Resonanzen klar sichtbar

Was direkt sichtbar wird:

- Punkt- oder Flächenscans von ODS und Modenformen
- Kritische Bauteile und Bereiche schnell identifiziert
- Vergleich mit FE-Modellen



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

30

// Berührungslose Shakerregelung mit LDV



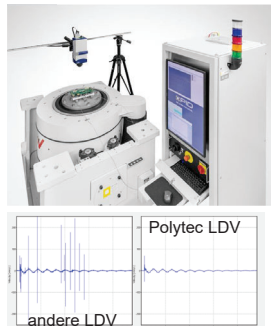
Regelsignal direkt am Bauteil – nicht an der Aufspannung

Prinzip:

- Regelsignal direkt am kritischen Messpunkt
- Keine Sensoren, keine Zusatzmasse, keine Verkabelung
- Keine Verfälschung durch Aufspannung oder Fixtures

Technischer Mehrwert:

- Stabileres Signal ohne Drop-outs (Mehrkanal-Technologie)
 - Keine Oberflächenbehandlung der Probe
- Hohe Auflösung über großen Frequenzbereich
- Messung auch auf kleinen und empfindlichen Strukturen



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

31

// Schwingungsmessungen in Klimakammern



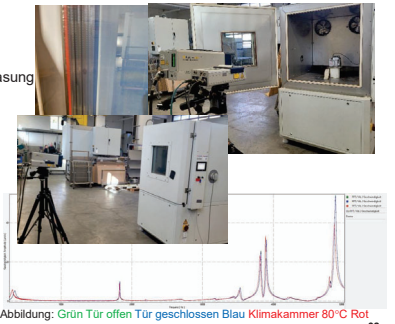
Zuverlässige LDV-Messung trotz Glas und Extrembedingungen

Messsicherheit auch im Härte-test:

- Berührungslose Messung durch Mehrfach-Verglasung
- **flexibel, ohne Vorab-Sensorplatzierung**
- Stabile Signale - temperaturunabhängig
- Resonanzen und Schwingformen klar erfassbar

Direkt erkennbar:

- Temperaturabhängige Frequenz- und Amplitudenverschiebungen
- Änderungen von Steifigkeit und Dämpfung
- Reales Bauteilverhalten unter Umweltlast



2/27/2026

www.polytec.com · © Polytec

Abbildung: Grün Tür offen Tür geschlossen Blau Klimakammer 80°C Rot

32

Polytec
PolyXperts



Auftragsmessungen
und Vermietung



Reparatur
und Kalibrierung



Seminare und
Trainings



Hardware- und
Software- Wartung

www.polytec.com

// Anwendungsbeispiele



- ✓ Optimierung von Geräusch- und Schwingungsverhalten
- ✓ Erhöhung der Zuverlässigkeit / „Shock & Impact“ Analysen
- ✓ Steigerung von Präzision und Leistungsfähigkeit mechanischer Strukturen
- ✓ Reduzierung von Entwicklungszyklen durch Validierung von Simulationen

measure what matters

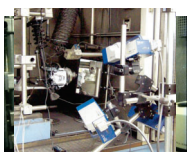
www.polytec.com · © Polytec

Optimierung von Geräusch- und Schwingungsverhalten

// Scanning LDV - Bremsenakustik



- Für schnelle **hochaufgelöste Betriebsschwingformanalyse / Troubleshooting**
- Messung wird auf selbsterregtes Quietschen getriggert
- Viele Messpunkte Bremscheibe, Sattel, Beläge
 - „versteckte“ Punkte über Spiegel



27.02.2026

www.polytec.com · © Polytec

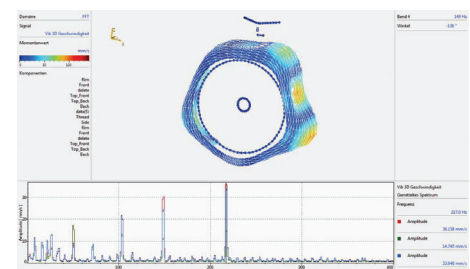
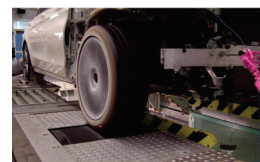
35

Optimierung von Geräusch- und Schwingungsverhalten

// Anwendung: Reifenschwingungen



Projekt mit Continental AG:
Influence of Vehicle Boundary Conditions on the NVH Performance of a Tire



27.02.2026

www.polytec.com · © Polytec

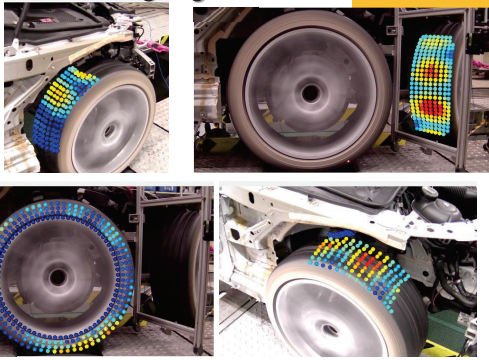
36

// Anwendung: Reifenschwingungen



Setup

- Stützung verschiedener Messpositionen
- Verwendung von Spiegeln



27.02.2026

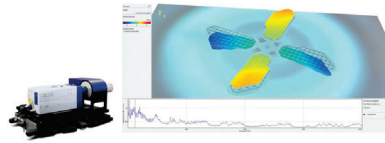
// Aerospace - Schwingungsanalyse unter Rotation



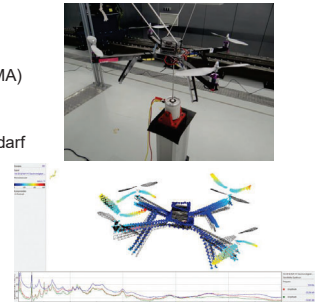
Model Validierung

- Scanning 3D Modalanalyse einer Drohne
- Anregung mit Shaker (EMA) und im Betrieb (OMA)
- Messung mit VibroScan 3D (oder RoboVib®)

Nutzen: Leisere Drohnen sowie geringerer Energiebedarf



Derotator-Messung des rotierenden Propellers
www.polytec.com · © Polytec



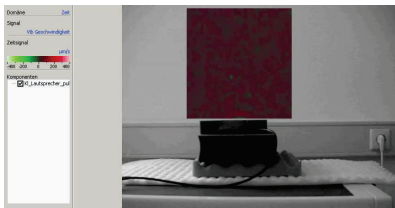
Modalanalyse (EMA)

// Refrakto-Vibrometrie

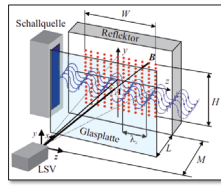


Visualisierung akustischer Phänomene in transparenten Medien

Anwendung: Untersuchungen Schallfeld Lautsprecher, Ultraschall-Sensoren (z.B. Park-Distance)



Lautsprecher mit pulsformiger Anregung



Quelle: Zipser, „Refraktovibrometrie“

27.02.2026

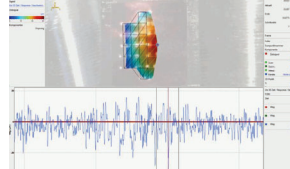
www.polytec.com · © Polytec

// Analyse strömungsangeregter Blechvibrationen

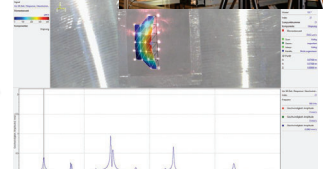


Problem: Anregung der Bleche erzeugt Geräusche im Fahrzeuginnenraum
Messsetup: Metallbleche werden in einem Windkanal angeregt.

Ziel: Optimierung hinsichtlich Steifigkeit und Design



Zeitsignal



Frequenzspektrum

27.02.2026

www.polytec.com · © Polytec

Identifikation der Störgeräusche

41

// Visualisierung von Kabinenlärm



Problem Strukturvibrationen (100–500 Hz):

Eintrag durch Luftanregung / beeinflussen den Kabinenlärm.

Für weniger Kabinenlärm Abstrahlbereiche + Übertragungswege (Transfer Paths) notwendig zu identifizieren

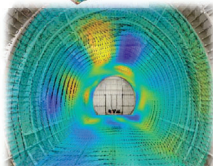
- tausende Messpunkte nötig / Beschleunigungsaufnehmer erfordern kompliziertes und zeitaufwendiges Setup

Lösung – LDV-Technologie:

- Polytec Scanning Systeme
- Hohe Messpunktdichte
- Mess- / Einrichtzeit zu sparen
- Komplexe Transferwege zu visualisieren



Beispiel DLR: Airbus-Rumpf, Umlieg von Beschleunigungssensoren auf Scanning LDV



©https://www.dlr.de/techbilder/institut/aeroelastik/ae-mobilstand-und-flugschwingungsversuchsanlage-vibroakustik-messung

27.02.2026

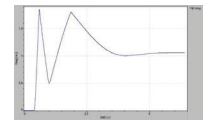
www.polytec.com · © Polytec

42

// Berührungslose Rückstoß- und Rohrschwingungsmessung



- LDV-Messung beim Abfeuern unter extremen Bedingungen
- sichere Distanz – keine Sensorschäden durch Hitze oder Druck
- Erfassung von Rückstoß, Rohrbewegung und Rohrschwingungen
- Hohe zeitliche Auflösung für transiente Schussvorgänge
 - kurzzeitige Hochlast- und Schockereignisse

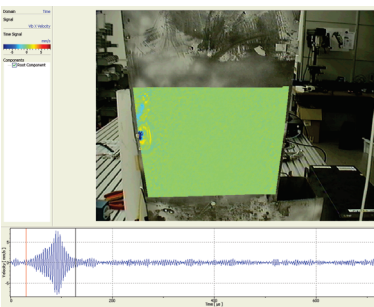


27.02.2026

www.polytec.com · © Polytec

43

// Lamb-Wellen zur Defekterkennung



Methode:

- Einleitung eines kurzen Ultraschall-Bursts über Piezo-Aktor
- Lamb-Wellen breiten sich geführt in der Platte aus
- Scanning-LDV misst die Wellenausbreitung flächig

Ergebnis:

- Zeitaufgelöste Visualisierung der Wellenfront
- Schadstellen eindeutig hochauflösend lokalisierbar

Lamb-Wellen – Kurzfinfo:

- Geführte Ultraschallwellen in dünnen Platten und Composite-Strukturen
- Breiten sich über große Flächen aus (kHz–MHz)

27.02.2026

www.polytec.com · © Polytec

47

Defekterkennung über lokale Resonanz



Prinzip:

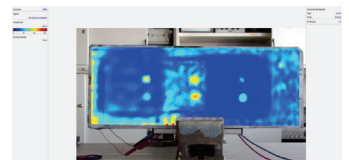
- Defekte verändern lokal die Steifigkeit
- Geschädigte Bereiche → besitzen „andere“ Resonanzfrequenzen

Messmethode:

- Breitband-Anregung (typ. 5–50 kHz)
- Scan der Schwingantwort mit LDV
 - Typische Messzeit: 1–4 Minuten
- Auswertung über Spektrum oder RMS-Werte

Ergebnis:

- Defektzonen im deutlichen Kontrast zu intakten Bereichen



27.02.2026

www.polytec.com · © Polytec

// QTec Neo – Anwendungen in Fluidlast



Vibrationsanalyse von Turbinen, Impellern und Propellern mit Scanning LDV

Methode:

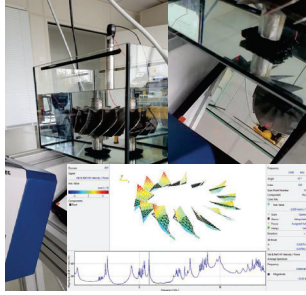
- Struktur wird im realen Betriebszustand gemessen
 - in Luft oder Flüssigkeit
- Anregung durch Betrieb, Strömung oder externe Exciter
- Messung durch Sichtfenster / Tank / Spiegel möglich

Was passiert unter Fluidlast:

- Fluid erzeugt zusätzliche Dämpfung -> Eigenfrequenzen verschieben sich -> Modenformen ändern sich
- Strömung kann Schwingungen anregen (Flow-Induced Vibration)
- Kavitation kann lokale Anregungen erzeugen

Ergebnis

- Reale Modenformen unter Betriebsbedingungen sichtbar



27.02.2026

www.polytec.com - © Polytec

50

// Brücken – Betriebs- und Modalanalyse mit LDV



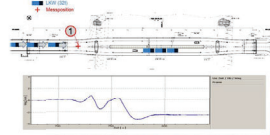
Schwingungsanalyse im Realbetrieb

2 Messszenarien:

Zeitbereich – Überfahrt:

- Durchfahrtsanregung durch LKW
- Zeitaufgelöste Antwort der Struktur
- Messung an definierten Positionen

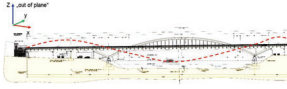
Messung (Zeitmessung): LKW Überfahrt



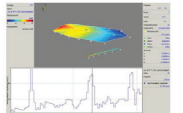
Frequenzbereich – Windanregung:

- Betriebsanregung durch Windlast
- FFT-Auswertung der Strukturschwingung
- Identifikation dominanter Eigenfrequenzen (z. B. 6,5 Hz)

Messung FFT: Windanregung (6 LKWs auf Brücke)



Messung FFT: Windanregung (6 LKWs auf Brücke)



27.02.2026

www.polytec.com - © Polytec

52

// Brückenmessung VFX Long Range



Schwingungsanalyse großer Strukturen aus großer Distanz

Lewis & Clark Bridge, Louisville (USA)

- Messkampagne in 3 Tagen
- 104 Schrägseile charakterisiert
- Messabstand bis 400 m

Messaufgabe

- Bestimmung der Eigenfrequenzen der Seile
- Basis zur Berechnung der Seilzugkräfte
- Betriebsanregung durch Verkehr und Wind

Besonderheiten der Messung

- Messung ohne Reflektoren
- Große Distanz und schräge Messwinkel
- Zuverlässige Datenerfassung im Feld



27.02.2026

www.polytec.com - © Polytec

© <https://www.divioniceengineering.com/project/>

53

// Automatisierte Schwingungsmessung RoboVib TestCentre



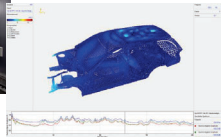
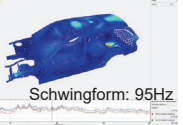
Robotergeführtes LDV-Scanning für große Strukturen

Methode

- Roboterbasierte Positionierung
- Automatisches Scanning großer Bauteile
- Messung kompletter Fahrzeugstrukturen
- Wiederholbare Messabläufe

Ergebnis

- Vollflächige Schwingformen
 - automatisiert erfasst
 - Laufzeitunabhängig (mehrere Tage)
- Hohe Messpunktdichte in kurzer Zeit
- Hohe Wiederholgenauigkeit
- Geeignet für Serien- und Vergleichsmessungen



www.polytec.com - © Polytec

Schwingform: 126Hz

// Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Robert Mörl
r.moerl@polytec.de
0172 7227732

TestRig

[measure what matters](https://www.polytec.com)

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

Andreas Keil, Luis Böhm, Marc Zeitler, Timo Jungblut

IABG mbH, Einsteinstraße 20, 85521 Ottobrunn, Deutschland

Zusammenfassung

Servohydraulische Aktuatoren galten über viele Jahre mangels geeigneter Alternativen als Standardlösung in zahlreichen Prüfsystemen. Mittlerweile stellen hochpräzise elektrische Linear-Direktantriebe für viele Prüfaufgaben jedoch eine technologisch und wirtschaftlich überlegene Alternative dar. Translatorisch wirkende elektrische Synchron-Linearmotoren überzeugen gegenüber servohydraulischen Systemen durch einen deutlich geringeren Energieverbrauch, eine höhere Dynamik sowie eine sehr hohe Regel- und Positioniergenauigkeit. Darüber hinaus lassen sich durch ihren Einsatz typische Zielkonflikte bei der Auslegung konventioneller Prüfstandsaktuatorik auflösen, wodurch das Anwendungsspektrum von Prüfsystemen erweitert, deren Auslastung gesteigert und die langfristige Investitionssicherheit erhöht wird. Weitere Vorteile ergeben sich aus dem reduzierten Wartungsaufwand sowie der vereinfachten Erfüllung von Sicherheits- und Umwelanforderungen. Der vorliegende Beitrag beleuchtet die Herausforderungen bei der Realisierung hochperformanter elektrischer Linear-Direktantriebe und stellt entsprechende Lösungsansätze am Beispiel eines Funktionsprüfstandes für elektromechanische Lenksysteme vor. Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Antriebssystems wird anhand umfangreicher Messungen für unterschiedliche Testfälle nachgewiesen. Ein experimenteller Vergleich mit servohydraulischen Lösungen verdeutlicht die signifikanten Vorteile elektrischer Direktantriebe hinsichtlich Präzision, Gleichlaufgüte, Regelgenauigkeit und Bandbreite. Der Beitrag liefert damit sowohl einen Überblick über die technische Umsetzung als auch einen praxisnahen Vergleich beider Aktorkonzepte und zeigt konkrete Potenziale zur Performance-Steigerung und Erweiterung des Einsatzspektrums von Prüfsystemen, Maschinen und Anlagen auf.

Nomenklatur

F – Kraft

i – Strom

v – Geschwindigkeit

x – Weg

1. Einleitung

Im Sinne der Flexibilität, der Anlagenauslastung und der Investitionssicherheit besteht im Prüfstandsbau häufig die Notwendigkeit, sehr unterschiedliche Test- und Lastfälle für ein großes Spektrum an unterschiedlichen Prüflingen mit einer einzigen Anlage abzudecken. Zielkonflikte bei der Festlegung und Dimensionierung der Aktuatorik sind daher eine typische Herausforderung im Prüfstandsbau.

Für Aufgabenstellungen mit moderaten Kräften, typischerweise unterhalb von etwa 100 kN, ermöglichen elektrische Linear-Direktantriebe es, mit einem einzigen Aktorsystem sowohl eine große Spanne von mechanischen Stellbereichen von wenigen zehn Mikrometern bis zu mehreren hundert Millimetern als auch einen breiten Frequenzbereich von quasistatischen Anwendungen bis hin zu mehreren hundert Hertz abzudecken. Hierdurch werden typische Zielkonflikte, die bei der Auswahl und Auslegung konventioneller Aktorkonzepte bestehen, aufgelöst [1]. Elektrische Linear-Direktantriebe sind somit insbesondere auch für Anwendungen prädestiniert, in denen sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Aktuatorik mit nur einem Aktorsystem präzise in einer Anlage umgesetzt werden müssen. Im Vergleich zu servohydraulischen Antriebssystemen zeichnen sich hochpräzise elektrische Synchron-Linearmotoren zudem durch einen geringeren Energiebedarf, eine höhere Dynamik sowie eine

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

sehr hohe Regelgenauigkeit aus. Darüber hinaus bieten sie Vorteile hinsichtlich Wartungsaufwand sowie der Umsetzung von Sicherheits- und Umweltaforderungen.

Vor diesem Hintergrund adressiert der vorliegende Beitrag die Herausforderungen bei der Realisierung hochperformanter elektrischer Linear-Direktantriebe und deren Lösungen exemplarisch am Beispiel eines Zahnstangenaktuators für einen Hochleistungslenkungsprüfstand. Nach einer Beschreibung der Aufgabenstellung und des Prüfsystems werden die wesentlichen Herausforderungen bei der Auslegung und Regelung elektrischer Direktantriebe im Allgemeinen und für die konkrete Prüfaufgabe im Speziellen diskutiert. Darauf aufbauend werden die entwickelten Lösungsansätze vorgestellt, wobei ein Schwerpunkt auf der vollständigen Kompensation der Rastkräfte zur Erreichung einer sehr hohen Gleichlaufgüte, insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten, liegt. Ein weiterer Fokus liegt auf dem eingesetzten modellbasierten Regelungskonzept und der hierfür genutzten durchgängigen Entwicklungs-Toolchain. Abschließend wird die Leistungsfähigkeit des Systems anhand verschiedener Testfälle demonstriert und experimentell mit servohydraulischen Realisierungen verglichen, wobei klare Vorteile hinsichtlich Präzision, Dynamik und Bandbreite aufgezeigt werden.

2. Funktionsprüfstand für elektromechanische Lenksysteme

Elektromechanische Servolenkungen (Electric Power Steering, EPS) sind heute Stand der Technik in nahezu allen Personenkraftfahrzeugen. Sie ermöglichen eine softwarebasierte, fahrzustandsabhängige Anpassung der Lenkunterstützung und lösen den Zielkonflikt zwischen hoher Unterstützung bei niedrigen Geschwindigkeiten und geringer Unterstützung bei hohen Geschwindigkeiten. Zudem erlauben sie unterschiedliche Lenkcharakteristiken und zeichnen sich durch einen geringeren Energieverbrauch gegenüber hydraulischen Systemen aus. Durch die aktorische Nutzung und Vernetzung mit Assistenzsystemen lassen sich weitere Funktionen wie automatisches Einparken, Spurhalteassistenten oder Fahrdynamikregelungen realisieren [2].

Ein EPS-System besteht aus einem Zahnstangenlenkgetriebe, einem Drehmomentsensor, einem elektromechanischen Antrieb sowie einer elektronischen Steuereinheit (ECU). Das vom Fahrer eingebrachte Lenkmoment wird erfasst und dient gemeinsam mit Fahrgeschwindigkeit und Lenkwinkel als Grundlage für die Berechnung und Einprägung des Unterstützungsmoments (Abb. 1).

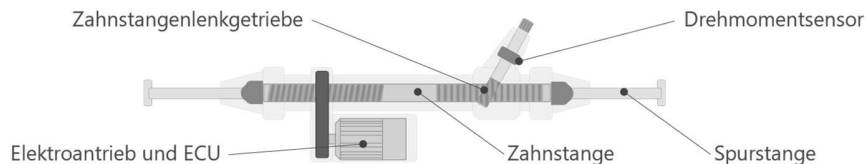


Abb. 1: Komponenten eines EPS-Systems

Die Entwicklung und Absicherung solcher sicherheitsrelevanter Lenksysteme erfordert leistungsfähige Prüfstände, auf denen das mechatronische Gesamtsystem aus Mechanik, Motor, Elektronik und Software realitätsnah erprobt werden kann. Neben mechanischen Belastungseinheiten umfassen Lenkungsprüfstände daher eine elektrische Leistungsversorgung für die Lenkung (Bordnetzsimulation), eine Restbussimulation sowie häufig Einrichtungen zur Temperatur- und Klimasimulation (Abb. 2)[3].

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

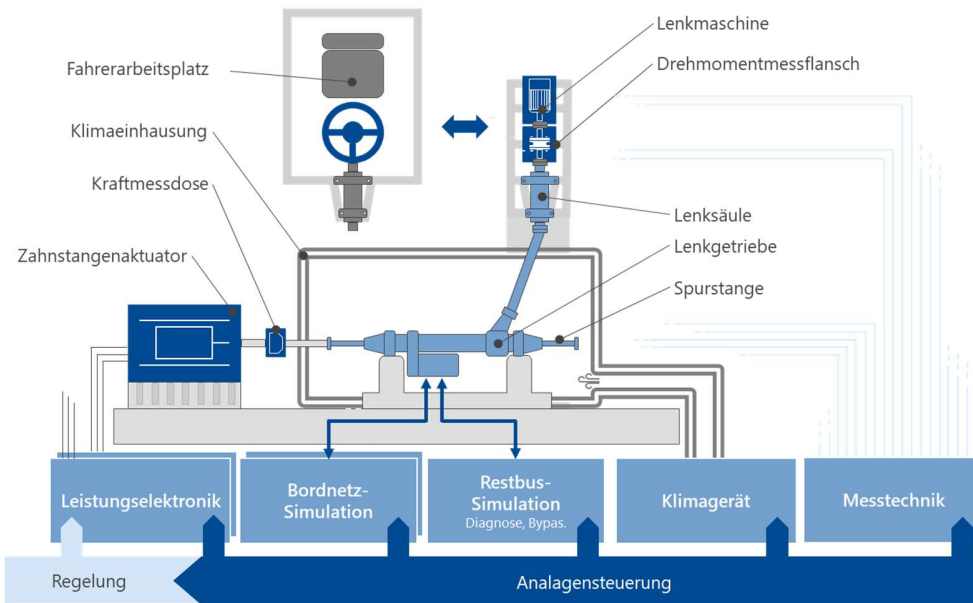


Abb. 2: Teilsysteme eines Lenkungsprüfstandes

Die Lenkbewegungen werden im automatisierten Betrieb meist über einen Lenkroboter eingeleitet, der winkel- oder drehmomentgeregelt arbeitet. Moderne Prüfstände ermöglichen zudem einen Driver-in-the-Loop-Betrieb mit Fahrer-Cockpit und Fahrersimulator (Abb. 3), wodurch Lenkeigenschaften haptisch erlebt und unter reproduzierbaren Bedingungen bewertet werden können. Dies reduziert Entwicklungszeit und -kosten.



Abb. 3: Fahrersimulator eines Lenkungsprüfstandes

Eine zentrale Komponente von Lenkungsprüfständen ist die Zahnstangenaktuatorik, die die auf die Spurstangen der Lenkungen wirkenden Kräfte und Verschiebungen nachbildet und damit maßgeblich die Leistungsfähigkeit und den Einsatzbereich des Prüfstandes bestimmt. Abhängig von den abzubildenden Testfällen ergeben sich hierbei sehr unterschiedliche, teilweise gegensätzliche Anforderungen an die Zahnstangenaktuatorik und Regelung. Die Auswahl und Auslegung geeigneter Zahnstangenaktuatoren ist daher umso herausfordernder, je flexibler der Lenkungsprüfstand eingesetzt werden soll und umso höher die Anforderungen an die Regelgenauigkeit und Dynamik der einzelnen unterschiedlichen Testfälle sind. Aufgrund ihrer vielfältigen Stärken sind elektrische Linear-Direktantriebe prädestiniert für Lenkungsprüfstände, in denen sehr unterschiedliche Test- und Lastfälle mit einem Aktorsystem präzise umgesetzt werden sollen. Typische Testfälle sind:

Reibkraftmessung: Zur Ermittlung der Reibung wird die Zahnstange mittels des Zahnstangenaktuators verschoben und die resultierende Zahnstangenkraft gemessen. Dieser Test erfolgt an der passiven, unregulierten Lenkung für verschiedene sehr kleinen Geschwindigkeiten, typischerweise zwischen 0,5 und 50 mm/s. Der Zahnstangenaktuator wird hierzu weggeregelt betrieben. Essenziell für aussagefähige Reibkraftmessungen ist die Konstanz der Geschwindigkeit und eine präzise Messung der kleinen resultierenden Kräfte. Für diesen Test muss die Zahnstangenaktuatorik somit eine sehr hohe Gleichlaufgüte auch bei sehr geringen Geschwindigkeiten aufweisen.

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

Wirkungsgradanalysen: Zur Ermittlung des Wirkungsgrades der Lenkgetriebe wird die elektrische Eingangsleistung und die mechanische Ausgangsleistung an der Zahnstange für unterschiedliche Kraft- und Geschwindigkeitsniveaus gemessen. Hierfür leitet der winkelgeregelte Lenkroboter Lenkbewegungen ein, aus denen dann Zahnstangenbewegungen resultieren. Die Aufgabe des kraftgeregelten Zahnstangenaktuators besteht darin, eine definierte konstante Gegenkraft in das bewegte System einzuleiten. Insbesondere bei hohen Zahnstangengeschwindigkeiten ergeben sich hierbei hohe Anforderungen an das Störgrößenverhalten der Kraftregelung.

Verfügbarkeitsmessung: Zur Ermittlung der thermischen Verfügbarkeit des Lenkgetriebes wird wiederholt ein Parkiermanöver durchgeführt. Im realen Fahrzeug werden beim Lenken durch die Reibkräfte der Räder des stehenden Fahrzeugs hohe Kräfte an den Spurstangen erzeugt, welche am Prüfstand vom Zahnstangenaktuator simuliert werden. Mit fortschreitender Versuchsdauer erwärmen sich ECU und Motor des Lenkgetriebes und es kommt zu einer gesteuerten Reduzierung der Unterstützungsleistung. Aus der realen Kraftverlaufskurve sowie das variabel Übersetzungsverhältnis des Lenkgetriebes resultieren bei hohen Lenkwinkelgeschwindigkeiten hohe Geschwindigkeiten, hohe Kräfte und eine hohe Kraftdynamik an der Zahnstange.

Robustheits- und Störgrößenuntersuchungen: Zur Untersuchung der Robustheit und des Störgrößenverhaltens ist das aktive Lenkgetriebe breitbandig durch die kraft- oder weggeregelte Zahnstangenaktuatorik anzuregen.

Echtzeit-Nachfahrversuche: Zur Nachbildung von Fahrmanövern sind in Fahrbetriebsmessungen gemessene Kräfte präzise in die sich bewegende Zahnstange einzuleiten

Virtuelle Erprobungs- und Abstimmungsfahrten: Für die Bewertung von Lenkeigenschaften durch Testfahrer in Interaktionsprüfständen werden ebenfalls hochdynamische und sehr präzise Antriebe benötigt. Die Kraftsollwerte für die Zahnstangenaktuatorik werden hierbei aus den gemessenen Zahnstangeverschiebungen mit einem Echtzeitmodell des Fahrzeugs berechnet. Eine große Bedeutung kommt neben der Dynamik und Genauigkeit des Aktors dabei auch einer minimalen Latenz in der gesamten Kette, von gemessenem Wegsignal bis zur an der Zahnstange erzeugten Kraft, zu.

3. Herausforderungen

Elektrische Linear-Direktantriebe basieren auf dem Wirkprinzip eines synchronen Linearmotors, bei dem ein permanentmagnetischer Läufer translatorisch relativ zu einem mehrphasig bestromten Stator bewegt wird. Abb. 4 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines servoelektrischen Linear-Direktantriebs in Doppelkambbauweise mit der zugehörigen Leistungselektronik. Die Kraftentstehung erfolgt dabei direkt ohne mechanische Übersetzung, wodurch die hohe Dynamik und Genauigkeit ermöglicht werden. Gleichzeitig ergeben sich folgende prinzipiell bedingte Herausforderungen:

Rastkräfte / Cogging: Eine zentrale Rolle spielen Rastkräfte (Cogging), die durch die periodische Wechselwirkung zwischen Permanentmagneten des Läufers und der Zahnung des Stators entstehen. Diese positionsabhängigen Kraftanteile überlagern die Stellkraft des Antriebs und wirken sich insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten und Kräften negativ auf die Gleichlaufgüte aus.

Bewegte Masse: Weiterhin ist der Läufer anwendungsbedingt möglichst biegesteif auszuführen. Zudem trägt er die Permanentmagnete, was zu einer hohen bewegten Masse führt. Im Gegensatz zu hydraulischen Zylindern, bei denen sich der Kolben im passiven Zustand (geschlossenes Servoventil) auf einer steifen Ölsäule abstützt, weist ein elektrischer Linear-Direktantrieb im unbestromten Zustand zudem keine aktive Steifigkeit auf. Gleichzeitig ist die Dämpfung der bewegten Masse sehr gering. In Kombination mit Nachgiebigkeiten der Regelstrecke oder des Prüflings können sich dadurch niederfrequente, schwach gedämpfte Eigenfrequenzen in Wirkrichtung ausbilden.

Eigenverhalten: Zusätzlich können sich Eigenformen des Systems, insbesondere Biegeeigenformen des Läufers oder des Gehäuses, über das Wegmesssystem in die Regelkreise einkoppeln und die Regelgüte begrenzen.

Stromregelgenauigkeit: Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der prinzipiellen Proportionalität zwischen Motorstrom und Stellkraft. Während für das präzise Stellen kleiner Kräfte sehr kleine Ströme hochgenau geregelt werden müssen, sind für andere Lastfälle mit hohen Stellkräften oder Beschleunigungen entsprechend große Ströme erforderlich. Daraus resultieren hohe Anforderungen an die Linearität, Auflösung und Genauigkeit der Endstufen sowie an die interne Strommessung.

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

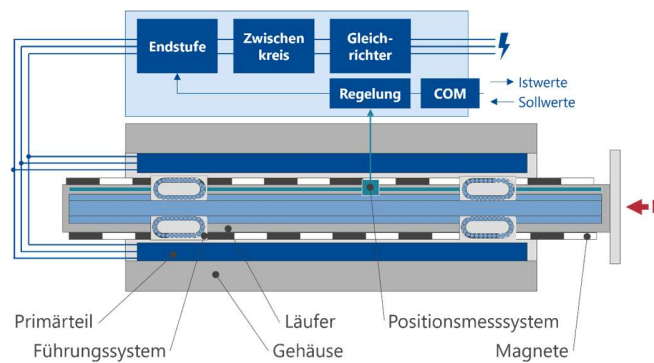


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines servoelektrischen Linear-Direktantriebs in Doppelkammbauweise

Für den Einsatz elektrischer Linear-Direktantriebe in Lenkungsprüfständen kommen noch verschiedene anwendungsspezifische Herausforderungen hinzu:

Lastfälle mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Aktuatorik: Die abzubildenden Testfälle reichen von blockierten Zuständen über sehr langsame, gleichförmige Bewegungen zur Reibkraftmessung bis hin zu hochdynamischen Anregungen und Echtzeit-Nachfahrversuchen. Diese Tests werden teilweise am passiven Prüfling, überwiegend jedoch an aktiv geregelten Lenksystemen durchgeführt. Entsprechend ergeben sich stark variierende Anforderungen an die Aktuatorik und Regelung.

Variierende Eigenschaften der Prüflinge: Auf einem Prüfstand sind Prüflinge mit sehr unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zu charakterisieren. Hierzu zählen insbesondere stark variierende Steifigkeiten, Übersetzungsverhältnisse, Geometrien und Einbaulagen.

Wechselwirkung der Regelkreise: Da es sich bei EPS-Systemen selbst um geregelte mechatronische Systeme handelt, treten zusätzlich Wechselwirkungen zwischen den Regelkreisen des Prüfstandes und denen des Prüflings auf. Das dynamische Verhalten der Prüflinge kann dabei in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand, dem Betriebsmodus und dem Softwarestand erheblich variieren.

Nichtlinearität und Zeitvarianz: Darüber hinaus sind elektromechanische Lenksysteme ausgeprägt nichtlinear und zeitvariant. Nichtlinearitäten entstehen unter anderem durch variable Übersetzungen, Spiel in Gelenken sowie elastomere Koppellemente. Zeitvariante Effekte ergeben sich beispielsweise aus der (simulierten) Fahrzeuggeschwindigkeit, dem thermischen Verhalten sowie der Degradation des Stellantriebs der Lenkung sowie aus den unterschiedlichen Fahrmodi.

Eigenfrequenzen der Regelstrecke: Insbesondere bei passiven Lenkgetrieben treten zusätzlich stark ausgeprägte niederfrequente Eigenfrequenzen der Regelstrecke auf. Aufgrund der hohen Übersetzungsverhältnisse von Zahnstangenlenkgetrieben resultiert aus der rotatorischen Trägheit der elektrischen Stellantriebe der Prüflinge eine sehr große effektive Masse (teilweise größer 2 t) in Zahnstangenrichtung. In Kombination mit den Nachgiebigkeiten des Systems, insbesondere der Spurstangen, ergeben sich Eigenfrequenzen mit hohen modalen Massen typischerweise im Bereich von etwa 8 bis 12 Hz, die die Regelbarkeit erheblich beeinflussen können.

4. Technische Lösung

Abb. 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau der umgesetzten Zahnstangenaktuatorik sowie deren Integration in den Prüfstand. Die gefräste Läuferstruktur aus Aluminium dient der Aufnahme der Permanentmagnete, des Glasmaßstabs eines hochauflösenden Gebersystems, der Führungsschienen eines Kugelumlaufführungssystems sowie einer Kraftmessdose. In das Gehäuse des Aktors sind die Kugelumlaufführungen, der Geberkopf und die beiden wassergekühlten Primärteile integriert. Letztere sind in axialer Richtung leicht versetzt zueinander angeordnet, um die Rastkräfte zu reduzieren. Jedes Primärteil wird durch einen eigenen Umrichter angesteuert, wodurch die Ströme genau gestellt werden können. Die SPS der Firma Beckhoff dient unter anderem der Steuerung und Überwachung des Antriebs. Die SPS kommuniziert mit einem Echtzeitsystem der Firma dSPACE, auf dem die Echtzeitmodelle des Kunden (z.B. Fahrzeugmodelle), die Signalgeneratoren sowie die Anlagensteuerung und Testautomatisierung implementiert sind. Die Bedienung der Anlage erfolgt über einen Bedien-PC mit der Software ControlDesk von dSPACE.

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

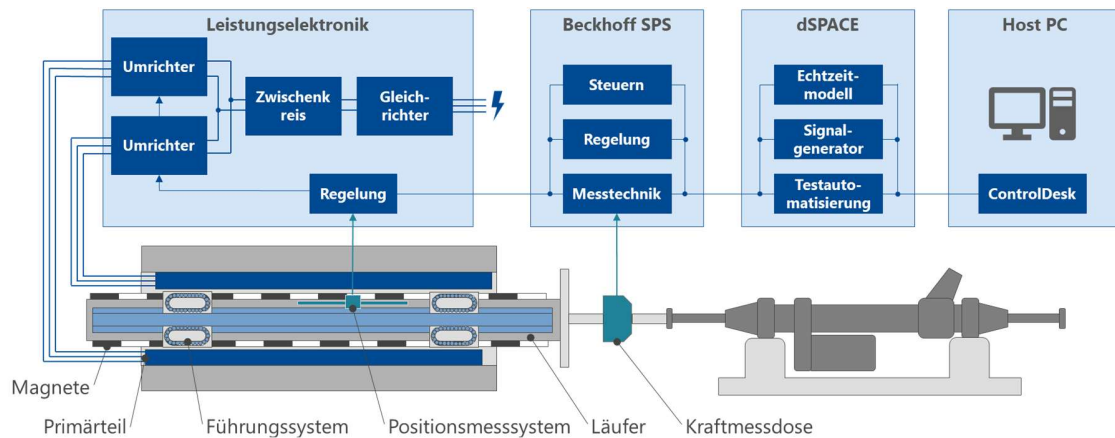


Abb. 5: Systemarchitektur der umgesetzten Zahnstangenaktuatorik

Der mechanische Aufbau des Systems wurde bzgl. einer möglichst geringen bewegten Masse bei günstigem Eigenverhalten unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens optimiert. Eine große Bedeutung kommt hierbei der Auswahl geeigneter Führungssysteme zu. Abb. 6 zeigt die ersten drei Eigenformen des Antriebs für die Mittelposition des Läufers.

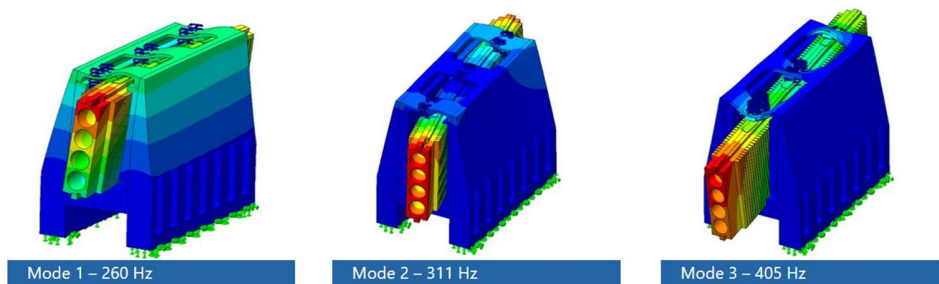


Abb. 6: Simulierte Eigenformen des Aktors

Die Regelung wurde hierarchisch auf drei Ebenen realisiert: Auf dem dSPACE-Echtzeitsystem erfolgen Testautomatisierung und Sollwertgenerierung, auf der Beckhoff-SPS sind die übergeordneten Regelalgorithmen und auf dem Umrichter die unterlagerten Antriebsregelkreise implementiert. Die Anpassung an kundenspezifische Anforderungen erfolgt modellbasiert über MATLAB/Simulink und ControlDesk. Abb. 7 zeigt die Gesamtstruktur und den Signalfluss zwischen den Systemebenen.

Die Wegregelung ist als kaskadierte Regelung auf dem Umrichter ausgeführt. Der innere Stromregelkreis arbeitet mit 16 kHz. Ihm sind ein Geschwindigkeitsregelkreis mit 16 kHz und einem Positionsregelkreis mit 4 kHz überlagert. Die Sollwerte werden auf dem dSPACE-System, entweder als vorgegebene Trajektorien oder aus einem Echtzeitmodell generiert. Für periodische Anregungen kann auf der Beckhoff-SPS optional ein adaptiver Amplituden-Phasenregler zugeschaltet werden [4].

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

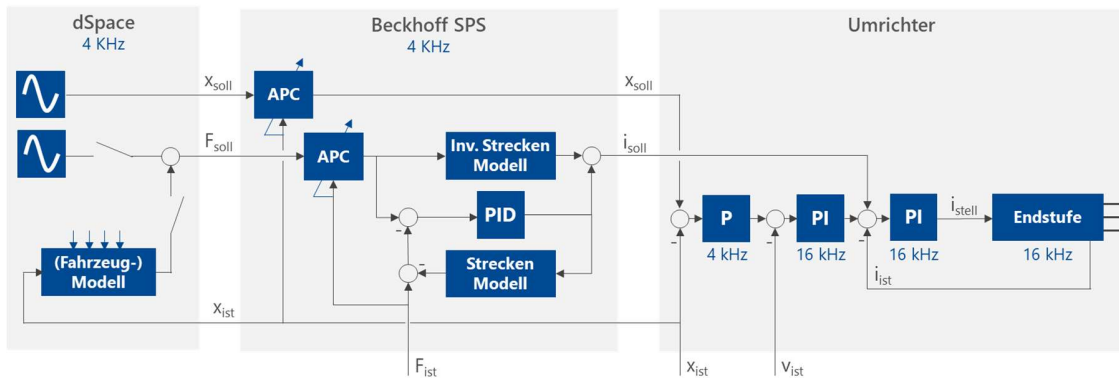


Abb. 7: Regelungsschema zur Berechnung des Sollstroms. F_{soll} : Sollwert Kraftregelung, x_{soll} : Sollwert Wegregelung, i_{soll} : Sollwert Stromregelung, F_{ist} : Gemessene Kraft (zwischen Aktor und Lenkung), x_{ist} : Gemessener Aktorweg, V_{ist} : Gemessener Aktorgeschwindigkeit, i_{ist} : Gemessener Aktorstrom.

Die Kraftregelung dient der Erzeugung von Kräften von Kräften an der Zahnstange. Der unterlagerte Stromregelkreis auf dem Umrichter stellt die Aktorkraft mit hoher Bandbreite bereit. Zur Dämpfung des Systems und zur Unterdrückung von Instabilitäten der aktiven Prüflinge wird eine zusätzliche aktive Dämpfung eingesetzt [5]. Der Kraftregelkreis ist auf der Beckhoff-SPS implementiert. Der Kraftsollwert wird mittels eines inversen Systemmodells vorgesteuert und begünstigt das Führungsübertragungsverhalten. Für die Unterdrückung von Störungen und zur Kompensation von Modellfehlern wurde ein Internal Model Controller implementiert [6]. Für harmonische Anregungen kann ergänzend ein adaptiver Amplituden-Phasenregler aktiviert werden. Die Kraftsollwerte werden auf dem dSPACE-System vorgegeben oder auf diesem positionsabhängig aus einem Echtzeitmodell berechnet. Die Entwicklung der Kraftregelung erfolgte über eine durchgängige modellbasierte Toolchain [7]. Das Gesamtsystem aus Antrieb und aktivem Prüfling wurde in MATLAB/Simulink modelliert, um verschiedene Regelungsansätze in der Simulation zu bewerten. Die vielversprechendsten Ansätze – ein Zustandsregler mit Luenberger-Beobachter [6] sowie ein Internal Model Controller – wurden echtzeitfähig implementiert und der Code für die Beckhoff-SPS automatisiert generiert. Anschließend wurden am Prüfstand beide Ansätze erprobt und miteinander verglichen. Obwohl der Zustandsregler teilweise eine bessere Dynamik zeigte, wurde der IMC für die Anwendung ausgewählt. Ausschlaggebend waren die deutlich intuitivere Parametrierung auf Basis von PID-ähnlichen Parametern anstelle einer Polplatzierung sowie die höhere Robustheit durch den flexibleren Einsatz der aktiven Dämpfung. Insbesondere im Umgang mit Prüflingen mit aggressiver und wenig robuster Regelung erwies sich der IMC im Gesamtsystem (aktiver Prüfstand, Lenkmaschine, Zahnstangenaktuator) als robuster.

5. Ergebnisse

Abb. 8 zeigt den realisierten Aktuator und fasst die wesentlichen Leistungsdaten für die Anwendung in Hochleistungslenkungsprüfständen zusammen.

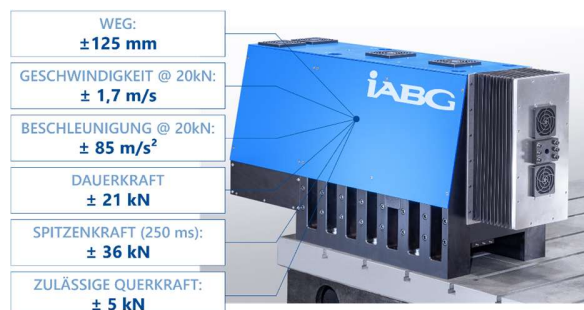


Abb. 8: Realisierter Zahnstangeaktuator

Abb. 9 zeigt das Übertragungsverhalten der Positionsregelung des freien Stellers mit und ohne zusätzliche adaptive Regelung im Frequenzbereich bis 250 Hz, wobei ein Sinus-Sweep zur Anregung verwendet wurde. Die Positionssoll- und -istwerte wurden auf der SPS erfasst. Die Eigenfrequenzen im Frequenzbereich zwischen 70 und

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

250 Hz resultieren aus dem Spannungsfundament, auf dem der Antrieb für die Versuche befestigt war. Der zeitliche Verlauf der Soll- und Istwerte für ein harmonisches Positionssollwertsignal mit einer Frequenz von 1 Hz ist Abb. 10 zu entnehmen. In der linken Abbildung sind die Messergebnisse für eine Sollamplitude von 10 μm und in der rechten Abbildung für eine Sollamplitude von 100 mm dargestellt. Für die beiden Istsignale werden in Abb. 11 die Spektren im Frequenzbereich bis 10 Hz dargestellt. Für das Istsignal mit einer Amplitude von 100 mm wurde eine Oberschwingungsgesamtverzerrung (THD) von -78 dB erreicht, während für das Istsignal mit einer Amplitude von 10 μm immer noch ein THD-Wert von -35 dB erreicht wird. Dies zeigt, dass auch bei geringen Amplituden noch eine hohe Signalqualität gegeben ist und eine Variation der Sollwerte um vier Dekaden mit dem Aktor möglich ist. Ergänzend zeigt Abb. 12 Auswertungen im Frequenzbereich für einen Sinus-Sweep von 0,1 auf 250 Hz, wobei die zu erkennenden Eigenfrequenzen wiederum aus dem verwendeten Fundament resultieren. Der Auswertung ist zu entnehmen, dass auch bei hohen Frequenzen eine hohe Signalqualität und -linearität erreicht wird.

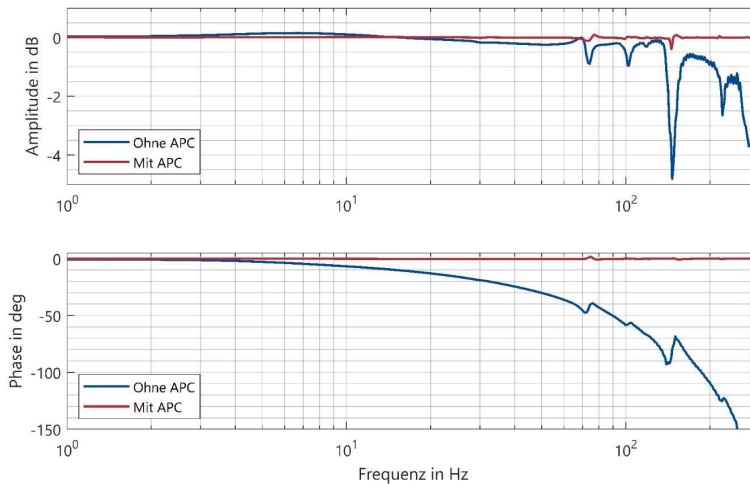


Abb. 9: Übertragungsverhalten des Lageregelkreises mit und ohne adaptive Regelung

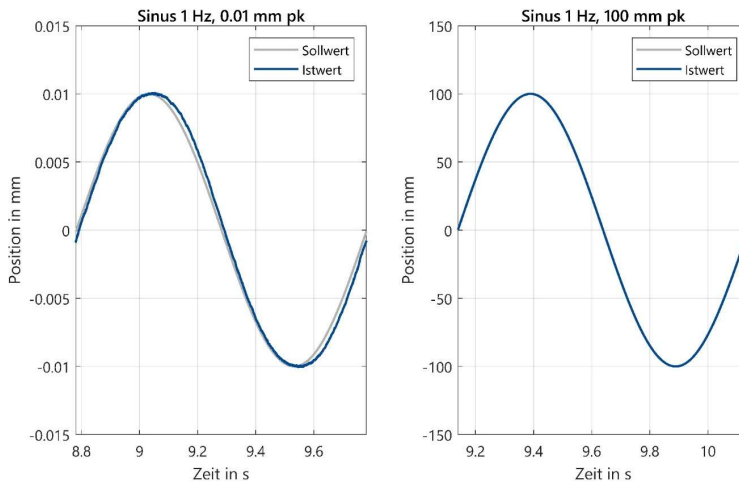


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf der Soll- und Istwerte für Sollamplituden von 10 μm (l.) und 100 mm (r.)

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

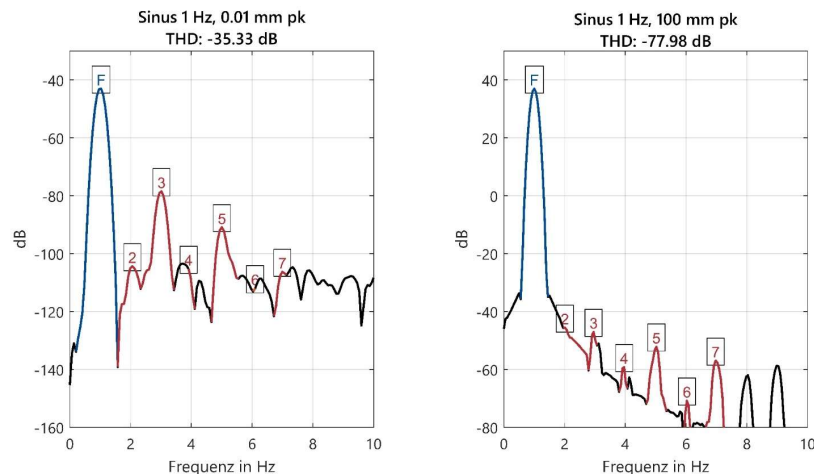


Abb. 11: Auswertung der Istwerte im Frequenzbereich für Amplituden von 10 μ m (l.) u. 100 mm (r.)

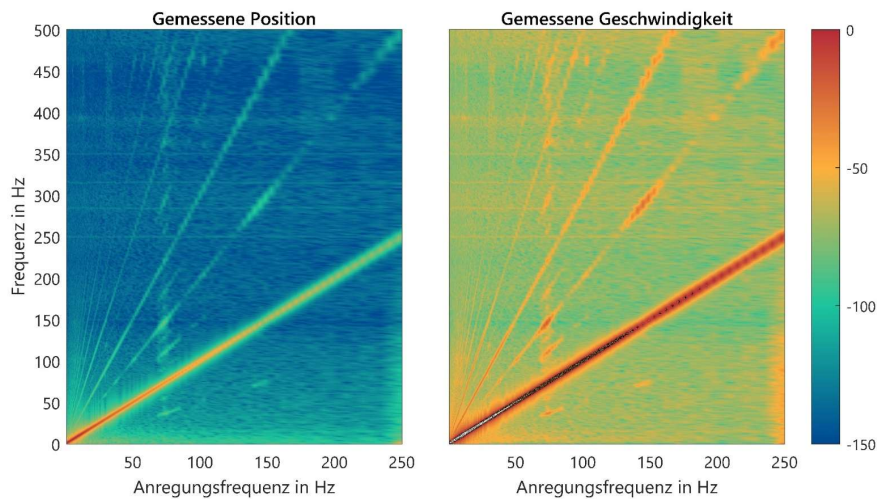


Abb. 12: Auswertung der Istwerte im Frequenzbereich für Amplituden von 10 μ m (l.) u. 100 mm (r.)

Abb. 13 ist zu entnehmen, dass die prinzipbedingten Rastkräfte durch die Kombination aus mechanischem Aufbau und präzisen Endstufen vollständig kompensiert werden. In der linken Abbildung sind die gemessenen Geschwindigkeitsistwerte für unterschiedliche, sehr kleine Sollgeschwindigkeiten zwischen -10 und +10 mm/s in Abhängigkeit von der Läuferposition dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt exemplarisch die Geschwindigkeitsistwerte für eine Sollgeschwindigkeit von 1 mm/s. In Abb. 14 wird das mit dem elektrischen Direktantrieb erreichte Gleichlaufverhalten mit dem Verhalten einer servohydraulischen Zahnstangenaktuatorik in logarithmischer Darstellung verglichen. Dauerkraft, Hub und Maximalgeschwindigkeit des für den Vergleich herangezogenen servohydraulischen Zahnstangenaktuator mit hydrostatischer Lagerung und für die Anwendung optimierter Sliding-Mode-Regelung entsprechen den Werten des elektrischen Direktantriebs.

In Abb. 15 ist der Kraftaufbau von -20 kN auf +20 kN gegen eine elastische Struktur mit einer statischen Steifigkeit von 20 kN/mm für zwei unterschiedliche Kraftanstiegsraten dargestellt. Die linke Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Istkraft für eine Sollwertrampe von 500 kN/s. Die rechte Abbildung zeigt das gemessene Zeitsignal für eine gewünschte Kraftanstiegsrate von 1000 kN/s. In Abb. 16 ist die gemessene Übertragungsfunktion des Kraftregelkreises gegen eine elastische Struktur mit einer statischen Steifigkeit von 20 kN/s mit aktivierter Amplituden-Phasen-Regelung (APC) dargestellt. Die Amplitudenabweichungen im Frequenzbereich bis 100 Hz sind kleiner 0,4 dB.

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

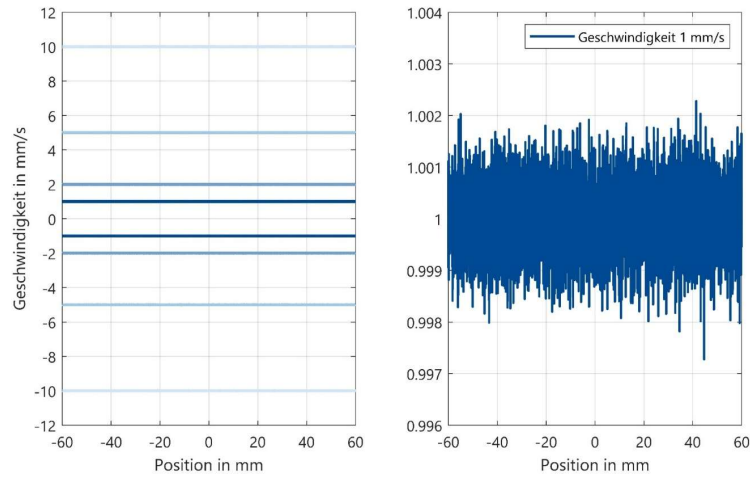


Abb. 13: Geschwindigkeitsstwerte in Abhängigkeit von der Läuferposition bei sehr kleinen Geschwindigkeiten

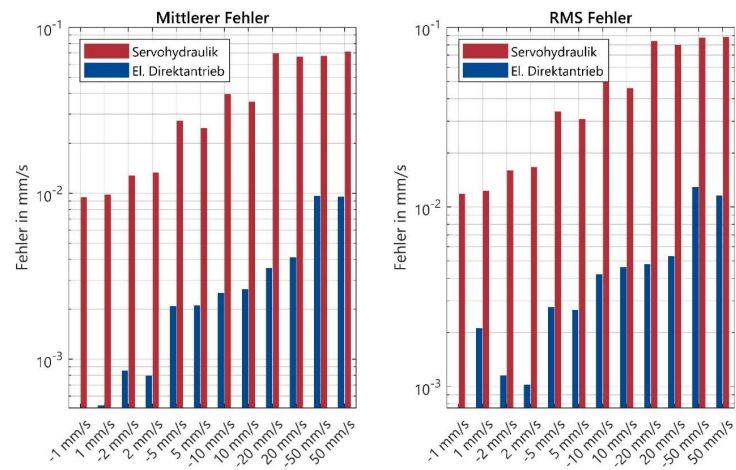


Abb. 14: Gegenüberstellung des Gleichlaufverhaltens von elektrischem Direktantrieb und Servohydraulik

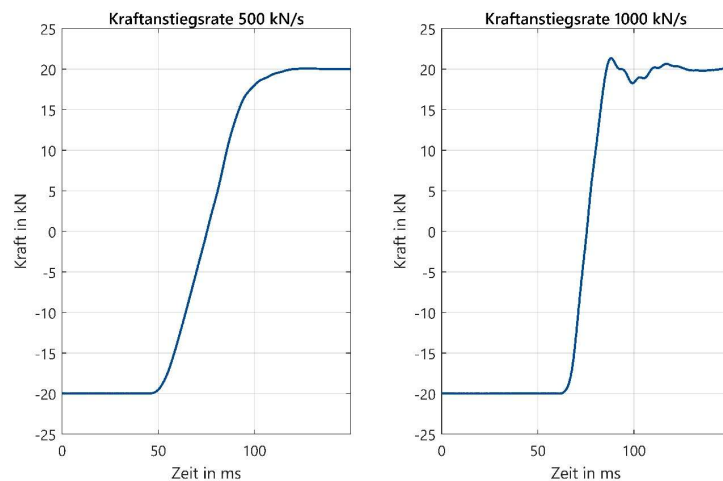


Abb. 15: Kraftaufbau bei linearen Sollwerttrampen von -20 auf 20 kN gegen elastische Struktur

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

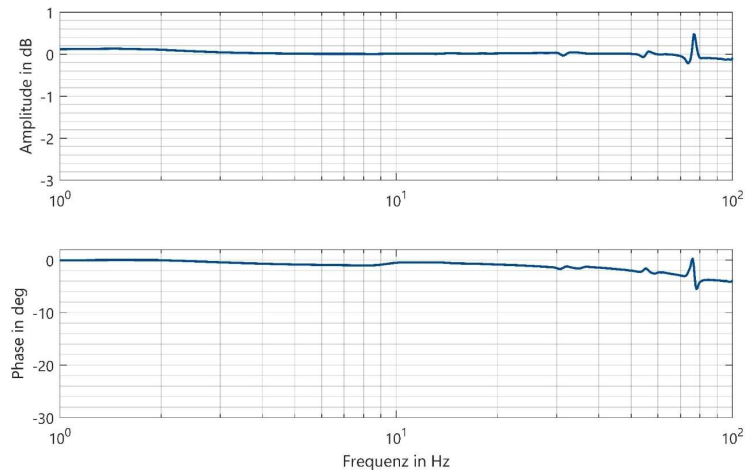


Abb. 16: Gemessene Übertragungsfunktion des Kraftregelreises mit APC

Im Folgenden wird das Verhalten des kraftregelten Direktantriebs bei einer Störung durch den aktiven Prüfling vorgestellt. Ziel ist es hierbei, mittels der Zahnstangenaktuatorik eine möglichst konstante Kraft auf die Zahnstange aufzuprägen, während diese verfährt. Hierzu wird durch die Lenkmaschine eine Lenkbewegung auf die Lenksäule aufgeprägt. Die daraus resultierende Verschiebung der Zahnstange ist im oberen Zeitverlauf in Abb. 17 dargestellt. Die unteren Verläufe in Abb. 17 zeigen exemplarisch die Abweichungen von einer gewünschten konstanten Sollkraft von 5 kN für eine servohydraulische sowie die umgesetzte direktelektrische Realisierung der Zahnstangenaktuatorik. In Abb. 18 werden die mit dem Direktantrieb und der servohydraulischen Umsetzung erreichten Regelabweichungen für unterschiedliche Kraftniveaus und Zahnstangengeschwindigkeiten gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt die deutliche Überlegenheit der elektrischen Umsetzung für Anwendungen, in denen es darum geht, Kräfte in bewegte Systeme einzuleiten.

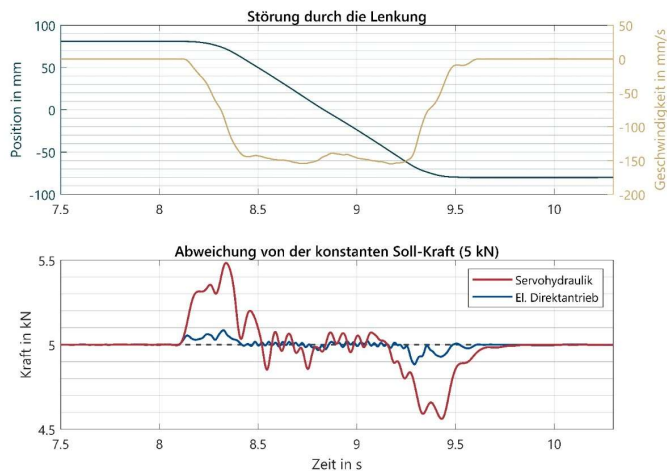


Abb. 17: Störung durch Lenkgetriebe mit einer Zahnstangengeschwindigkeit von ca. 150 mm/s

Abb. 19 illustriert die Eignung des entwickelten servoelektrischen Linear-Direktantriebs für Prüfungen im virtuellen Fahrzeug (Model-in-the-Loop, Driver-in-the-Loop). Hierbei wird die Ist-Position der Zahnstange gemessen und als Eingangsgröße für ein Echtzeitmodell genutzt, das auf Basis der aktuellen Position eine Sollkraft für den Zahnstangenaktuator berechnet. In Abb. 19 ist die gemessene Übertragungsfunktion von der Sollkraft (Modellausgang) zur tatsächlich gestellten Kraft dargestellt. Mit einer maximalen Phasenabweichung von weniger als zwei Grad bei 3 Hz verhält sich der Aktor im für die Anwendung relevanten Frequenzbereich wie das Echtzeitmodell.

Hochperformante elektrische Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität

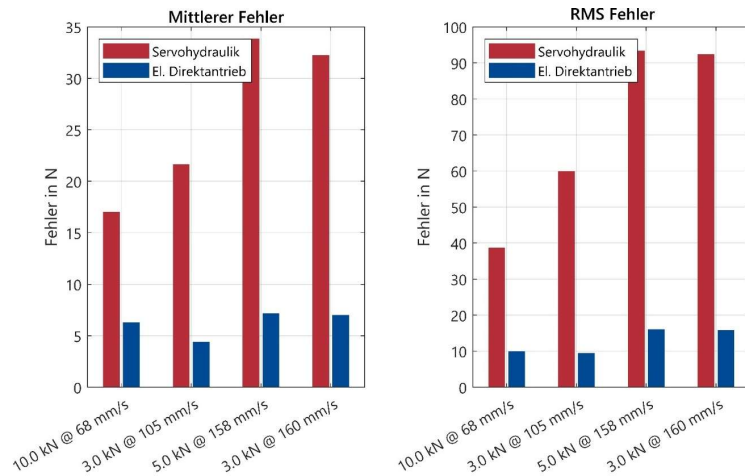


Abb. 18: Vergleich zwischen Servohydraulik und Direktantrieb für unterschiedliche Störungen

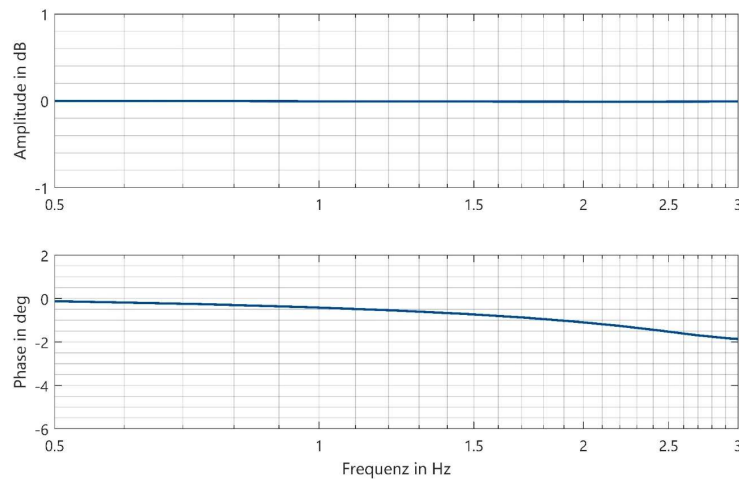


Abb. 19: Gemessene Übertragungsfunktion von der Soll-Kraft (Modellausgang) zur Ist-Kraft

5. Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass der servoelektrische Linear-Direktantrieb ein sehr breites Einsatzspektrum mit einem einzigen Aktorsystem abdecken kann. Positionssollwerte mit sehr kleinen Amplituden im Mikrometerbereich werden ebenso präzise nachgefahren wie Signale mit Amplituden von mehreren hundert Millimetern. Durch die vollständige Kompensation der Rastkräfte wird zudem eine sehr hohe Gleichlaufgüte auch bei kleinen Geschwindigkeiten erreicht. In Kombination mit der hohen Dynamik werden damit Zielkonflikte klassischer Aktorkonzepte aufgelöst. Aufgrund ihrer hohen Dynamik sind elektrische Linear-Direktantriebe insbesondere dann die bevorzugte Lösung, wenn Kräfte in bewegte Prüflinge einzuleiten oder bewegte Systeme mit konstanten Kräften zu belasten sind.

Der Einsatz elektrischer Linear-Direktantriebe erweitert das Anwendungsspektrum von Prüfsystemen, erhöht deren Auslastung und verbessert die langfristige Investitionssicherheit. Für Anlagenbetreiber ergeben sich insbesondere Vorteile wie hohe Präzision und Performance, gesteigerte Flexibilität, deutlich reduzierter Energieverbrauch sowie geringere Betriebskosten [8]. Zudem bieten sie Zukunftssicherheit durch die vereinfachte Erfüllung steigender Sicherheits- und Umwelanforderungen.

Einsatzgebiete finden sich überall dort, wo lineare Bewegungen und/oder Kräfte mit hoher Genauigkeit und Dynamik erforderlich sind. In der Prüftechnik zählen hierzu unter anderem Hochleistungslenkungsprüfstände, Funktionsprüfstände für aktive Fahrdynamiksysteme, hochdynamische Komponentenprüfstände sowie Dämpfer-, NVH- und Vibrationsprüfstände für elektrische Direktantriebe.

Literatur

- [1] Keil, A.; Böhm, L.; Zeitler, M.; Jungblut, T.: Einsatz hochperformanter elektrischer Linear-Direktantriebe für Prüfaufgaben mit höchsten Anforderungen an Präzision, Dynamik und Flexibilität. 22. Konferenz für Angewandte Automatisierung (AALE2026), Rosenheim, 2026.
- [2] Kraus, M.: Fahrwerksysteme – Schaeffler kann mehr als Lager. In: Schaeffler Kolloquium 2010, https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/de/news_medien/mediathek/downloadcenter-detail-page.jsp?id=3378395, 07.01.2021
- [3] Jungblut, T.; Böhm, L.; Winter, M.; Rödling, S.: Entwicklung von Funktionsprüfständen für aktive Fahrdynamiksysteme: Herausforderungen und Lösungen. 1. Fachtagung für Prüfstandsbau und Prüfstandsbetrieb (TestRig), S. 97ff, 2022
- [4] Kuo, S. M.; Morgan, D.: Active noise control systems: Algorithms and DSP implementation. John Wiley & Sons, New York, 1995
- [5] Preumont, A.: Vibration control of active structures: An introduction, Springer, Berlin, 2010
- [6] Lunze, J.: Regelungstechnik. Springer, Berlin, 2016
- [7] Böhm, L.; Keil, A.; Jungblut, T.: Modellbasierte Auslegung von Funktionsprüfständen mit elektrischen Direktantrieben. Prüfmethodik für Betriebsfestigkeitsversuche in der Fahrzeugindustrie. DVM, Sindelfingen, 2022
- [8] <https://www.iabg.de/kontakt/formularseite-gated-content?docUid=11577&cHash=5784201fe9fc0875ab72b2c2610efc4> (15.01.2026)

Kleinste Schwingungen sichtbar machen – Schwingungen verstehen durch Sehen

Kai Thiebes

VIMS GmbH, Grüenthaler Str. 89, 52072 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Im modernen Prüfstandsbaubereich spielen Systemeigenschaften und Systemgrenzen eine zentrale Rolle für die Qualität und Zuverlässigkeit der Messergebnisse. Während Zahlen und Daten von Werkzeugen wie Beschleunigungssensoren, Dehnungsmessstreifen und Modellierungssoftware sehr präzise sind, liegen die Herausforderungen in der korrekten Interpretation, Analyse und dem Vorbereitungsaufwand. Die Motion Amplification (MA) Technologie von RDI Technologies stellt eine innovative Methode dar, um kleinste Bewegungen sichtbar zu machen und quantitativ zu bewerten. Durch eine berührungslose optische Erfassung können Eigenfrequenzen, Resonanzen oder Bewegungsformen identifiziert werden, ohne den Messaufbau zu verändern. Diese Eigenschaft eröffnet neue Möglichkeiten, dynamische Systeme effizient zu validieren und die mechanische Integrität von Prüfständen direkt zu visualisieren. Videos, anstelle von reinen Messdaten, zeigen wie sich Bauteile, Fundamente und Prüflinge verhalten. Kleinste, für das menschliche Auge unsichtbare Bewegungen werden in Videos stark überhöht und gleichzeitig messtechnisch erfasst. Die Technologie verbindet dazu Hochgeschwindigkeitskameras mit spezieller Bildverarbeitungssoftware, die jedes Bildpixel wie einen Wegsensor behandelt. Das macht die Messtechnik als interdisziplinäres Kommunikationsmittel auf allen Ebenen zu einem interessanten Analysewerkzeug.

Was ist Motion Amplification

Physikalisch basiert das Verfahren darauf, dass sich jede mechanische Schwingung als zeitlich veränderliche Ortsänderung erfassen lässt, also als Durchbiegung, Verschiebung oder Torsion von Bauteilen. Während klassische Sensorik (z.B. Beschleunigungsaufnehmer) nur einzelne Punkte messen, erfasst die Kamera ein gesamtes Sichtfeld und erzeugt so Millionen simultaner Messpunkte, die in Form von Pixeln codiert werden können. Aus den Helligkeits- und Positionsänderungen der Pixel zwischen den einzelnen Videoframes berechnet die Software für jeden Punkt der Struktur ein zweidimensionales Verschiebungssignal in x- und y-Richtung und erhält damit orts aufgelöste Weg-Zeit-Verläufe.

Die Signalverarbeitung lässt sich vereinfacht in die Schritte Vorverarbeitung, Stabilisierung und Bewegungsmessung auf Subpixel-Ebene, spektrale Analyse und Filterung sowie skalierte Rückprojektion in das Videobild gliedern. In der Vorverarbeitung werden die Rohbilder geometrisch und photometrisch stabilisiert, um Kamerabewegung, Helligkeitsschwankungen und Rauschen zu minimieren, sodass die verbleibenden Pixeländerungen möglichst ausschließlich auf Strukturbewegung zurückzuführen sind. Hierzu kommen digitale Bildstabilisierungsverfahren zum Einsatz, die globale Bildbewegungen herausrechnen, hochfrequentes Rauschen filtern und den Bildkontrast optimieren, damit Kanten und Texturen als Referenz für das Tracking der Pixelverschiebungen besser ausgewertet werden können.

Die eigentliche Bewegungsmessung beruht darauf, jedes Pixel bzw. kleine Pixelblöcke in aufeinanderfolgenden Frames als Sensor zu behandeln und ihre Verschiebung im Zeitverlauf zu bestimmen. Hierfür werden korrelations- oder gradientenbasierte Verfahren ähnlich optischem Fluss genutzt, die kleinste Bewegungen zwischen zwei Bildern erfassen; mittels Subpixel-Interpolationsmethoden können Verschiebungen erkannt werden, die deutlich kleiner als ein Bildpixel sind. Das Ergebnis ist ein zweidimensionales Weg-Zeit-Signal in Bildkoordinaten für jeden Bildpunkt, das wie ein klassisches Schwingungssignal weiterverarbeitet werden kann.

Auf diese Weg-Zeit-Signale wird anschließend eine spektrale Analyse, typischerweise mittels Fourier-Transformation, angewendet, um die dominanten Frequenzen, Ordnungen und Moden im Bewegungsverhalten zu identifizieren. Die Software bietet dazu automatische Peak-Erkennung und Hauptfrequenzfilter, die Frequenzbänder mit hoher Aktivität vorschlagen, sowie die Möglichkeit, Bandpass- oder schmalbandige Filter auf einen oder mehrere ausgewählte Frequenzbereiche anzuwenden. Zusätzlich werden Phaseninformationen berechnet und in Phase-Maps über das Bild gelegt, um relative Phasenlagen von Bauteilen bei bestimmten Frequenzen sichtbar zu machen und modale Formen oder Kopplungen erkennen zu können.

Die Stärke der Motion Amplification Logik liegt in der skalierenden Manipulation dieser gefilterten Wegsignale: Für jedes Pixel oder jede definierte Region of Interest wird die gefilterte Verschiebung mit einem

Verstärkungsfaktor multipliziert, der die gewünschte visuelle Vergrößerung der Bewegung bestimmt. Die so verstärkte, frequenzselektiv gefilterte Verschiebung wird bei der Rückprojektion verwendet, indem die Bildinhalte virtuell verschoben oder pixelweise neu positioniert werden, sodass Mikrometerbewegungen im verstärkten Video als deutlich sichtbare Millimeter- oder Zentimeterbewegungen erscheinen, ohne die zeitliche Struktur oder Phase zu verfälschen. Wichtig ist, dass diese Verstärkung ausschließlich in der Darstellung stattfindet: Die zugrunde liegenden Messdaten bleiben skaliert nachvollziehbar, sodass aus den Videos sowohl quantitative Auswertungen (z.B. Weg-Zeit-Signale, Spektren, Orbits, Modenformen) als auch reine Visualisierungen gewonnen werden können.

Erweiterte Algorithmen ergänzen diese Kernkette um spezielle Modi für transiente Ereignisse, bei denen kurzzeitige Bewegungen mit angepassten Filtern und Pfadfunktionen analysiert werden, um nichtperiodische oder stoßartige Vorgänge sichtbar zu machen. Funktionen wie Motion Map und Spectrum Plot berechnen für jedes Pixel frequenzspezifische Amplituden, stellen diese farbcodiert im Bild dar und erlauben so, Schwingungsenergie räumlich und frequenzabhängig zu verorten, bevor eine gezielte Verstärkung der interessanten Frequenzen erfolgt.

Die Softwareplattform von RDI erweitert dies um Werkzeuge zur Messpunktdefinition, zur Pfaddarstellung, zur Trennung transienter und stationärer Bewegungsanteile sowie zur Erzeugung klassischer Schwingungsdiagramme. Damit wird das Kamerasystem zu einem flächendeckenden, nicht invasiven Schwingungsmesssystem, das sowohl für punktuelle Fehlersuche als auch für kontinuierliche Zustandsüberwachung eingesetzt werden kann und insbesondere dort Vorteile bietet, wo konventionelle Sensorplatzierung schwierig, gefährlich oder wirtschaftlich aufwendig wäre.

Für die Bewegungsverstärkung benötigt das System keine CAD-Modelle oder sonstige Einrichtung. Es ist auch möglich, die Bewegungsverstärkung live Anzeigen zu lassen.

Die Frequenzauflösung ist abhängig von der Abtastrate (Shutterfrequenz) und der Aufnahmezeit (Linienzahl). Der Abstand zum Messobjekt spielt für die Bewegungsverstärkung keine Rolle, hat aber im Zusammenspiel mit der gewählten Brennweite einen Einfluss auf die Amplitudenauflösung. Mit einem 50 mm Objektiv beträgt die Amplitudengenauigkeit 0,25 µm bei 1 m Distanz zum Messpunkt.

Die Amplitudenauflösung berechnet sich wie folgt:

$$R_{\mu} = \frac{D}{F} * 12,5 \frac{\mu m * mm}{m}$$

R_{μ} = Amplitudenauflösung in µm

D = Abstand zwischen Bildsensor und Messobjekt in Meter (m)

F = Brennweite des Objektivs in Millimeter (mm)

Das System besteht aus den in Abbildung 1 gezeigten Komponenten.

Kleinste Schwingungen sichtbar machen – Schwingungen verstehen durch Sehen



Abb. 1: Übersicht der Komponenten des Messsystems

Alle Filterungen oder Analysedaten werden als neue Kopie gespeichert. Auf diese Weise bleiben die Originalaufnahmen stets unverändert verfügbar. Da die Messtechnik im Rohformat lediglich ein Video speichert sind alle Definitionen wie Abstände und die zu messenden Punkte im Nachhinein definierbar. Dadurch lassen sich Messzeiten am Prüfling auf ein Minimum reduzieren und Messpunkte lassen sich auch nachträglich, ohne neuen Messaufwand festlegen.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einen Messaufbau an einem Pumpenprüfstand und die Sicht aus der Kameraperspektive. Abbildung 3 zeigt das Zeitsignal eines Messpunkts aus diesem Aufbau. In dieser Messung wurde auf Basis der gefundenen Amplitudenmodulation und erweiterter Analyse ein gebrochener Motorstab identifiziert.



Abb. 2: Messaufbau Pumpenprüfstand

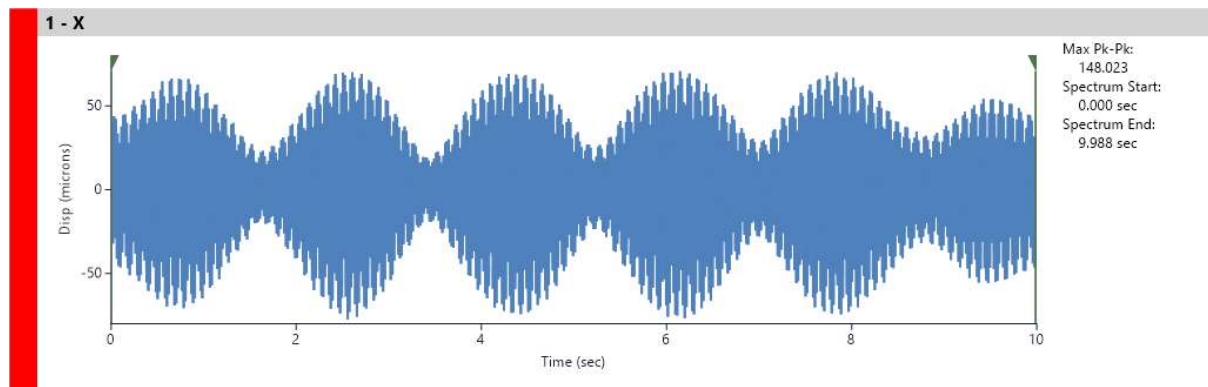


Abb. 3: Zeitsignal in X-Richtung - roter ROI

Motion Amplification vs. Laser Vibrometrie

Motion Amplification und Laser-Vibrometer sind sehr ähnlich und dennoch unterscheiden sie sich grundlegend in ihrem Messansatz, ihrer räumlichen Abdeckung und ihrer praktischen Anwendbarkeit bei der Schwingungsanalyse.

Laservibrometer messen die Vibrationsgeschwindigkeit oder den Weg an einem einzelnen Punkt mittels Dopplereffekt, indem ein Laserstrahl auf die Oberfläche gerichtet und die frequenzverschobene Rückstreuung analysiert wird; sie bieten hohe Bandbreiten bis kHz-Bereich und sub-mikrometeregenaue Auflösung, sind aber meistens auf eine Punktmessung beschränkt. Die Messung findet in Z-Richtung zum Laser statt. Motion Amplification hingegen trackt jedes Bildpixel als Wegsensor, und erzeugt Millionen simultaner Datenpunkte über das gesamte Sichtfeld, was flächenhafte Modenformen, Phasenverläufe und Kopplungen visualisiert, jedoch typischerweise auf Frequenzen unter 4 kHz beschränkt ist. Die Messung findet in X-Y-Richtung zur Bildebene statt.

Beide Verfahren sind berührungslos, Laservibrometer sind extrem präzise aber erfordern eine akkurate Ausrichtung und freie Sichtlinie zum Messpunkt, was bei komplexen Strukturen oder großen Objekten zeitaufwendig ist und unter Umständen Scanning-Modelle für Multi-Point-Messungen benötigt. Motion Amplification erfasst in einer Aufnahme das gesamte Sichtfeld ohne Ausrichtung pro Punkt, dadurch ist das Setup eines MA Systems oft in wenigen Minuten eingerichtet.

Frequenzselektive Verstärkung

Die frequenzselektive Bewegungsverstärkung ermöglicht es spezifische Schwingungsfrequenzen oder Frequenzbänder isoliert zu verstärken und darzustellen, während andere Bewegungsanteile unterdrückt werden.

Dieser Ansatz basiert auf einer Fourier-Transformation der pixelweisen Weg-Zeit-Signale, gefolgt von Bandpass-Filtern, die nur ausgewählte Frequenzen (z. B. Eigenfrequenzen, Harmonische oder Ordnungen) hervorheben, wodurch dominante Modenformen, Phasenbeziehungen und Energieverteilungen klar erkennbar werden. Im Gegensatz zu einer globalen Verstärkung ohne Filterung vermeidet die frequenzselektive Methode die Überlagerung und Verschleierung durch irrelevante Schwingungsanteile, sodass Ursachen wie Resonanz, Fehlansrichtung oder Kopplungen präzise lokalisiert und quantifiziert werden können.

Praktisch erlaubt dies eine intuitive Fehlersuche: beispielsweise wird die 1x-Laufgeschwindigkeit eines Systems im Bandpass gefiltert und das Video zeigt ausschließlich die Schwingungen bei dieser Frequenz verstärkt. Dadurch sinken Diagnosezeiten erheblich, da abstrakte Schwingungsmuster visuell validiert werden.

Diese Methode eignet sich hervorragend zur Kommunikation mit Entscheidungsträgern oder fachfremden Personen, da sie komplexe Dynamiken ohne zusätzliche Diagramme greifbar macht. Zudem bleiben die ursprünglichen Messdaten unverändert exportierbar, sodass die Amplifikation rein darstellend wirkt und quantitative Analysen ergänzt.

Abbildung 4 zeigt einen Schwingungsprüfstand mit eingespanntem Prüfling. Die Sinusanregung findet bei 50Hz statt. Im linken Screenshot ist das Ausgangsvideo im Bandpass auf 50Hz gefiltert, es werden nur noch die Bewegungsformen bei 50Hz visualisiert. Die Vektoren zeigen Richtung und Amplitude der Messwerte auf dem entsprechenden ROI. Im rechten Screenshot ist das gleiche Ausgangsvideo auf einen Bandpass bei 80Hz

gefiltert. Im Screenshot ist bereits an den Vektoren zu erkennen, dass der Prüfstand, im gleichen Moment bei 50Hz und 80Hz, unterschiedliche Bewegungsformen aufweist.

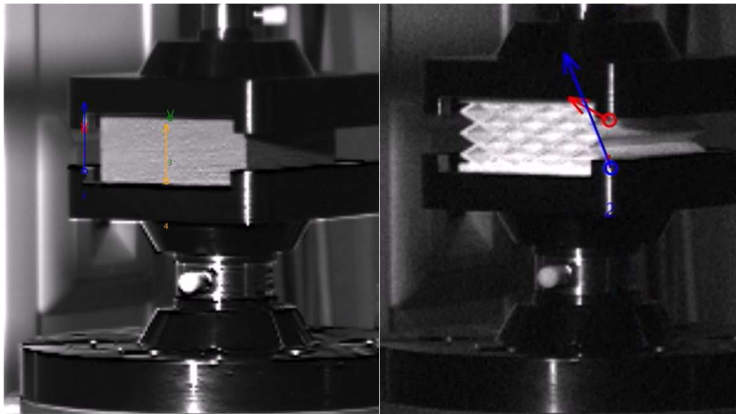


Abb. 4: links Filter: 50Hz, rechts Filter 80Hz

Optische Modalanalyse

Motion Amplification führt Modalanalyse durch, indem sie die klassische Methode der Übertragungsfunktionen (FRF-Frequency Response Function) mit kamerabasierten, pixelweisen Schwingungssensoren ersetzt und somit Operating Deflection Shapes (ODS) sowie Eigenmoden berührungslos erfasst. Der Hauptvorteil liegt in der enormen Skalierbarkeit: Statt zeitaufwendiger Sensorroving mit dutzenden Beschleunigungssensoren (Montage, Kabel, Ausgleich) erfasst Modal Amplified hunderte virtuelle „Sensoren“ in Minuten ohne physischen Kontakt, was Setup-Zeit um Faktor 10–50 reduziert. Die sofortige Visualisierung als verstärktes Video validiert Moden intuitiv vor Ort, minimiert Interpretationsfehler und erleichtert die Kommunikation mit Nicht-Experten, während quantitative Exporte (FRF, Modalparameter) klassische Analysen ergänzen. Besonders vorteilhaft bei großen, komplexen oder zerbrechlichen Strukturen wie Rotoren, Rahmen oder Prototypen, wo Sensorik invasiv oder unpraktisch wäre.

In Abbildung 5 ist auf der linken Seite das Kamerabild eines Shakerprüfstands zu sehen. Die Hilfskonstruktion aus Rahmenprofilen wird mit einem Modalhammer angeregt. Auf der rechten Seite ist die Frequenzantwort oben als Spektrum und unten als Zeitsignal aufgetragen. Wird das Video abgespielt, kann die Bewegungsform angesehen werden. Der grüne Marker im Zeitverlauf markiert die Position im Geschehen. Die Vektoren auf der Rahmenkonstruktion visualisieren in Echtzeit die Amplitude und die Bewegungsrichtung.

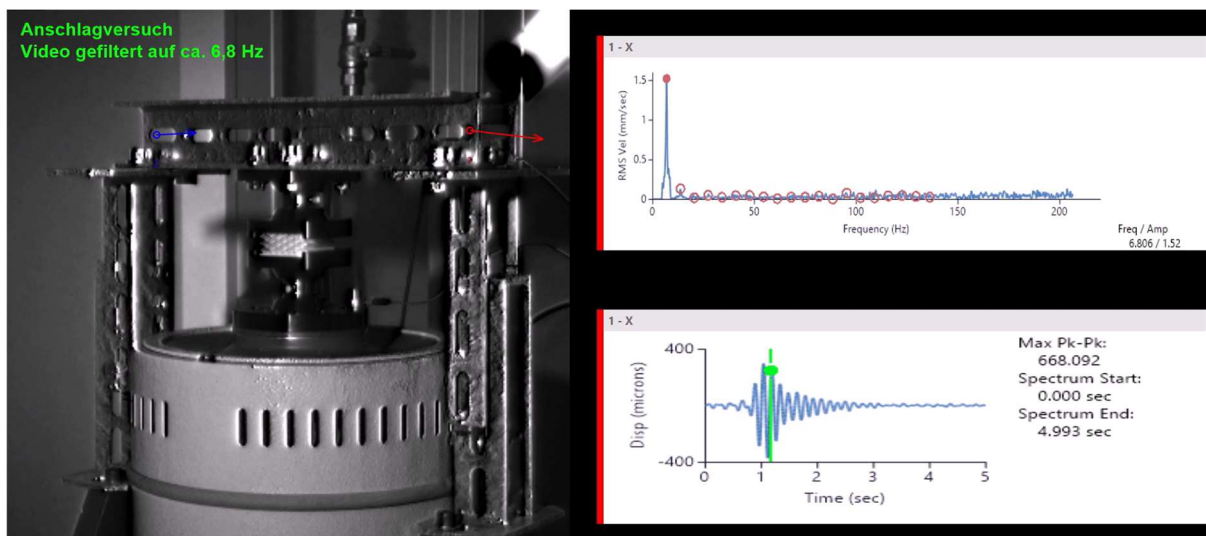


Abb. 5: FRF einer Hilfskonstruktion am Shakerprüfstand

Motion Amplification in der Prüfstandumgebung

Mittels der optischen Messtechnik lassen sich globale Schwingungen, Verformungen, Bewegungspfade und Modenformen von Prototypen, Komponenten oder umfangreicher Testsetups visualisieren. Bei der Konstruktion von Prüfständen für Rotoren, Rahmen oder Komponenten ermöglicht die Technologie eine schnelle Erfassung von Eigenmoden und beschleunigt die Identifikation kritischer Frequenzen und Steifigkeitsmängel ohne umfangreiches Sensorroving.

Dabei lässt sich die Motion Amplification nahtlos mit konventionellen Sensoren wie Beschleunigungsaufnehmern, Wirbelstromsensoren oder Impulshammern im Prüfstand integrieren, indem die Kameradaten parallel zu den Sensordaten aufgezeichnet werden oder die Kamera als schnelle und wirtschaftliche Ersteinschätzung die Sensormontage fundiert unterstützt.

Neben der Stärke als Messmittel wirkt das Motion Amplification System als Kommunikationsmittel. Die Kommunikation und Diskussion über Videos erleichtert häufig auch interdisziplinären Teams den Einstieg in die komplexen dynamischen Vorgänge eines Prüffelds.

Abbildung 6 zeigt einen Ventilator im Prüffeld. Jeder ROI kann mit Beschriftung und Messdaten ausgegeben werden. Die Vektoren helfen bei der Interpretation und sind auch für unerfahrene Betrachter hilfreich.

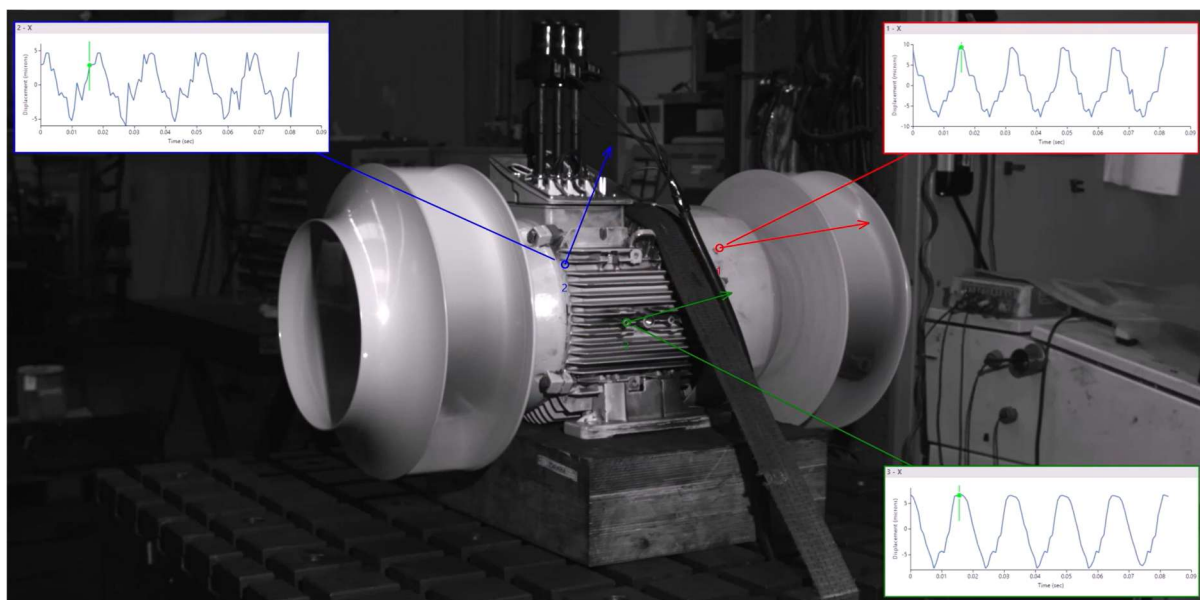


Abb. 6: Ventilator im Prüffeld

Abbildung 7 zeigt den gleichen Ventilator im Prüffeld. Bei dieser Aufnahme ist die Shutterfrequenz der Kamera mit der Drehzahl des Ventilators synchronisiert (Stroboskopeffekt). Dadurch wird es möglich auch rotierende Bauteile quasistatisch darzustellen. In diesem Beispiel liegt der rote ROI auf dem rotierenden Lüfterrad. Der rechts abgebildete Orbit zeigt eine vertikale Bewegung um etwa $100\mu\text{m}$, welche die Rotation als Rotationsschwingung im laufenden Betrieb überlagert. Der horizontale Anteil des Orbits ist in dieser Aufnahme aufgrund des Winkelfehlers (Kamera misst planar) nicht zu berücksichtigen. Für eine Absolutmessung ist es aus diesem Grund nötig die Kamera planar zum Messpunkt aufzustellen. Bei Abspielen des Videos lassen sich relevante und nicht relevante Bewegungsanteile leicht erkennen, die absoluten Amplituden spielen aus diesem Grund häufig eine nur nachgelagerte Rolle. Das Verständnis der Bewegungsform, das Vorhandensein und die Diskussion stehen im Fokus.

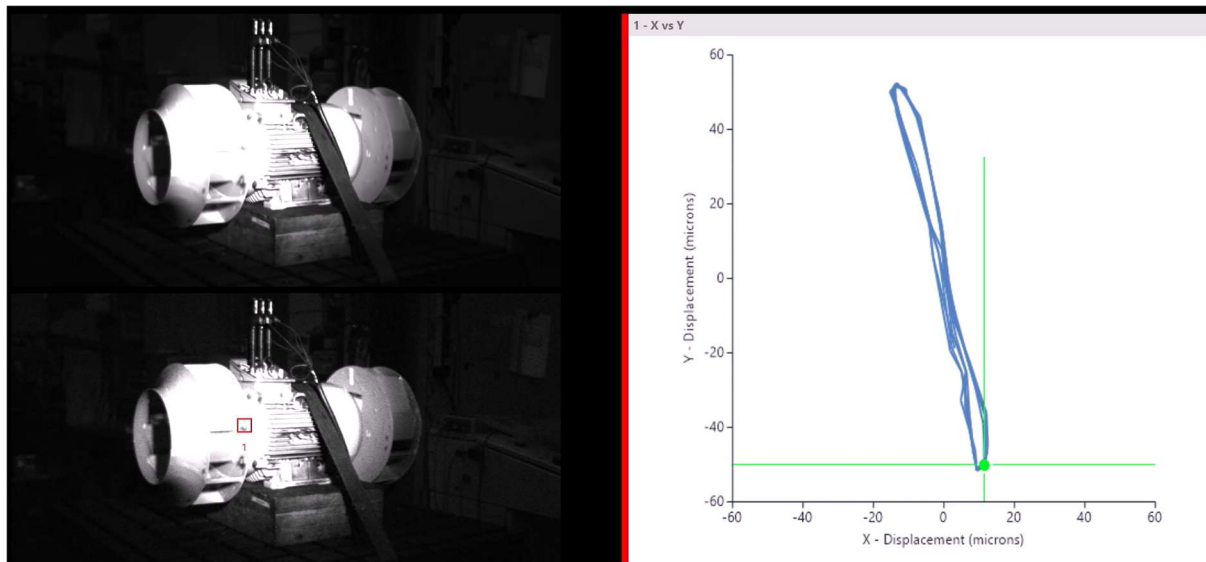


Abb. 7: Ventilator im Prüffeld - getriggerte Aufnahme

Ausblick

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Motion Amplification das Potential hat, die Schwingungsanalyse im modernen Prüfstandsbau zu revolutionieren, indem sie kleinste, für das Auge unsichtbare Bewegungen berührungslos und flächenhaft sichtbar macht. Diese nicht-invasive Methode minimiert Vorbereitungs Aufwand, beschleunigt Diagnosen und Fehlersuchen, integriert sich nahtlos in interdisziplinäre Entwicklungsprozesse und reduziert damit sowohl Zeit- als auch Kostenaufwand im gesamten Prüfzyklus.

Mit zunehmender Rechenleistung, weiter optimierten optischen Algorithmen und höheren Bildraten wird sich die Technologie in den kommenden Jahren noch stärker in Richtung Echtzeitanalyse und automatisierter Bewertung entwickeln. Perspektivisch sind Funktionen wie automatische Modalparameterbestimmung, KI-gestützte Mustererkennung, Anomaliedetektion oder die direkte Kopplung an digitale Zwillinge zu erwarten. Dadurch können nicht nur einzelne Schwingungsphänomene visualisiert, sondern komplette dynamische Systemverhalten kontinuierlich überwacht und bewertet werden.

Begriffe wie Motion Amplification und Modal Amplified sind geschützte Markenbezeichnungen. Zur besseren Lesbarkeit wurde in diesem Artikel auf den Markenzusatz verzichtet.

Modernisierung eines Rotationstribometers für Forschung und Lehre

Hagen Bankwitz, Markus Ballmann, Pascal Winkler

Hochschule Mittweida, Fakultät INW, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Deutschland

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt die Modernisierung eines Rotationstribometers durch den Austausch von Aktuator und Sensorik. Aus Kosten- und Flexibilitätsgründen wurde hierfür der Antrieb auf einen CANopen-fähigen Schrittmotor umgerüstet und die Kraftsensorik durch einen 3-Achs-Kraftaufnehmer mit Auswertung durch einen Mikrocontroller und HX711-Wägeverstärker-Boards ersetzt. Dadurch ist es möglich, das Tribometer ohne die ursprüngliche Elektronik und die nicht mehr vorhandene Steuerungssoftware im Rahmen von Forschung und Lehre weiter zu verwenden.

1. Einleitung

Mechanische Prüfstände und Testeinrichtungen wie Zugprüfmaschinen oder Tribometer zählen zu den technisch komplexen und investitionsintensiven Anlagen in Forschung und Industrie. Daher werden solche Systeme in der Praxis häufig über sehr lange Zeiträume eingesetzt und stellen typische „Legacy-Systeme“ dar. Wissenschaftliche Übersichtsarbeiten zum digitalen Retrofit zeigen, dass der Ersatz dieser Anlagen meist nicht aufgrund mechanischer Abnutzung erfolgt, sondern vor allem durch veraltete Steuerungen, Messhardware und Software oder fehlende Ersatzteile für proprietäre Komponenten [1], [2]. Während elektronische Baugruppen und Steuerungssysteme oft bereits nach zehn bis fünfzehn Jahren nicht mehr unterstützt werden, bleiben die mechanischen Kernkomponenten in vielen Fällen weiterhin funktionsfähig und ausreichend genau.

Vor diesem Hintergrund wird Retrofitting, also der gezielte Austausch veralteter oder defekter Komponenten bei Erhalt der mechanischen Struktur, in der Literatur als wirtschaftlich und technisch sinnvolle Alternative zur vollständigen Neuanschaffung beschrieben. Mehrere Studien betonen, dass sich durch Retrofitting sowohl die Investitionskosten als auch der Ressourcenverbrauch erheblich reduzieren lassen und gleichzeitig moderne Sensorik, Regelungstechnik und digitale Schnittstellen integriert werden können [2], [3]. Neben kommerziellen Retrofit-Lösungen, die in der Regel mit höheren Kosten verbunden sind, werden in der jüngeren Forschung auch Open-Source-basierte Steuerungs- und Messsysteme diskutiert. Insbesondere für Labor- und Forschungsanwendungen konnten solche Ansätze, etwa bei tribologischen Prüfständen, eine ausreichende Messgenauigkeit bei deutlich geringeren Kosten und hoher Anpassungsfähigkeit demonstrieren. Somit stellt Retrofitting – sowohl in der Industrie als auch Open-Source-basiert – eine praktikable Strategie dar, um die Lebensdauer teurer Prüfstände zu verlängern und ihre Funktionalität an aktuelle Anforderungen anzupassen.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, aufzuzeigen, wie sich ein bestehendes Rotationstribometer im Hochschulbereich durch den Austausch von Motor, Sensorik und Software an moderne Anforderungen anpassen lässt, um dessen Nutzbarkeit sicherzustellen.

2. Prüfstandsbeschreibung und Methodik

In diesem Kapitel wird der bestehende Rotationstribometer detailliert beschrieben, um eine Ausgangsbasis für das Retrofit zu schaffen. Dabei werden die mechanischen Kernkomponenten, wie beispielsweise Rahmen, Lagerungen und Antriebe, sowie die bestehende Sensorik und Steuerungstechnik betrachtet. Anschließend wird die Methodik der Modernisierung erläutert. Diese umfasst den Austausch von Motor, Sensorik und Software, die Integration moderner Mess- und Steuerungstechnik sowie die Anpassung der Schnittstellen an aktuelle digitale Anforderungen. Abschließend wird beschrieben, wie die Leistungsfähigkeit und Messgenauigkeit des modernisierten Systems überprüft werden, um die erfolgreiche Umsetzung des Retrofittings sicherzustellen.

2.1. Rotationstribometer

Der Rotationstribometer findet Anwendung bei der systematischen Untersuchung der tribologischen Eigenschaften von Werkstoffen. Der Fokus der Untersuchung liegt insbesondere auf dem Gleitreibungskoeffizienten und der Verschleißrate unter kontrollierten Prüfbedingungen. Das sogenannte Stift-Scheibe-Verfahren nach DIN ISO 7148-2 [5] findet dabei Anwendung, siehe Abb. 1a. Im Rahmen dieses Verfahrens wird ein zylindrischer Prüfstift, der über

Der Beitrag wurde in einem doppelt anonymisierten Peer-Review-Verfahren begutachtet und angenommen.

eine definierte Oberflächenbeschaffenheit verfügt, gegen die Oberfläche einer rotierenden Scheibe gepresst. Die Relativbewegung zwischen Stift und Scheibe führt zu einem kontinuierlichen Gleitkontakt, in dem sowohl die Reibungskräfte als auch der Materialabtrag gemessen werden können.

Der Prüfstand gestattet die Variation signifikanter Parameter wie Normalkraft, Drehzahl, Kontaktmaterialien und Schmierbedingungen, wodurch unterschiedliche tribologische Belastungsszenarien realitätsgetreu rekonstruiert werden können. Die Messung der Reibungskraft erfolgt direkt über Kraftsensoren, während die Verschleißrate durch die quantitative Bestimmung der Abnutzung am Stift oder an der Scheibe ermittelt wird. Die Kombination dieser Messgrößen erlaubt sowohl statistische Aussagen über den Gleitreibungskoeffizienten als auch vergleichende Analysen des Materialverschleißes.

Die Resultate solcher Untersuchungen sind insbesondere für die Materialauswahl, die Oberflächenbehandlung und die Entwicklung verschleißbarer Systeme von Relevanz. Der Tribometer findet im Hochschulbereich Anwendung in der Lehre und in studentischen Experimenten sowie in Forschungsprojekten.

Grundaufbau und technische Daten:

Der Prüfstand besteht aus einer rotierenden Scheibe sowie einem Prüfstift mit definierter Material- und Oberflächenbeschaffenheit, der auf die Scheibe gepresst wird (vgl. Abb. 1b). Die Belastung des Stifts erfolgt über eine Belastungswippe, auf die Gewichte aufgelegt werden, um eine definierte Normalkraft zu erzeugen. Die Rotationsbewegung der Scheibe wird durch einen Motor induziert, dessen Drehmoment als Messgröße für die resultierende Reibkraft dient.

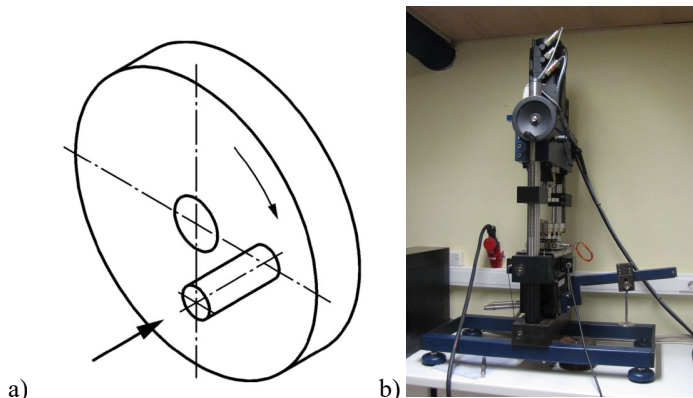


Abb. 1: a) Messprinzip Stift-Scheibe [5], b) Prinzipieller Aufbau des Rotationstribometers [6]

Messung der Reibkraft:

Die Messung der Reibkraft erfolgt unmittelbar über einen im Motor integrierten Drehmomentsensor. Die Berechnung der tangentialen Kraft (Reibkraft) am Kontaktpunkt zwischen Stift und Scheibe erfolgt auf Basis der bekannten Hebelverhältnisse der Prüfkonfiguration.

Messung der Normalkraft:

Eine direkte Messung der Kraft am Prüfstift ist derzeit nicht möglich. In diesem Fall erfolgt die Berechnung der Normalkraft auf indirektem Wege. Die zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten werden durch die Gewichtskraft der auf die Belastungswippe aufgelegten Massen in Verbindung mit den Hebelverhältnissen der Wippe bestimmt. Demnach besteht die Möglichkeit, die auf den Stift einwirkende Normalkraft zu ermitteln, auch ohne die Installation einer direkten Sensorik.

2.2. Modernisierung

Im Zuge der Modernisierung des Rotationstribometers wurden, die veralteten oder defekten Komponenten durch moderne Baugruppen und Steuerungstechnik ersetzt. Das Ziel der Modernisierung bestand in der Erhaltung der Funktionalität des Prüfstands bei gleichzeitiger Verbesserung des Bedienkomforts sowie der Integration in digitale Systeme bei möglichst geringen Kosten.

Defekte bzw. zu modernisierende Komponenten:

- Der ursprüngliche Motor des Antriebsaggregats war defekt. Ein aktueller Motor mit integrierter Steuerung ermöglicht eine präzise Regelung der Drehzahl sowie eine zuverlässige Messung des Drehmoments.
- Die Messung der Kraft erfolgte ausschließlich über den Drehmomentsensor des Motors, wobei eine direkte Messung der Reibkraft nicht vorgesehen war. Die Implementierung einer modularen Kraftmesseinrichtung zielt darauf ab, die Messgenauigkeit und Flexibilität zu erhöhen, indem sowohl die Reib- als auch die Normalkraft direkt erfasst werden kann.
- Die vorhandene Auswerteelektronik zur Kraftmessung entsprach nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. So waren beispielsweise moderne Schnittstellen nicht unterstützt. Der Einsatz einer digitalen Auswerteelektronik erlaubt die simultane Erfassung, Verarbeitung und Speicherung der Messdaten in Echtzeit und eröffnet ein Spektrum an Möglichkeiten für die weitere Verarbeitung.

Durch den gezielten Austausch dieser Komponenten wird der Prüfstand technisch auf den aktuellen Stand gebracht, ohne dass eine Ersetzung der mechanischen Kernstrukturen wie Rahmen, Führungen oder Wippe erforderlich ist. Die Modernisierung bietet zudem die Möglichkeit, moderne Softwarelösungen für Datenerfassung, Steuerung und Analyse zu integrieren. Dies resultiert in einer Erweiterung der Nutzungsmöglichkeiten im Hochschulbereich für Forschung und Lehre.

2.3 Auswahl von Motor und Steuerung

Für die Modernisierung des Rotationstribometers wurde ein Motor mit integrierter Steuerung ausgewählt, der die definierten Anforderungen erfüllt (siehe Abb. 2). Bei der Auswahl wurden mehrere Kriterien gezielt priorisiert. Der Motor bietet einen ausreichend großen Drehmomentbereich, um die maximalen Reibkräfte der geplanten Versuche abzudecken. Zudem verfügt er über einen flexibel einstellbaren Drehzahlbereich, um unterschiedliche Gleitgeschwindigkeiten zu realisieren. Von großer Bedeutung ist außerdem eine hohe Regelgenauigkeit, um sowohl die Drehzahl als auch das Drehmoment präzise steuern zu können. Ein weiteres zentrales Kriterium sind digitale Schnittstellen, da sie eine unkomplizierte Integration in die bestehende Mess- und Auswerteelektronik ermöglichen.

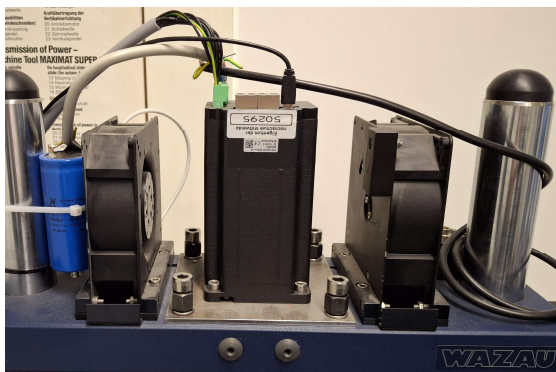


Abb. 2: Einbaulage des neuen Motors

Die Steuerungseinheit des Motors ermöglicht sowohl die manuelle Einstellung der Betriebsparameter als auch eine programmierbare Regelung über die digitale Schnittstelle. Dadurch können die Versuche reproduzierbar und automatisiert durchgeführt werden. Der neue Antriebsmotor wurde auf dem bestehenden Prüfstand installiert. Dabei wurden die vorhandenen Befestigungspunkte und die mechanische Achsführung des Tribometers genutzt, um mechanische Stabilität und eine präzise Ausrichtung zu gewährleisten. Anschließend wurde die Steuerung konfiguriert und mit der Mess- und Auswerteelektronik verbunden. Im Rahmen des Setup-Prozesses wurden Drehzahlkennlinien, Motordrehmomentbegrenzungen und Signalübertragungen überprüft, um die Zuverlässigkeit der neuen Komponenten sowie die erforderliche Genauigkeit und Stabilität der Messungen sicherzustellen.

2.4. Integration der Kraftmesseinrichtung und Auswerteelektronik

Für die Kraftmessung wurde ein 3-Achs-Kraftsensor ausgewählt, mit dem sich sowohl die Normalkraft als auch die Reibkraft direkt erfassen lassen. Bei der Auswahl wurden die angenommenen Belastungen, die geforderte Messgenauigkeit und die Kompatibilität mit der Mess- und Auswerteelektronik berücksichtigt. Durch die simultane Messung beider Kräfte wird die Abhängigkeit von Berechnungs- bzw. Einstellfehlern verringert und die Messgenauigkeit für tribologische Untersuchungen erhöht.

Modernisierung eines Rotationstribometers für Forschung und Lehre

Zur Integration des Sensors wurden spezielle mechanische Adapter und Halterungen entwickelt. Diese Komponenten gewährleisten eine korrekte Probenpositionierung und eine zuverlässige Kraftübertragung auf den Sensor. Bei der Konstruktion wurde insbesondere auf mechanische Stabilität und eine einfache Handhabung geachtet, um einen flexiblen Umbau zwischen unterschiedlichen Probenformen zu ermöglichen. Das aus Kraftsensor und Adapter bestehende System ist in Abb. 3a dargestellt.

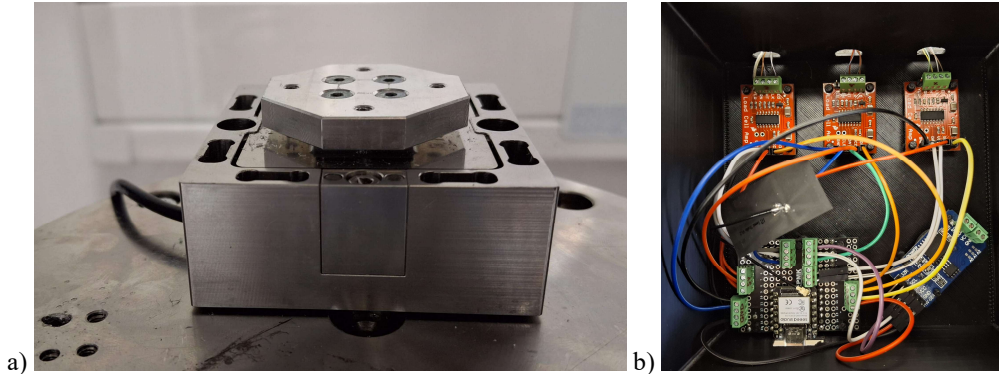


Abb. 3: a) Kraftsensor inkl. Adapter; b) Messverstärker inkl. Mikrocontroller

Die Auswerteelektronik, siehe Abb. 3b, erfasst die Signale des Kraftsensors in Echtzeit, digitalisiert sie mit hoher Auflösung und ermöglicht die direkte Integration in die Steuerungs- und Auswertesysteme des Tribometers. Die zugehörige Software unterstützt die Kalibrierung des Sensors, die Visualisierung der Messwerte, die Datenspeicherung sowie die statistische Auswertung. Die Kombination aus Sensorik, Auswerteelektronik und Software gewährleistet präzise, reproduzierbare und automatisierte tribologische Messungen durch den modernisierten Prüfstand. Dies macht ihn sowohl für den Hochschulbereich in der Forschung als auch in der Lehre optimal nutzbar.

3. Ergebnisse

Die Abbildung 4 veranschaulicht den modernisierten Prüfstand. Als Antrieb wurde ein Schrittmotor des Typs NEMA 34 der Firma Nanotec mit integrierter Steuerung eingesetzt. Die Auswahl dieses spezifischen Motortyps erfolgte unter Berücksichtigung seines hohen Drehmomentpotenzials, seiner robusten Bauweise sowie seiner exzellenten Regelbarkeit, welche für die Anforderungen des Rotationstribometers optimal sind.

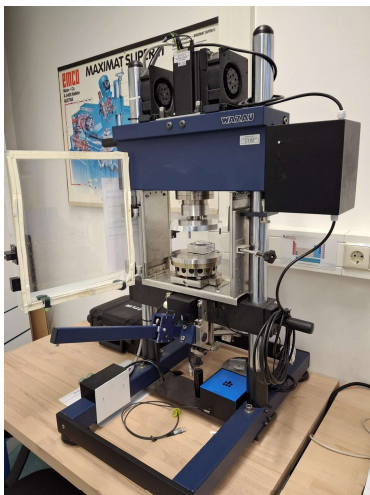


Abb. 4: modernisierter Prüfstand

Bei 1875 U/min erreicht der Motor ein Drehmoment von 0,88 Nm. Bei 75 U/min beträgt das Drehmoment hingegen 8,84 Nm und das Haltemoment 9,33 Nm. Der Antrieb eignet sich somit sowohl für drehzahl- als auch für reibkraftintensive Versuche. Zur präzisen Erfassung der Drehbewegung ist er mit einem Inkrementalgeber

Modernisierung eines Rotationstribometers für Forschung und Lehre

ausgestattet, der 1024 Impulse pro Umdrehung erfasst. Dadurch sind eine hochgenaue Drehzahlregelung und Positionsrückmeldung möglich.[7]

Der eingesetzte Schrittmotor sorgt für die präzise Rotation der Oberprobe und bildet die Grundlage für reproduzierbare tribologische Messungen. Im Schrittbetrieb wird jede Umdrehung in definierte Schritte unterteilt, wodurch eine feinstufige und ruckfreie Positions- und Drehzahlkontrolle ermöglicht wird. Über die Parametrierung lassen sich die Schrittauflösung, die Strombegrenzung, die Beschleunigungs-/Verzögerungsrampen sowie der Mikroschrittbetrieb einstellen, um einen gleichmäßigen Lauf zu gewährleisten.

Durch diese Einstellungen sind sowohl hohe Drehzahlen für dynamische Versuche als auch ein hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen für höhere Reibkräfte möglich. Mithilfe der digitalen Steuerung können über eine externe Software Drehzahl und Drehmoment programmiert werden. Dadurch können die geplanten Versuche automatisiert, reproduzierbar und genau durchgeführt werden. Der Motor erfüllt somit sämtliche Anforderungen des Versuchsprogramms in allen relevanten Betriebsbereichen.

Der ausgewählte 3-Achs-Kraftsensor von ME-Meßsysteme ermöglicht die simultane Messung von Normalkraft und tangentialer Reibkraft während des Versuchs. Er hat eine Nennkraft von jeweils 500 N in jede Richtung und gehört der Genauigkeitsklasse 0,5 an. [8]

Vor dem Einbau der Probe wurde der Kraftsensor kalibriert. Hierzu wurden Gewichte mit bekannter Masse auf die Messstelle aufgebracht, um die Kräfte in allen drei Richtungen zu ermitteln. Dabei wurde der Sensor entsprechend der jeweiligen Richtung bzw. der Gravitationswirkung gedreht. Anschließend wurden die gemessenen Signale mithilfe des Messverstärkers mit den theoretischen Kräften verglichen, um Messfehler zu korrigieren und die geforderte Genauigkeitsklasse zu erreichen.

Nach der Kalibrierung des Kraftsensors wurden die Proben in die vorgesehenen Halterungen und Adapter eingesetzt. Diese gewährleisten eine präzise Ausrichtung des Prüfstifts auf der Scheibenoberfläche sowie eine gleichmäßige Kraftübertragung auf den Sensor. Die Probenhalter ermöglichen einen schnellen Wechsel zwischen verschiedenen Probenformen und erhöhen somit die Flexibilität des Prüfstands für unterschiedliche Werkstoffkombinationen und Geometrien.

Zur Verstärkung und Digitalisierung des Messsignals wurde ein ESP32 in Kombination mit einem HX711 verwendet. Der ESP32 ist ein Mikrocontroller mit integriertem Wi-Fi- und Bluetooth-Modul. Er zeichnet sich durch eine hohe Rechenleistung, einen niedrigen Energieverbrauch und vielfältige Ein- und Ausgangsmöglichkeiten aus. Aufgrund seiner Fähigkeit, sowohl analoge als auch digitale Signale zuverlässig zu erfassen und zu verarbeiten, eignet er sich besonders für IoT-Anwendungen und die Echtzeitverarbeitung von Sensordaten. [9]

Der HX711 ist ein kostengünstiger 24-Bit-Analog-Digital-Wandler (ADC), der speziell für die Anbindung von Kraftsensoren konzipiert wurde. Er verfügt über einen integrierten, programmierbaren Verstärker (PGA), der die sehr schwachen Ausgangssignale der Kraftsensoren auf ein für die digitale Verarbeitung geeignetes Niveau verstärkt. Die digitale Datenübertragung erfolgt über eine zweidrahtige serielle Schnittstelle mit den Signalen Data und Clock. Dadurch ist eine direkte Anbindung an Mikrocontroller wie den ESP32 möglich. Das Modul arbeitet im Spannungsbereich von 2,6 bis 5,5 Volt und kann somit direkt über den ESP 32 versorgt werden. Die Abtastrate des HX711 kann zwischen zwei Einstellungen gewählt werden: 10 Samples pro Sekunde (SPS) oder 80 SPS, wobei 80 SPS die maximale Abtastfrequenz dieses ADC darstellt. Die höhere Abtastrate von 80 SPS ermöglicht die Durchführung von Messzyklen in kürzerer Zeit, während die niedrigere Rate von 10 SPS geringere Rauschanteile und somit eine höhere Genauigkeit bei langsamen Messgrößen bietet, wie sie für den Prüfstand angewendet wird. In Kombination mit dem ESP32 können die Signale des Kraftsensors präzise verstärkt, digitalisiert und in Echtzeit weiterverarbeitet werden, was eine zuverlässige Messdatenerfassung für die Anwendung gewährleistet.

Die Software des Messsystems basiert auf der Plattform Arduino und umfasst eine umfassende Funktionalität zur Messdatenerfassung und -verarbeitung. Das vorliegende System gestattet die Tarierung der Kraftsensoren sowohl separat als auch für sämtliche Sensoren in Kombination. Im Rahmen dieses Prozesses erfolgt die Speicherung der ermittelten Tarierwerte, um eine wiederholbare und präzise Messung zu gewährleisten. Darüber hinaus besteht die Option, eine Kalibrierung der Sensoren durchzuführen, entweder automatisch unter Verwendung einer bekannten Masse oder manuell durch Eingabe der Kalibrierungsdaten. Die ermittelten Kalibrierungswerte werden gespeichert und dienen der Umrechnung der Rohdaten in physikalische Größen. Die Messaufzeichnung kann flexibel durch serielle Befehle gestartet und gestoppt werden, wodurch eine anwendungsabhängige Kontrolle der Datenerfassung ermöglicht wird. Die Einstellung signifikanter Parameter wie der Messfrequenz, der Anzahl der Werte zur Mittelwertbildung sowie der Verstärkung des HX711 (64 oder 128) erfolgt über serielle Befehle. Darüber hinaus

Modernisierung eines Rotationstribometers für Forschung und Lehre

generiert die Software eine Übersicht über die aktuellen Messeinstellungen sowie die gespeicherten Tarierungs- und Kalibrierungswerte, um die Nachvollziehbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Für eine präzise zeitliche Zuordnung der Messwerte wird jeder Wert mit Datum und Uhrzeit über eine Echtzeituhr (RTC) versehen, und die Messdaten einschließlich Zeitstempel und Mittelwerten der drei Kraftsensorachsen werden kontinuierlich auf der seriellen Schnittstelle ausgegeben.

Die Steuerung des Motors erfolgt mittels der Software Nanotec Plug & Drive Studio 2, welche eine Positions-, Drehzahl- und Drehmomentsteuerung ermöglicht. Im aktuellen Entwicklungsstadium findet die Drehzahlsteuerung Anwendung, wobei die Software grundsätzlich auch die Vorgabe von Sollwerten sowie das manuelle Starten und Stoppen des Motors ermöglicht. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der freien Programmierung, beispielsweise zur Festlegung variabler Versuchsdauern, Sollwertabläufe, automatischer Versuchsstopps und des Loggens von Motordaten. Obwohl diese erweiterten Programmiermöglichkeiten bisher nicht genutzt wurden, bieten sie doch Potenzial für zukünftige Versuche.

Die Messdatenaufzeichnung erfolgt mittels der Software CoolTerm, welche dazu konzipiert wurde, sämtliche über die serielle Schnittstelle bereitgestellten Messwerte in Echtzeit zu protokollieren und in gängigen Formaten wie beispielsweise .csv oder .txt zu speichern. Dies ermöglicht eine spätere Analyse und Auswertung der Messdaten. Die Kombination aus Arduino-Software, Motorsteuerung und Datenlogging bildet folglich eine flexible und umfassende Plattform für die experimentelle Untersuchung mechanischer Größen.

Der Versuch beginnt mit der Positionierung des Kraftsensors auf dem gewünschten Reibradius, gefolgt von der sicheren Befestigung der Unter- und Oberprobe im Tribometer. Im Anschluss wird am Tribometer ein Verschleißstopp eingestellt, um sicherzustellen, dass die Probe nur bis zu einem definierten Punkt belastet wird und der Probenhalter nicht beschädigt wird. Im darauffolgenden Schritt werden Motor und Messbox des Kraftsensors mittels eines USB-Kabels mit dem Messrechner verbunden. Im darauffolgenden Schritt werden die Programme Plug & Drive Studio 2 sowie CoolTerm geöffnet. In CoolTerm erfolgt die Grundeinrichtung der Versuchseinstellungen, wobei Messfrequenz, Anzahl der Werte zur Mittelwertbildung und die Verstärkung der Kraftsensoren festgelegt werden. Gleichzeitig wird in Plug & Drive Studio 2 die gewünschte Drehzahl des Motors eingestellt.

Nach Abschluss der Grundeinrichtung erfolgt eine Tarierung der Kraftsensoren. Das Ziel dieser Maßnahme besteht in der Sicherstellung der Basiswerte für die Messung. Im Anschluss erfolgt die Messdatenaufzeichnung in CoolTerm sowie die Aktivierung der Datenspeicherung. Die angestrebte Normalkraft wird durch die Befestigung einer definierten Masse am Schlitten des Hebelarms eingestellt. Im Rahmen dieses Prozesses erfolgt eine iterative Modifikation der Position des Schlittens, bis die Kraft in CoolTerm den vorgegebenen Sollwert erreicht, bevor der Schlitten fixiert wird. Nachfolgend wird die Tribometer-Abdeckung geschlossen und der Motor gestartet, um den Versuchslauf zu initialisieren. Im Rahmen des Versuchslaufs erfolgt eine kontinuierliche Beobachtung der Probe. Bei Bedarf können zusätzlich Messungen der Temperatur mit einer Wärmebildkamera durchgeführt werden. Der Versuch wird nach der definierten Versuchsdauer oder nach Erreichen des Verschleißendes gestoppt. In diesem Fall werden sowohl der Motor als auch die Messaufzeichnung deaktiviert.

Die erfassten Messdaten stehen anschließend im Format „ms-Zeitstempel; Kraft x-Achse; Kraft y-Achse; Kraft z-Achse“ in der .csv- oder .txt-Datei zur Verfügung. Die vorliegenden Daten können einer weiteren Analyse unterzogen werden, wobei eine Glättung der Werte und die Erstellung von Diagrammen empfohlen wird, um die Kräfteverläufe während des Versuchs anschaulich darzustellen.

Für die geplanten Versuche kann grundsätzlich eine Vielzahl von Materialien eingesetzt werden, wobei der Fokus aktuell auf Trockenreibung liegt. Bisher wurden unterschiedliche Werkstoffe als Ober- und Unterproben verwendet: Als Oberproben wurden die Materialien PE-1000, AlMg3, CrMoS42 sowie Schichtholz verwendet, während die Unterproben aus GUR4120, GUR4120 mit zugesetztem Kohlenstoffanteil, PU sowie PA6-Gewebe bestanden. Die Oberproben präsentieren sich in der Regel scheibenförmig, wobei auch anders gestaltete Proben mittels speziell angefertigter Adapterstücke montiert werden können. Zur Befestigung der stiftförmigen Unterproben am Kraftsensor ist eine spezifisch angepasste Adapterplatte erforderlich, die sich beispielsweise durch 3D-Druck herstellen lässt. Dadurch sind Form und Größe frei wählbar und die Unterproben sind flexibel einsetzbar.

Die Auswahl der Versuchsparameter erfolgt unter Berücksichtigung diverser Kriterien. In der vorliegenden Untersuchung werden zum einen standardisierte Vorgaben berücksichtigt, zum anderen wird die Durchführbarkeit des Versuchs geprüft. In diesem Prozess spielen störende Eigenfrequenzen, zu hohe Kräfte bei hohen Reibzahlen sowie temperaturbedingte Einschränkungen des Materials eine signifikante Rolle. Darüber hinaus werden Parameter gezielt gewählt, um praxisrelevante Bedingungen nachzubilden, insbesondere in Bezug auf Gleitgeschwindigkeiten und Flächenpressungen, wie sie in realen Anwendungen auftreten.

4. Diskussion

In der folgenden Diskussion werden die Resultate der Modernisierung des Rotationstribometers hinsichtlich der Anforderungen aus Forschung und Lehre sowie der technischen Leistungsfähigkeit der neuen Komponenten analysiert.

Der Soll-Ist-Vergleich der Hardware zeigt, dass die wesentlichen Anforderungen an den modernisierten Prüfstand erfüllt wurden. Der gewählte Schrittmotor NEMA 34 bietet mit einem Haltemoment von 9,33 Nm und einem Drehmoment von 8,84 Nm bei niedrigen Drehzahlen (75 U/min) ausreichend Leistungsreserven für Versuche mit hohen Reibkräften. Gleichzeitig ermöglicht der integrierte Inkrementalencoder mit 1024 Impulsen pro Umdrehung eine exakte Drehzahlregelung und Positionsrückmeldung, was eine deutliche Verbesserung gegenüber dem alten, defekten Antrieb darstellt.

Die Entwicklung der Kraftsensorik stellt einen signifikanten Fortschritt in der Modernisierung dar. Die Bestimmung der Normalkraft wurde ursprünglich auf indirektem Wege über Hebelverhältnisse ermittelt. Die Integration eines 3-Achs-Kraftsensors der Genauigkeitsklasse 0,5 ermöglicht nun die simultane und unmittelbare Messung der Normal- und Reibkraft in einem Messbereich von bis zu 500 N. Die Reduktion potenzieller Berechnungsfehler sowie die Erhöhung der Messgenauigkeit für tribologische Untersuchungen stellen die wesentlichen Vorteile dieser Methode dar.

Die Kombination aus ESP32-Mikrocontroller und HX711-Wägeverstärker stellt eine kostengünstige, aber zugleich effektive Lösung zur Digitalisierung der Messsignale dar. Die hohe 24-Bit-Auflösung des HX711 in Verbindung mit einer gewählten Abtastrate von 10 SPS resultiert in einem geringen Rauschanteil, wodurch die Präzision bei der Erfassung langsamer Messgrößen am Prüfstand signifikant erhöht wird. Für hochdynamische Prozesse kann die maximale Abtastrate von 80 SPS genutzt werden, wobei hierbei ein höheres Rauschen berücksichtigt werden muss.

Die auf der Arduino-Plattform basierende Software zeichnet sich durch eine flexible Tarierung und Kalibrierung der Sensoren aus. Die Messwerte werden unmittelbar nach der Messung gespeichert, um die Reproduzierbarkeit der Messung zu gewährleisten. Die Messdaten werden im CSV-Format über CoolTerm ausgegeben, was eine unkomplizierte Weiterverarbeitung, Filterung und Analyse der Daten ermöglicht. Die vorliegende Untersuchung gelangt zu dem Schluss, dass die Kombination aus Hardware und Software eine verlässliche Grundlage für präzise, wiederholbare Messungen bildet und zugleich genügend Flexibilität für unterschiedliche Versuchsparameter bietet.

Durch Neukonstruktion von Probenhaltern und Adaptern wird ein schneller Wechsel zwischen verschiedenen Probenformen (Stiftproben) bei hoher Wiederholgenauigkeit der Probeneinspannung ermöglicht. Die Trennung von Motorsteuerung (Plug & Drive Studio 2) und Datenlogging/Visualisierung (CoolTerm) ist zwar funktional, erfordert jedoch die parallele Bedienung zweier Softwarelösungen.

Trotz der erfolgreichen Modernisierung des Prüfstands bestehen systembedingte Grenzen, die die Anwendbarkeit und Genauigkeit der Messungen beeinflussen können. Einerseits sind die Umgebungsbedingungen derzeit nur begrenzt kontrollierbar, da keine geschlossene Kammer zur Verfügung steht. Dies hat zur Folge, dass eine gezielte Regulierung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit nicht möglich ist. Temperaturmessungen müssen daher derzeit extern, beispielsweise über Wärmebildkameras, erfolgen. Andererseits erfolgt die Lastaufbringung weiterhin manuell über eine Gewichtswippe. Eine dynamisch regelbare Lasteinleitung, beispielsweise über Pneumatikzylinder, wurde bisher nicht implementiert, jedoch als zukünftige Verbesserung des Aufbaus in Betracht gezogen. Darüber hinaus sind bei der Wahl der Versuchsparameter störende Eigenfrequenzen des Systems sowie temperaturbedingte Einschränkungen der Materialien zu berücksichtigen, um eine Beeinträchtigung der Datenqualität zu vermeiden. Diese systembedingten Grenzen definieren die experimentelle Genauigkeit und stellen gleichzeitig Ansatzpunkte für zukünftige Optimierungen des Versuchsaufbaus dar.

Die erzielten Ergebnisse stützen die in der Fachliteratur beschriebene Sinnhaftigkeit von Open-Source-basiertem Retrofitting tribologischer Prüfstände. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch den gezielten Austausch veralteter Elektronik und Sensorik bei gleichzeitiger Beibehaltung der mechanischen Kernstruktur eine ausreichend hohe Messgenauigkeit erreicht werden kann, während die Kosten deutlich unter denen einer Neuanschaffung liegen. Die Erfüllung der Anforderungen der DIN ISO 7148-2 durch den modernisierten Prüfstand gewährleistet dessen Einsatzfähigkeit sowohl in der Hochschullehre als auch für Forschungszwecke. Die Arbeit demonstriert, dass durch den modularen, kosteneffizienten Aufbau eine praxisnahe und flexible Versuchsumgebung geschaffen werden kann, die sowohl reproduzierbare Messungen als auch die Integration verschiedener Materialkombinationen und Versuchsszenarien ermöglicht.

5. Schlussfolgerung

Die Modernisierung des Rotationstribometers wurde erfolgreich abgeschlossen. In der Folge wurde ein vormals funktionsunfähiges „Legacy-System“ in ein leistungsfähiges Werkzeug für Forschung und Lehre transformiert. Das primäre Ziel der Arbeit, die Wiederherstellung der Nutzbarkeit des Prüfstands durch den Austausch von Motor, Sensorik und Software, wurde vollständig erreicht. Der Einsatz eines NEMA-34-Schrittmotors in Kombination mit einem dreiachsigen Kraftsensor erlaubt dem Prüfstand die Durchführung tribologischer Untersuchungen nach dem Stift-Scheibe-Verfahren gemäß DIN ISO 7148-2 mit Präzision und Reproduzierbarkeit. Die erzielten Messergebnisse zeichnen sich durch eine hohe Messgenauigkeit der Genauigkeitsklasse 0,5 sowie durch die direkte Erfassung der Normalkraft aus, wodurch eine hohe Verwertbarkeit der Daten gewährleistet ist. Die vorliegende Untersuchung hat eine solide Grundlage für systematische Analysen von Gleitreibungskoeffizienten und Verschleißraten unterschiedlichster Materialpaarungen geschaffen.

Trotz der erfolgreichen Inbetriebnahme und Validierung des Prüfstands bestehen weitere Potenziale zur technologischen Weiterentwicklung. Im Bereich der Software bietet sich insbesondere eine Optimierung an, die darin besteht, die bislang getrennten Lösungen für Motorsteuerung und Datenlogging in einer spezifischen grafischen Benutzeroberfläche zusammenzuführen. Eine solche Integration würde den Bedienkomfort signifikant erhöhen und zugleich die Versuchsdurchführung vereinfachen. In Ergänzung dazu wäre die Implementierung einer softwaregestützten Kalibrieroutine sinnvoll, da auf diese Weise der Kalibrierprozess weiter standardisiert und Anwenderfehler minimiert werden könnten.

Darüber hinaus bildet die Erweiterung der kontrollierbaren Umgebungsbedingungen einen zentralen Ansatzpunkt. Die Integration einer Temperatorkammer sowie die direkte Anbringung von Temperatursensoren an der Probe ermöglichen eine realitätsnahe Abbildung thermischer Belastungsszenarien. In der Folge kann die bislang erforderliche externe Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera substituiert werden. Eine präzisere Erfassung der Temperaturentwicklung in der Kontaktzone würde die Aussagekraft der tribologischen Untersuchungen erhöhen.

Ein weiterer Entwicklungsschritt betrifft die Art der Lastaufbringung. Die manuelle Belastung über Gewichte könnte durch eine dynamisch regelbare Lasteinleitung substituiert werden, beispielsweise mittels Pneumatikzylindern. In der Folge lassen sich variable Lastprofile sowie automatisierte mehrstufige Versuche mit einer einzelnen Probe realisieren, was insbesondere für komplexe Belastungsszenarien vorteilhaft wäre.

In zukünftigen Forschungsprojekten wird die Integration einer kontinuierlichen Verschleißwegmessung einen wesentlichen Entwicklungsschwerpunkt darstellen. Hierfür könnte ein magnetostriktives Messkonzept verfolgt werden, bei dem die Position eines Permanentmagneten entlang eines Wellenleiters erfasst wird. Die geplante Umsetzung orientiert sich an etablierten induktiven Messverfahren und soll über den vorhandenen ESP32-Mikrocontroller erfolgen. Die Erfassung der Verschleißtiefe in Echtzeit sowie ihre unmittelbare Integration in den bestehenden Datenstrom sind realisierbar. Eine solche Erweiterung würde es ermöglichen, den Materialabtrag während des laufenden Versuchs kontinuierlich zu dokumentieren, ohne den Versuch unterbrechen zu müssen, und würde damit die wissenschaftliche Aussagekraft der tribologischen Untersuchungen signifikant steigern.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen des Bundes-Länder-Programms „FH-Personal“.

Literatur

- [1] A. Alqoud, D. Schaefer, J. Milisavljevic-Syed, “Industry 4.0: A systematic review of legacy manufacturing system digital retrofitting,” *Manufacturing Review*, vol. 9, 2022.
- [2] M. Słowik, H. Sierocka, “Manufacturing equipment retrofitting towards Industry 4.0 standards – a systematic overview of the literature,” *Engineering Management in Production and Services*, vol. 15, no. 3, pp. 7–23, 2023.
- [3] D. Jaspert, F. Schuhmacher, M. Wollschlaeger, “Smart retrofitting in manufacturing: A systematic review,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2021.
- [4] A. Zhou, Y. Tian, S. Meng, S. Zhang, X. Xing, Q. Yang, und D. Li, “Open-source tribometer with high repeatability: Development and performance assessment.” *Tribology International*, vol. 184, 108421, 2023.
- [5] DIN e. V. (2014): „DIN ISO 7148-2:2014-07, Gleitlager – Prüfung des tribologischen Verhaltens von Gleitlagerwerkstoffen – Teil 2: Prüfung von polymeren Gleitlagerwerkstoffen“, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [6] CeFEMA – Center of Physics and Engineering of Advanced Materials, Facilities. [Online]. Verfügbar: <https://cefema.tecnico.ulisboa.pt/facilities/>. Zugriff am: 28. Jan. 2026.
- [7] Nanotec Electronic GmbH & Co. KG, PD6-C8918L9504-E-09 – Schrittmotor mit integriertem Controller. [Online]. Verfügbar: <https://www.nanotec.com/eu/de/produkte/1910-pd6-c8918l9504-e-09>. Zugriff am: 28. Jan. 2026.
- [8] ME-Systeme GmbH, K3D60a-500N – 3-Komponenten-Kraftsensor. [Online]. Verfügbar: <https://www.me-systeme.de/de/k3d60a-500n>. Zugriff am: 28. Jan. 2026.
- [9] SparkFun Electronics, HX711 Load Cell Amplifier Datasheet. [Online]. Verfügbar: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/5/4/6/hx711F_EN.pdf. Zugriff am: 28. Jan. 2026.
- [10] SparkFun Electronics, Load Cell Amplifier HX711 Breakout – Hookup Guide. [Online]. Verfügbar: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide/all>. Zugriff am: 28. Jan. 2026.

Betriebsfestigkeitserprobung an einem Schnellwechselsystem des Typs KFX für Schneefräsen für Pisten Bully – Fahrzeuge PB 800

Dr. Ing. Armin Tobuschat

Fa. Realtest GmbH, Karstweg 1, 89143 Blaubeuren, Deutschland

Zusammenfassung

An verschiedenen Varianten von KFX – Schnellwechselsystemen erfolgten Betriebsfestigkeitsversuche (BFV) in einem kraftgeregelten Prüfstand mit 5 Anregungsachsen. Ziel der BFV war die Bewertung der Betriebsfestigkeit auf Basis einer festgelegten Betriebsstunden – Forderung dieses KFX – Systems. Die BFV erfolgten mit Beanspruchungen, die aus Messungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) im realen, alpinen Einsatz mit einem Pisten Bully PB 800 durchgeführt wurden. Auf der Grundlage der Auswertungen dieser Messungen wurde die Prüfanordnung hergestellt sowie die Anzahl der Anregungsachsen / Prüfzylinder mit 5 Achsen festgelegt. Weiterhin wurden die Soll- oder „Target“ – Signale aus den Messungen mit schädigungs-basierten Zeitraffungsmethoden erstellt, auf die der Prüfstand iteriert werden sollte. Innerhalb des Iterationsprozesses wurde jedoch festgestellt, dass unzureichende Simulationsergebnisse an den DMS – Messstellen vorhanden waren, die sich im Vergleich zwischen den Messungen im Prüfstand und den Messungen im realen Einsatz ergaben. Grund für die schlechte Simulationsgüte war die Einwirkung der einzelnen Prüfkkräfte auf sämtliche DMS – Messstellen, bei denen keine eindeutigen Phasenbeziehungen zwischen den Prüfkkräften vorhanden war. Zur Verbesserung der Simulationsgüte erfolgten deshalb Nachmessungen mit DMS, bei denen die einwirkenden Prüfkkräfte in ihren Richtungen einzeln und in den Phasenbeziehungen zueinander klar definiert werden konnten und somit die typischen Beanspruchungs - Charakteristika vorlagen. Mit dieser Vorgehensweise wurde eine wesentlich verbesserte Simulationsgüte erzielt.

1. Einleitung

Zur Sicherstellung der Betriebsfestigkeit über eine definierte Einsatzdauer und der Funktion von Bauteilen und Komponenten, die im realen Einsatz mit dynamischen Beanspruchungen beaufschlagt werden, sind experimentelle Untersuchungen sinnvoll durchzuführen. Um möglichst schnell Informationen über die Betriebsfestigkeit und Funktionssicherheit zu erhalten, werden diese Bauteile und Komponenten in ein – oder mehrachsialen Prüfständen experimentell erprobt. Dazu müssen die Beanspruchungen bekannt sein, mit denen die Erprobung an den Prüfteilen erfolgen soll sowie geeignete prüftechnische Einrichtungen für die Simulation der Beanspruchungen vorhanden sein.

Am Beispiel der Betriebsfestigkeitserprobung eines Schnellwechselsystems KFX (Kässbohrer Fast Exchange) wird dargestellt, wie eine solche Erprobung durchgeführt werden kann. Abbildung 1 zeigt das KFX – System mit Geräteträger und Schneefräse, das sich am Heck eines PB 800 befindet. Abbildung 2 zeigt schematisch das KFX – System mit dem Zentrierrahmen.

Im ersten Schritt der Untersuchungen wurden Messungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Erfassung der Strukturbeanspruchungen im realen Einsatz durchgeführt. Diese Messungen erfolgten im Schigebiet in Sölden. Bei den Messungen wurden definierte und dem typischen Einsatz entsprechende Manöver durchgeführt. Weiterhin wurden Messungen über einen Zeitraum von 4 Wochen Betriebseinsatz durchgeführt, bei dem von verschiedenen Betriebsangehörigen der Söldner Betriebsstätte die Beanspruchungen aufgezeichnet wurden. Aus den Auswertungen der Messdaten wurden die Soll- oder sog. „Target“ – Signale erzeugt, auf die der Prüfstand iteriert wurde. Dabei erfolgte mit schädigungs-basierten Methoden der Zeitreduzierung die Erzeugung der „Target“ – Signale mit dem Ziel, möglichst geringe Prüflaufzeiten bis zur Betriebsfestigkeitsforderung zu erhalten.

Im zweiten Schritt erfolgte die Erstellung der Prüfanordnung. Die notwendige Anzahl der Anregungsachsen / Prüfzylinder wurde aus den Messdaten – Auswertungen mit 5 Achsen festgelegt.

Weiterhin werden aufgrund unzureichender Simulationsergebnisse Lösungswege zur Verbesserung der Simulationsqualität beschrieben. Grund für diese unzureichenden Simulationsergebnisse war das

Übertragungsverhalten der außenliegenden Prüfzylinder am Fräsrahmen auf die Signalantworten an einzelnen DMS – Messstellen, die auf sehr engem Raum am KFX – System appliziert wurden.



Abb. 1: PB 800 mit angebautem KFX – System und Schneefräse



Abb. 2: Schematische Darstellung des Zentrierrahmens und des KFX – Systems.

2. Prüfstandsbeschreibung und Methodik

Nachfolgende Abbildung 3 zeigt den Prozessfluss zur Durchführung der Untersuchungen

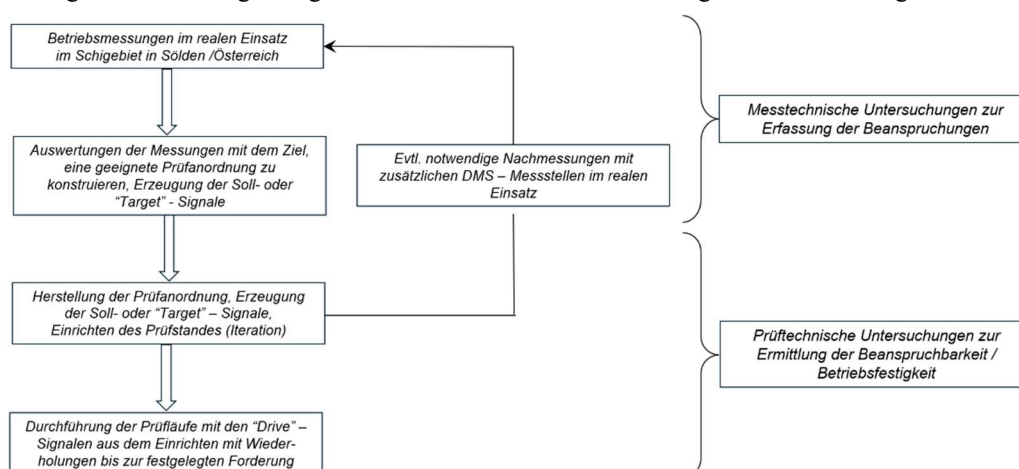


Abb. 3: Prozessfluss zur Durchführung der Untersuchungen

Abbildung 4 zeigt den Untersuchungsbereich für die BFV mit dem Zentrierrahmen und dem KFX – System

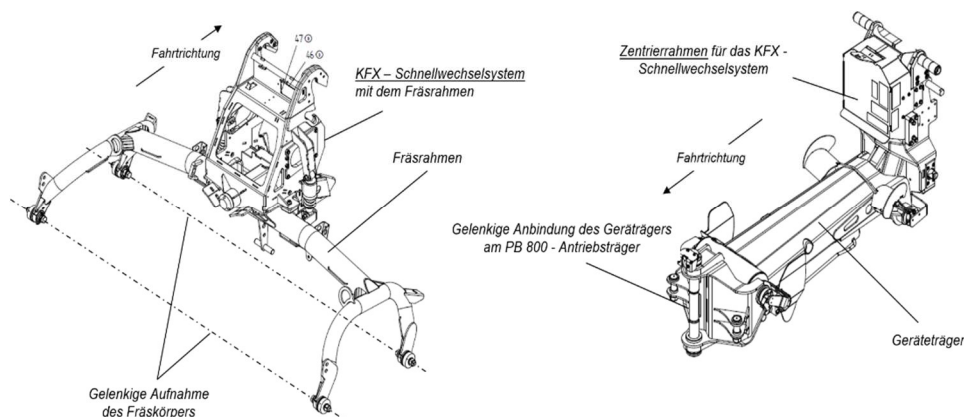


Abb. 4: Darstellung des Untersuchungsbereichs für die BFV, des Zentrierrahmens und dem KFX - Systems

Messtechnische Untersuchungen mit DMS:

- Applikation von 15 Einzel – DMS im Strukturbereich des Zentrierrahmens und des KFX – Systems auf der Grundlage von durchgeführten FEM – Berechnungen (siehe Beispiel in Abbildung 5)
- Herstellung eines Messglieds aus dem Gelenkbolzen auf Basis von Biegehalbrücken zur Ermittlung der Kräfte in Vertikalrichtung und in lateraler Richtung (siehe Abbildung 6)

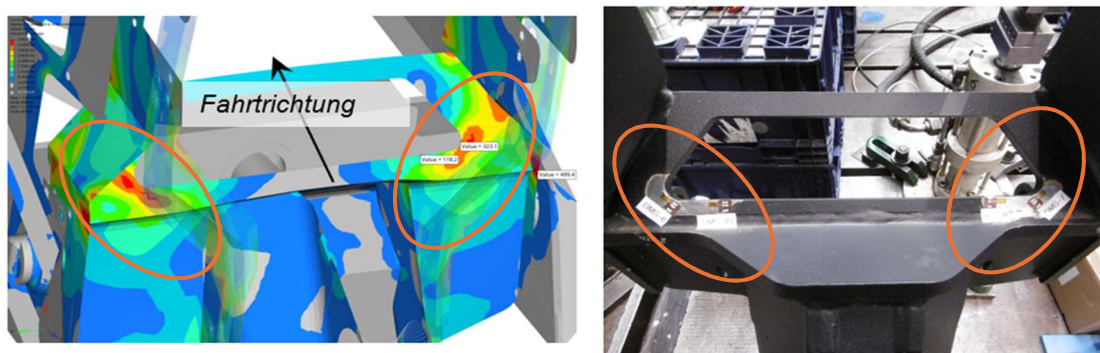


Abb. 5: Darstellung der Applikation von Einzel-DMS am Zentrierrahmen auf der Grundlage von FEM - Berechnungen

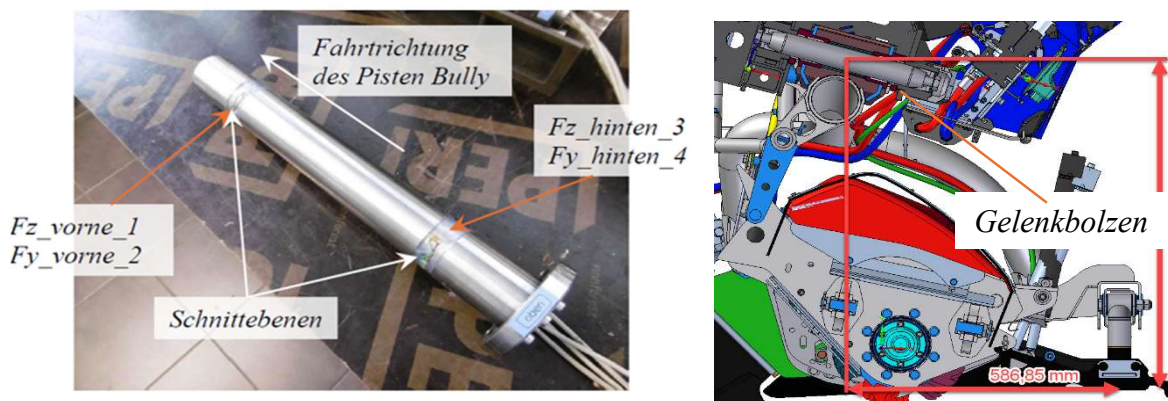


Abb. 6: Darstellung des hergestellten Messglied – Gelenkbolzens auf DMS – Basis zur Erfassung der Vertikal- und Seitenkräfte

Es erfolgten 12 Einzelmessungen, bei denen definierte Fahrmanöver, bspw. Präparierbetrieb, Slalom mit / ohne Schneefräse, Schneeräumbetrieb, durchgeführt wurden. Abbildung 7 zeigt die Zeitfunktionen einer Messung.

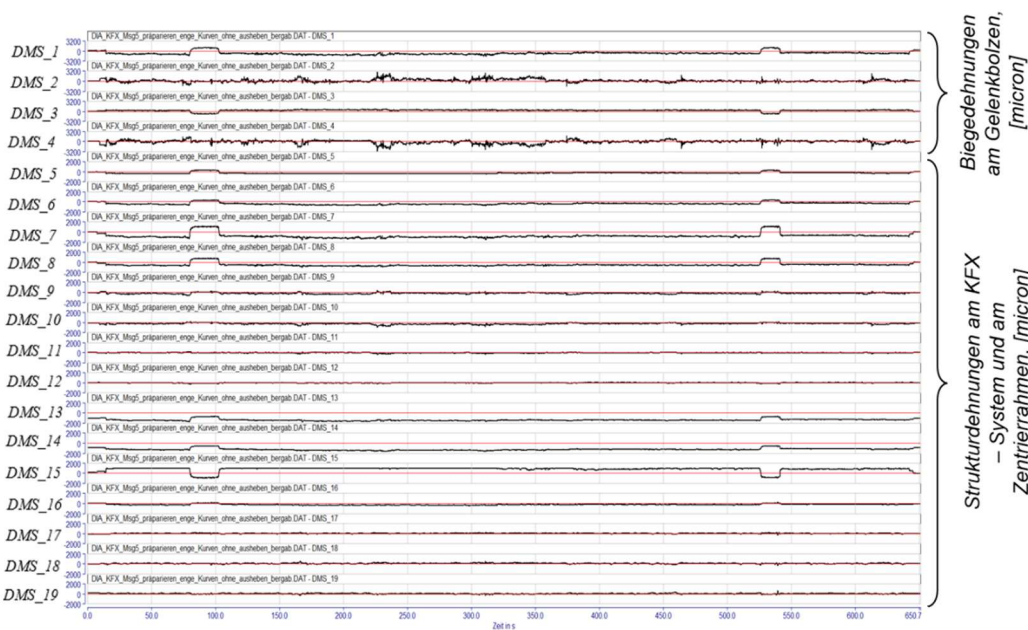


Abb. 7: Darstellung der Zeitfunktionen einer Messung „KFX_Msg5 präparieren enge Kurven_ ohne ausheben_bergab“

Weiterhin wurden Messungen über einen längeren Zeitraum von 1,5 Stunden und 91 Stunden Betriebseinsatz durchgeführt, bei denen der typische Einsatz für das KFX – System an einem Pisten Bully PB 800 an den DMS – Messstellen erfasst wurde. Diese Messungen dienen als Bemessungsgrundlage zur Berechnung der im Prüfstand simulierten Betriebszeiten. Abbildung 8 zeigt am Beispiel der Messstelle DMS_7 am Zentrierrahmen die Klassengrenzenüberschreitungs - Kollektive der beiden Langzeitmessungen, Abbildung 9 die Bereichs paar – Kollektive und die relativen Schädigungen.

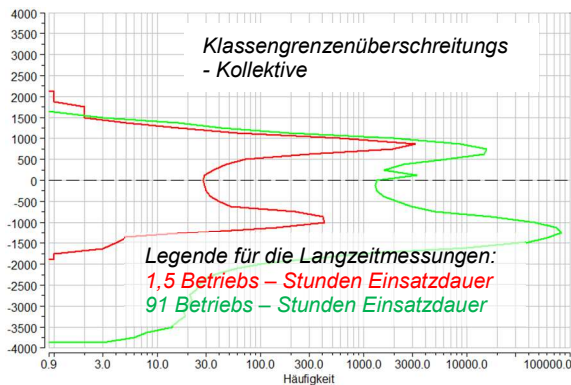
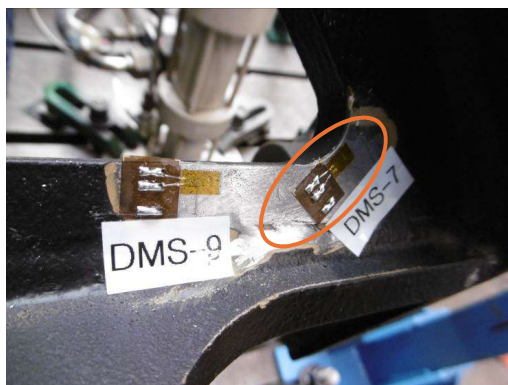


Abb. 8: Position der Messstelle DMS_7 und die Klassengrenzenüberschreitungs – Kollektive aus den beiden Langzeitmessungen

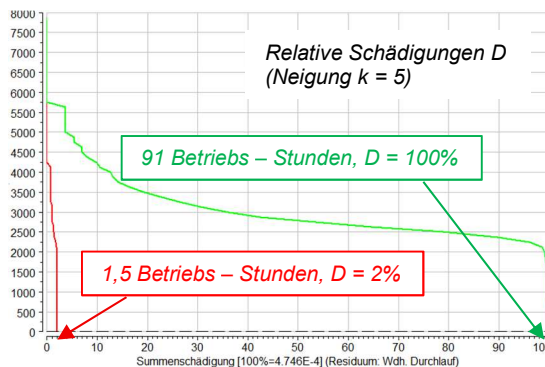
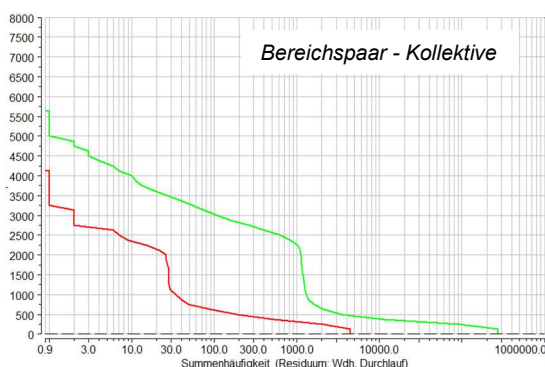


Abb. 9: Bereichs paar – Kollektive und relative Schädigungen aus den beiden Langzeitmessungen

Die Erzeugung der „Target“ – Signale, auf die der Prüfstand iteriert wurde, erfolgte aus aufgezeichneten 4 Einzel-Messungen. Zur möglichst schnellen Prüflaufdurchführung wurden diese Einzel-Messungen mit sog. „Rainflow Protection“ – Filtern zeitgerafft. D. h., den Messsignalen wurden zeitsynchron über sämtliche Messkanäle Signalanteile entnommen, sodass ein vorgegebener Schädigungsverlust nicht unterschritten wurde. Weiterhin wurden nach der „RP“ – Filterung die Signale zur Signalfrequenz - Erhöhung um Faktor 2 komprimiert. Mit diesen beiden Zeitraffungsmethoden konnten die Prüflaufzeiten um mindestens Faktor 25 reduziert werden. Die Simulation der Beanspruchungen für die vorgegebene Forderung für die Betriebsfestigkeit des KFX – Systems konnten innerhalb 400 Stunden – Prüflaufzeit durchgeführt werden.

Für die Prüfläufe wurde eine *Prüfanordnung mit 5 Anregungsachsen* erstellt. Diese Prüfkräfte wurden am Fräsrahmen, der als Serienbauteil zur Einleitung der Prüfkräfte eingesetzt werden konnte, verwendet. Die Bezeichnung der einzelnen Prüfkräfte wurde, wie folgt, festgelegt:

- Seitenkraft, F_y
- Vertikalkraft rechts, Fz_re
- Vertikalkraft links, Fz_li
- Längskraft rechts, Fx_re
- Längskraft links, Fx_li

Nachfolgende Abbildung 10 zeigt schematisch die Anordnung der Prüfkräfte am Fräsrahmen.

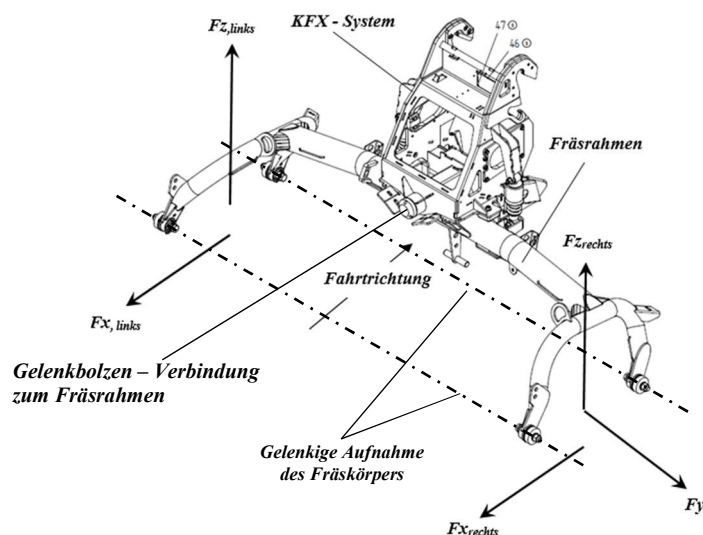


Abb. 10: Schematische Darstellung der 5 Prüfkräfte – Einleitungspositionen am Fräsrahmen

Das Ziel des Iterationsprozesses im Prüfstand war die Erzeugung der 5 Prüfkräfte, als „Drive“ – Signale bezeichnet, die das Schädigungsverhalten am KFX – System möglichst genau abbilden. Im vorliegenden Fall lagen als „Target“ – Signale die Dehnungen an den DMS – Messstellen vor.

Die Iteration des kraftgeregelten Prüfstandes auf die DMS – Messstellen gemäß den „Target“ – Signalen am KFX – System und dem Zentrierrahmen zeigte, dass sich unzureichende Simulationsergebnisse an den DMS – Messstellen ergaben. Grund für die unzureichende Simulationsgüte war die Reaktion der einzelnen Prüfkräfte auf sämtliche, zum Iterationsprozess verwendeten DMS – Messstellen. Es ließen sich keine eindeutige Kombination der Prüfkräfte in Bezug auf die DMS – Messstellen erzeugen. Außerdem lag die Vermutung vor, dass auch die vorgegebenen Kräfteinleitungspunkte fehlerbehaftet waren.

Zur Abhilfe dieser unzureichenden Eigenschaften erfolgten weitere Messungen, bei denen die Kraftgrößen in Höhe und Phasenbeziehungen für typische Einsatzbedingungen ermittelt werden konnten. Dazu wurden an einem PB 800 – Fahrzeug am Fräsrahmen zusätzlich zu einigen DMS – Messstellen am KFX – System und am Zentrierrahmen weitere DMS – Messstellen in Form von DMS – Biegehalbrücken zur Ermittlung der Biegemomente und Kräfte appliziert. Abbildung 11 zeigt schematisch die Positionen am Fräsrahmen, an denen diese Halbrücken appliziert wurden. Die einwirkenden Kräfte am Fräsrahmen konnten aus den erfassten Biegedehnungen und den Querschnittswerten berechnet werden, sodass aufwendige Kalibrierarbeiten entfallen konnten. Weiterhin konnten aus den Messungen die Kräfteinleitungspunkte genauer als ursprünglich vorgegeben, bestimmt werden. In Abbildung 11 ist außerdem eine Gesamtansicht der Prüfanordnung dargestellt.

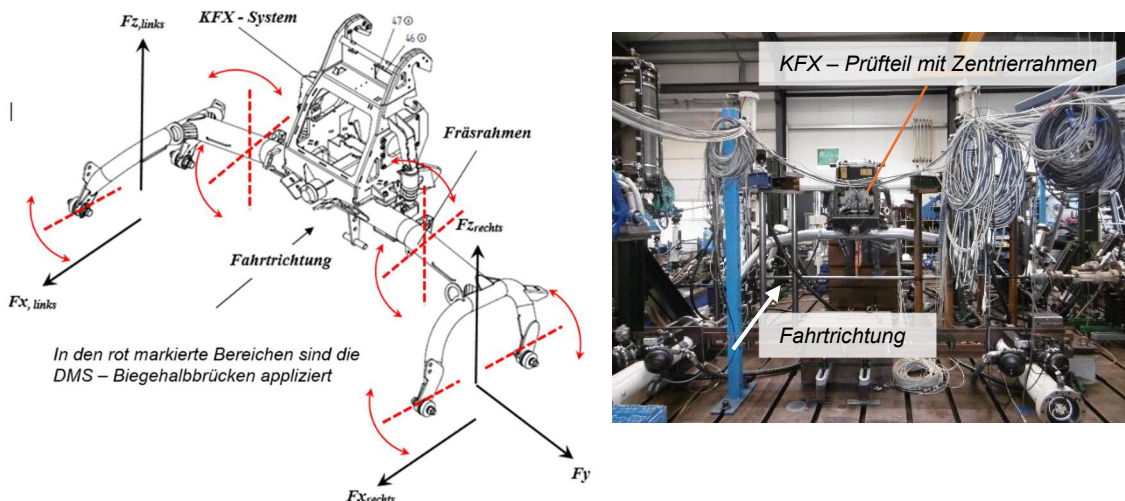


Abb. 11: Schematische Darstellung der Positionen der zusätzlich applizierten DMS – Biegehalbrücken am Fräsrahmen sowie eine Gesamtansicht der Prüfanordnung (von hinten gesehen)

Aus den zusätzlich durchgeführten Messungen, bei denen die Kräfte am Fräsrahmen und den für die Iteration des Prüfstandes wichtigen DMS – Messstellen am KFX – System und am Zentrierrahmen ermittelt wurden, erfolgt eine neue Erzeugung der „Target“ – Signale, in gleicher Weise mit Zeitraffungsmethoden wie bei den vorausgegangenen Signalen im ersten Schritt. Der Iterationsprozess auf Basis der neuen „Target“ – Signale zeigte, dass eine wesentliche Verbesserung der Simulationsgüte erreicht wird.

Die Prüfkraft wurde über gelenkige Prüfzylinder – Kolbenstangenverlängerungen, in denen die Kraftmessdosen für die Erfassung und Regelung der Prüfkraft eingebaut waren, eingeleitet. Abbildung 12 zeigt die Prüfkraft – Einleitungselemente.

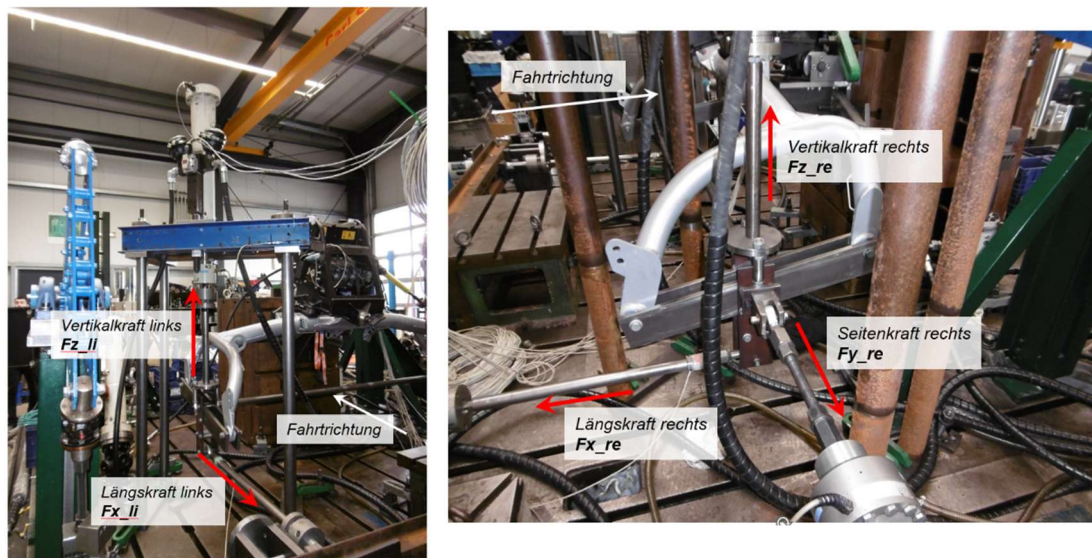


Abb. 12: Darstellung der Prüfanordnung und den Prüfkraft – Einleitungselementen auf der rechten Seite am Fräsrahmen

Der Iterationsprozess erfolgte mit dem Ziel, Prüfkraft - „Drive“ – Signale für die 5 Prüfzylinder zu generieren, mit denen die Ist – oder „Response“ – Signale erzeugt wurden, die mit möglichst geringen Abweichungen dem „Target“ – Signal entsprechen.

Der Iterationsprozess erfolgte nach dem Flussdiagramm, das in Abbildung 13 dargestellt ist.

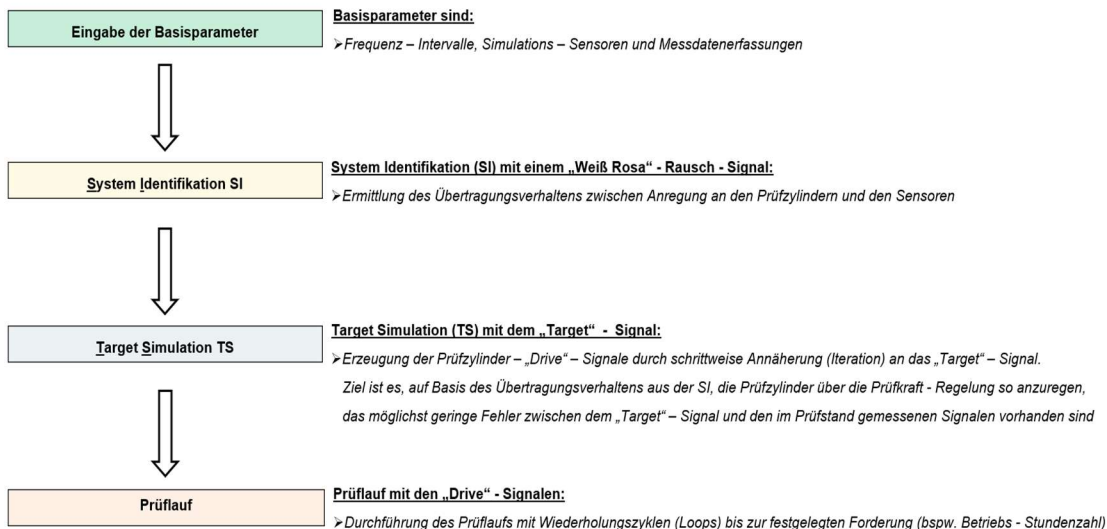


Abb. 13: Prozessfluss des Iterationsprozesses

Nach der Systemidentifikation (SI), bei der das Übertragungsverhalten zwischen den Prüfzylinderkräften und dem Systemverhalten am KFX – Prüfteil auf Basis eines Rauschprozesses im relevanten Frequenzbereich ermittelt wurde, erfolgt iterativ die Erhöhung der Prüfzylinder – „Drive“ – Signale zur Anpassung der „Response“ – Signale an die „Target“ – Signale in der „Target“ – Simulation (TS).

Innerhalb dieses Prozesses liegen Korrekturmöglichkeiten für den jeweils neuen Schritt des zu berechnenden „Drive“ – Signals vor. Dabei können Gewichtungsfaktoren, Fehlerkorrektur – Größen, ect. eingestellt werden, um eine möglichst hohe Simulationsqualität zu erhalten. Abbildung 14 zeigt grafische Darstellungen zur Bewertung der Simulationsqualität während des Iterationsvorgangs.

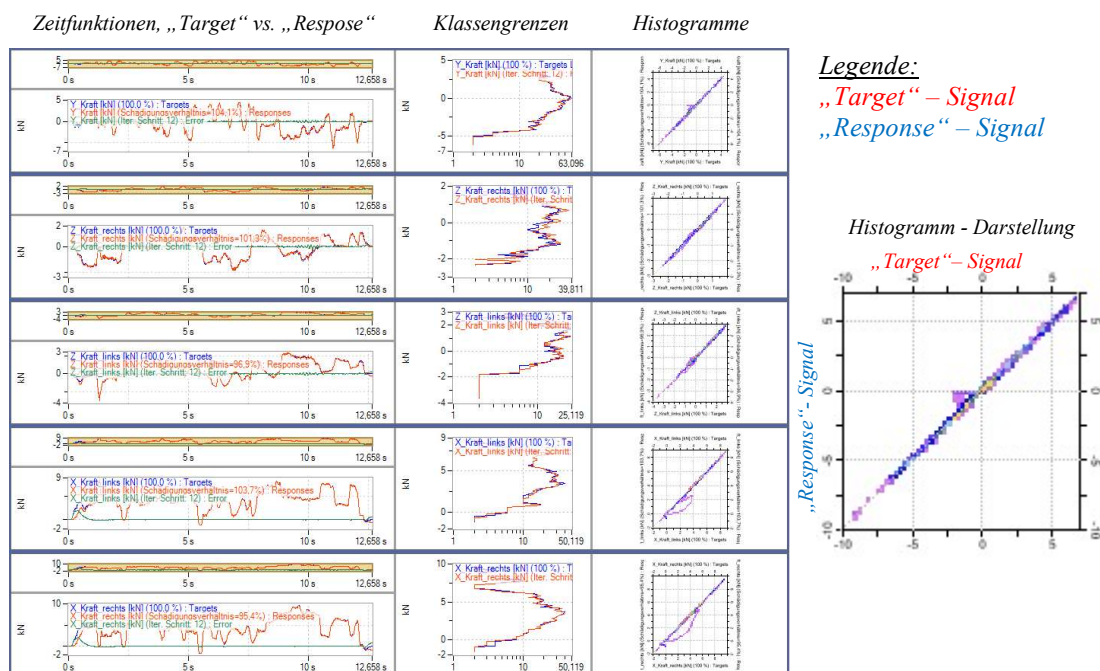


Abb. 14: Grafische Darstellungen zur Bewertung der Simulationsqualität während des Iterationsvorgangs (Kopie aus der Iterations – Software „TWR“ von Instron)

Weiterhin können „Kombinierte Fehlerdiagramme“ dargestellt werden, die zeigen, wie die Konvergenz über den Iterationsprozess als Abweichung der „Response“ – Signale zu den „Target“ – Signalen, verlaufen.

In Abbildung 15 sind die Fehlerdiagramme sowie die Leistungsdichtespektren der Prüfkraften dargestellt. In den Leistungsdichtespektren sind zum Vergleich die „Target“- und „Response“- Signale zur Bewertung der Simulationsgüte dargestellt.

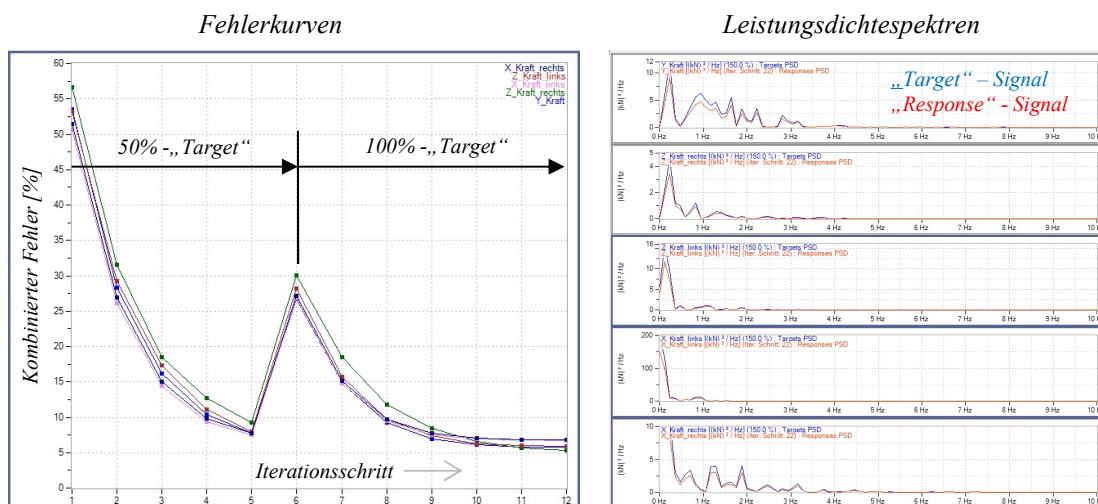


Abb. 15: Fehlerkurven und Leistungsdichtespektren der 5 Prüfkraft - Signale zur Bewertung der Konvergenz und der Simulationsgüte zwischen den „Target“ - und „Response“ - Signalen (Kopie aus der Iterations - Software „TWR“ von Instron)

Die Fehlerkurven in Abbildung 15 zeigen, dass nach ca. 10 Iterationsschritten eine Sättigung der Konvergenz erreicht ist und eine sehr gute Simulationsqualität vorliegt. Bei 12 Iterationsschritten liegt an allen 5 Signalen ein Fehler von ca. 5% vor.

3. Schlussfolgerung

Die Untersuchungen zur Betriebsfestigkeitsbewertung an dem KFX – System haben gezeigt, dass auf Basis der Messungen mit DMS, die nur in eng begrenzten Bereichen am KFX - Stahlbau appliziert wurden, gegenüber den relativ weit außenliegenden Prüfkraft – Einleitungen mit 5 Anregungsachsen, keine ausreichenden Simulationsergebnisse erzielt wurden. Mit Hilfe von zusätzlichen Messungen zur Ermittlung der äußeren einwirkenden Kräfte, konnten wesentliche Verbesserungen der Simulationsgüte erzielt werden.

Für weitere Prüfläufe sollten deshalb neue Messungen im realen Einsatz mit den DMS am KFX – System, wie ursprünglich durchgeführt, und zusätzlich mit DMS – Messstellen am Fräsrahmen zur Ermittlung der von außen einwirkenden Kräfte, wie im zweiten Schritt erfolgt ist, durchgeführt werden.

Grundsätzlich zeigt die beschriebene Vorgehensweise eine sinnvolle Vorgehensweise zur Betriebsfestigkeitserprobung an den KFX – Schnellwechselsystemen. Innerhalb der Prüfläufe ergaben sich Schäden in Form von Rissen, insbesondere in der Stahlbaustruktur, die bezogen auf die erreichten Betriebsstunden und den Schadenspositionen, mit denen aus dem realen Einsatz übereinstimmen.

Die Firma Realtest bedankt sich bei der Fa. Kässbohrer Geländefahrzeug AG für die tatkräftige Unterstützung zur Durchführung der Messungen im alpinen Einsatz und der Prüfläufe sowie der Genehmigung zur Veröffentlichung der Untersuchungen.

Der Einfluss von Einspannungen und Lasteinleitungsvorrichtungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen

Dr. Michael Oeter

thyssenkrupp Automotive Systems

Vortrag



thyssenkrupp

Der Einfluss von Einspannungen und Lasteinleitungsvorrichtungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen

TestRig 2026
thyssenkrupp Automotive Systems | 11.03.2026

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS
engineering. tomorrow. together.

Kurzvorstellung



- | Dr.-Ing. Michael Oeter
- | Studium und Promotion an der Universität Paderborn
"Beitrag zur Entwicklung einer Versuchsmethodik zur Bewertung des Crashverhaltens geklebter und hybridgefügter Verbindungen"
- | Seit 2003 Prüfsingenieur im Test Center der thyssenkrupp Automotive Systems GmbH
- | Aufbau, Einrichtung und Betreuung von ein- und mehrkanaligen Betriebsfestigkeitsprüfungen an Chassisbauteilen und -systemen
- | Seit 2005 stellvertretender Leiter des Test Centers

1 | 11.03.2026 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Oeter

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Gliederung



- | Einleitung:
Realität versus Prüfstand
- | Beispiel Drehstabprüfung:
Einfluss der Prüfstandssteifigkeit auf die Nachfahrgüte
- | Beispiel Achsprüfung:
Berücksichtigung des Steifigkeitsverlaufes des Vorderwagens
- | Fazit

1 | 11.03.2026 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Oeter

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Realität versus Prüfstand



Umweltbedingungen
Beschleunigungen
Verformungen
Momente
Kräfte
Werte

Die Betriebsfestigkeit von Bauteilen ist immer auch ein Resultat der Einbausituation und des ZSB

1 | 11.03.2026 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Oeter

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS



Die Einbausituation und der ZSB im Prüfstand hat immer auch einen Einfluss auf die Betriebsfestigkeit von Bauteilen

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Der Einfluss von Einspannungen und Lasteinleitungsvorrichtungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen



Beispiel Drehstabprüfung

Einfluss der Prüfstandssteifigkeit auf die Nachfahrgröße

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS



Aufbau von Drehstabprüfständen



Prüfaufbau 1: Aufbau vertikal, Prüfstand wurde nach Kundenzeichnungen gefertigt und aufgebaut

© 11.02.2010 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Dier



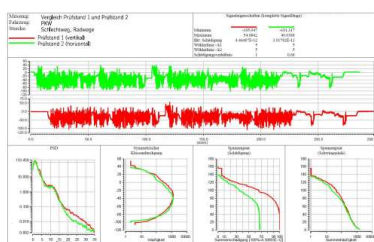
Prüfaufbau 2: Aufbau horizontal, Prüfstand wurde aus Kundenzeichnungen auf einen horizontalen Aufbau umkonstruiert

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Vergleich der Nachfahrgrößen zwischen verschiedenen Prüfstands-aufbauten

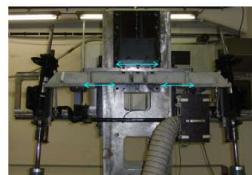


Analyse und Ursache der Abweichungen



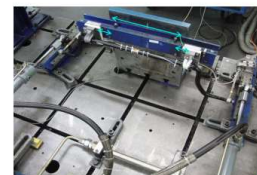
- Bei beiden Prüfständen wurden die Vorgabedaten entsprechend der Kundenforderung torsionsgerecht nachgefahren
- Die Torsionsdehnungen waren bei beiden Prüfständen vergleichbar
- Die resultierenden, wechselseitigen „Radwege“ zeigten jedoch signifikante Unterschiede zwischen den beiden Prüfständen

⚡ Gleiche Vorgabesignale führten zu unterschiedlichen Beanspruchungen im Drehstab und den Gummilagern auf den verschiedenen Prüfständen



Prüfaufbau 1: schmale Auflagefläche der Quertraverse
-> stärkere Verformung der Quertraverse

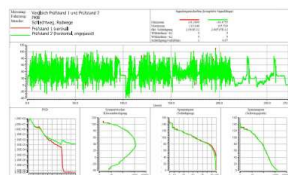
© 11.02.2010 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Dier



Prüfaufbau 2: breitere Auflagefläche der Quertraverse
-> geringere Verformung der Quertraverse

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Fazit



- Jeder Prüfstand bildet nur ein Modell der Realität ab
- Unterschiedliche Ausprägungen führen zu unterschiedlichen Beanspruchungen und Ergebnissen
- Vergleichsmessungen zwischen verschiedenen Prüfstandskonzepten zeigen mögliche Unterschiede
- Eine Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen ist nur bei vergleichbaren Randbedingungen möglich

© 11.02.2010 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Dier

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS



Beispiel Achsprüfung

Berücksichtigung des Steifigkeitsverlaufes des Vorderwagens

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Aufbau von Achsprüfständen mit Karosserie oder Ersatzrahmen



Veränderung der Beanspruchung bei Nichtberücksichtigung der realen Steifigkeiten im Ersatzrahmen



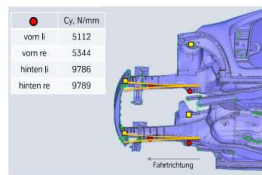
Aufbau mit der Originalkarosserie zur Aufnahme der Achse an den realen Anbindungspunkten



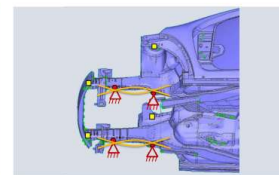
Aufnahme der Achse in einer Ersatzkonstruktion mit Nachbildung der realen Anbindungspunkte

© 11.02.2010 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Dier

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS



In der Realität hat der Vorderwagen eine in Fahrtrichtung abnehmende Steifigkeit



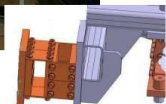
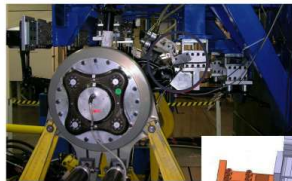
Eine steife Aufnahme der Anbindungspunkte in einer Ersatzkonstruktion kann zu einer Veränderung der „Biegelinie“ und damit der Beanspruchung führen

© 11.02.2010 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. M. Dier

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Der Einfluss von Einspannungen und Lasteinleitungsvorrichtungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen

Nutzung von Tuningelementen zur Anpassung des Steifigkeitsverlaufes einer Einspannung an die Karosseriesteifigkeiten

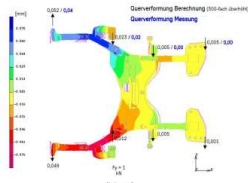


- Berücksichtigung der Karosseriesteifigkeiten in der Achseinspannung
- Ausrichtung in zwei Ebenen ermöglicht unterschiedliche Steifigkeiten, z.B. für vertikale und horizontale Richtungen
- Durch die Blechdicke, die Anzahl der Bleche und die Form kann die Steifigkeit gezielt eingestellt werden

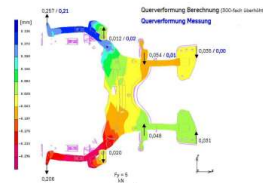
13 | © 11/2023/2024 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. N. Dier

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Vor dem Versuch: Überprüfung der Steifigkeiten im Prüfstand



Abgleich der Querverformung bei 1000 N



Abgleich der Querverformung bei 5000 N

14 | © 11/2023/2024 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. N. Dier

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

Fazit



- Die Wahl und Auslegung der Einspannungen hat einen Einfluss auf die Beanspruchung der Prüfteile
- Die Steifigkeit von Einspannpunkten kann z.B. mit einfachen Tuningelementen – auch nachträglich – angepasst werden
- Der Abgleich der Steifigkeiten von Einspannungen mit der realen Einbausituation kann durch die Nachbildung einfacher Lastfälle erfolgen

15 | © 11/2023/2024 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. N. Dier

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS

thyssenkrupp Automotive Systems, Test Center

Ihr Dienstleister für die Betriebsfestigkeitserprobung

Betriebsfestigkeitserprobungen von der Planung bis zur Durchführung und Dokumentation

Erfahrene Ingenieure mit Expertise in einem weiten Feld von der Datenanalyse über die Regelungstechnik bis zu fahrzeugspezifischen Fragestellungen

Seit 2006 akkreditiert als Prüflabor nach internationaler Norm DIN/EN ISO IEC 17025 für:

Mechanisch-technologische Untersuchungen von Fahrzeugbauteilen und -systemen mit servohydraulischen und elektrodynamischen Prüfeinrichtungen sowie Betriebsfestigkeitsanalysen mit Betätigungs- und Belastungsversuchen.



16 | © 11/2023/2024 | Einfluss von Einspannungen auf die Ergebnisse von Betriebsfestigkeitsversuchen | Dr. N. Dier

BILSTEIN MOTION SOLUTIONS



COMPUTER METHODS

IN PARTNERSHIP WITH

MECALC



HIGH-FIDELITY PYROSHOCK TESTING

One Solution. Total Data Confidence.

The Power of Mecalc Hardware & PhoenixKonnnect Software

ALI²⁵

WHERE USED:

Acquisition of Pyro-Shock / Mechanical Shock events related to impact / shock, ballistics, and explosives test.

Bridge and Resistive Sensors that require 2-wire, 4-wire and 6-wire configurations.

High Voltage SubModule for external high-voltage signal conditioning used in power measurements.

Hopkinson Bar Testing

TECHNICAL HIGHLIGHTS:

5 MSa/s per channel, 24-bit resolution

0.1 dB Flat bandwidth response to 1 MHz

Slew rate > 50 V/ μ s

Sophisticated analog anti-alias filtering (AAAF)

21 MSa buffer per channel

Bridge, ICP/IEPE and Voltage inputs

Advanced triggering and multi-system synchronization

High-speed thermocouple measurement

HARDWARE

MECALC

Mecalc (Pty) Ltd

Email: info@mecalc.com



MECALC.com

SOFTWARE



COMPUTER METHODS

Computer Methods

1660 W. Linne Rd, Suite H | Tracy CA 95377 | USA

Email: sales@computer-methods.com

Phone Number: +1 (510) 824-0252



PHOENIXKONNECT.com

PRODUCT DISTRIBUTOR



MEQ Technologies GmbH

Am Studio 26 | Berlin 12489 | Germany

Email: info@MEQtechnologies.com

Phone Number: +49 (0)30 577 123 430



Großstruktur 4-Punkt-Biege-Prüfstand zur Validierung von Rotorblatt-Materialien

Luis Böhm (M.Sc.)¹, Lorenz Kade (M.Eng.)¹, Dr. Kai Ehrlich², Dr. Timo Jungblut¹

¹IABG mbH, Einsteinstraße 20, 85521 Ottobrunn, Germany

²Nordex Energy SE, 18146 Rostock, Germany

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein neu entwickelter Prüfstand für Komponententests an Rotorblattmaterialien vorgestellt. Der Prüfstand ermöglicht 4-Punkt-Biegeversuche an GFK- oder CFK-Balken mit einer Länge von bis zu 13 m. Durch die Charakterisierung der Werkstoffe in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses können Materialmodelle parametrisiert und die Anzahl aufwändiger, nachgelagerter Full-Scale-Tests reduziert werden. Dadurch lassen sich Entwicklungszeiten verkürzen und der Aufwand zur Absicherung von Rotorblättern signifikant senken.

Der Prüfstand ist für eine hohe Bandbreite an unterschiedlichen Prüflingen ausgelegt und verfügt über eine adaptive Regelung, die das Einregeln des Systems bei neuen Prüflingen weitgehend automatisiert. Das elektrohydraulische Antriebssystem weist im Vergleich zu herkömmlichen servohydraulischen Umsetzungen bis zu 90 % geringere Betriebskosten auf. Diese Effizienzsteigerung beruht auf einer bedarfsgerechten Kraft-Druck-Kopplung, elektrischem Bremsen sowie der Zwischenspeicherung und Wiederverwendung rekuperierter Energie.

Die Effizienz des elektrohydraulischen Antriebskonzeptes wird durch ausgewertete Messdaten und abgeglichenen numerische Simulationen belegt. Zusätzlich wird ein webbasiertes Tool vorgestellt, das die mögliche Energieeinsparung für verschiedene Lastpunkte interaktiv berechnet.

1. Einleitung

Die Windenergiebranche ist durch intensiven Wettbewerb zwischen verschiedenen Herstellern und einem daraus resultierenden hohen Innovationsdruck gekennzeichnet. Dies wird im Wesentlichen durch zwei Zielgrößen bestimmt: die Steigerung der jährlichen Energieproduktion (Annual Energy Production, AEP) sowie die Verbesserung von Zuverlässigkeit und Effizienz. Entsprechend investieren Hersteller umfangreich in Forschung und Entwicklung, um Leistungsfähigkeit und Lebensdauer ihrer Kraftwerke kontinuierlich zu erhöhen. Die Weiterentwicklung der Rotorblätter stellt hierbei einen zentralen Schwerpunkt dar.

In der Vergangenheit entwickelte die Nordex Energy SE effiziente Rotorblätter mit schlankem Design auf Basis eines allgemeinen, auf mehrere Zielmärkte übertragbaren Entwicklungsansatzes. Mit dem weltweit wachsenden Bedarf an Windenergie werden die Zielmärkte jedoch zunehmend diversifiziert und erfordern stärker spezialisierte Produkte. Dies führt zu einem erhöhten Entwicklungsaufwand.

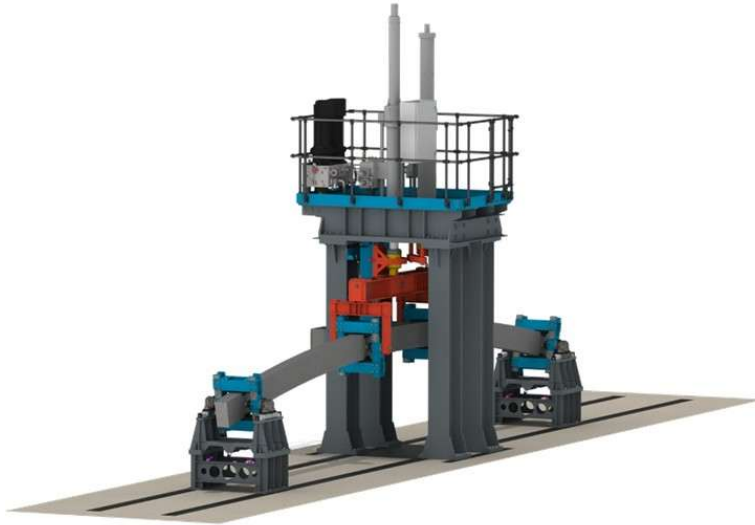


Abb. 1: Großstruktur 4-Punkt-Biege-Prüfstand

Zur Bewältigung dieser Anforderungen verfolgt die Nordex Energy SE das Ziel, die Entwicklung neuer Rotorblätter zu vereinfachen und Risiken zu reduzieren. Der verstärkte Einsatz von Komponententests für neue und bestehende Blatttypen verringert den Bedarf an kosten- und zeitintensiven Vollblatttests und stellt sicher, dass neue Produkte die erforderlichen Leistungsstandards erfüllen. Obwohl Komponententests in der Windenergieindustrie grundsätzlich etabliert sind, war ihre Anwendung bislang häufig durch hohe Kosten für spezialisierte Prüfverfahren sowie durch hohe Energiekosten eingeschränkt.

Vor diesem Hintergrund wurde von der IABG für die Nordex Energy SE eine neue Testanlage (siehe Abbildung 1), zur Prüfung auf Werkstoffebene, entwickelt. Dieser Ansatz ermöglicht es Entwicklungskosten und -zeiten zu reduzieren. Zudem wird durch ein vertieftes Verständnis konstruktiver Details die Zuverlässigkeit der Rotorblätter erhöht. Ein innovatives elektrohydraulisches Antriebskonzept senkt darüber hinaus den Energiebedarf der zeitintensiven Prüfprozesse und leistet damit einen Beitrag zur nachhaltigen Weiterentwicklung der Windenergiebranche.

2. Prüfstands Beschreibung und Methodik

Im Folgenden wird der Aufbau der Prüfanlage beschrieben. Die Prüflinge sind bis zu 13 m lange Balken mit einem Kern aus Balsaholz und einer laminierten Deckschicht aus kohlefaserverstärktem Polymer (CFRP) beziehungsweise kohlefaserverstärktem Kunststoff (CRP). Die Balken werden in Vierpunktbiegeversuchen charakterisiert.

Der Prüfstand hat im Wesentlichen zwei Zielsetzungen: Zum einen dient er der Ermittlung von Daten für die Parametrisierung und Abstimmung numerischer Modelle zur Auslegung der Rotorblätter. Zum anderen dient er der Analyse und Validierung von Designvarianten auf Komponentenebene. Der Prüfstand ist sowohl für statische als auch für dynamische Prüfscenarien ausgelegt. Statische Tests werden mit maximalen Kräften von bis zu ± 400 kN, Amplituden bis zu ± 500 mm und langsamen Aktuatorgeschwindigkeiten (10 mm/s) durchgeführt. Dynamische Ermüdungstests dienen der Ermittlung von Wöhler-Kurven, wobei zyklische Lasten mit einer maximalen Kraft von ± 200 kN, Amplituden von bis zu ± 500 mm und Frequenzen bis zu 2 Hz aufgebracht werden. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 0,62 m/s.

Großstruktur 4-Punkt-Biege-Prüfstand zur Validierung von Rotorblatt-Materialien

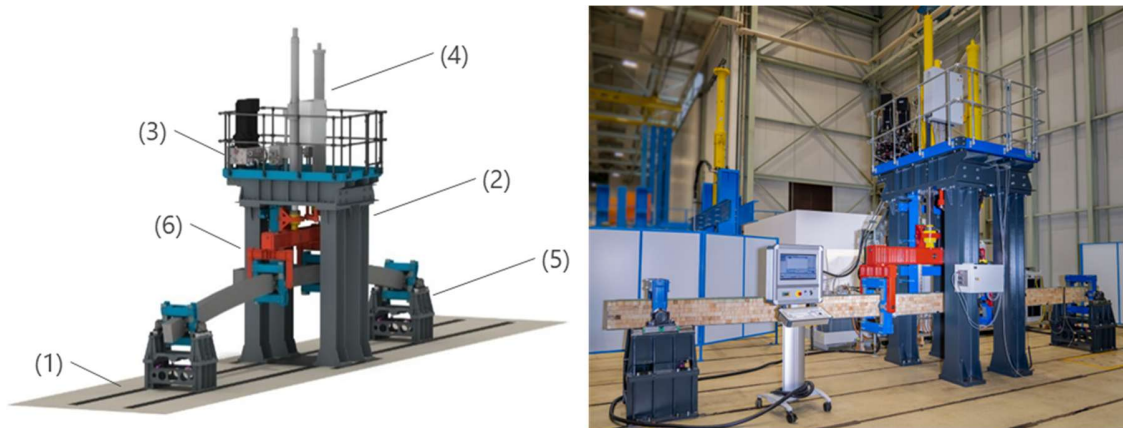


Abb. 2: Vier-Punkt-Biege-Prüfstand. (1) Fundament, (2) Portal, (3) Hydraulisches Antriebssystem, (4) Hydraulik Zylinder, (5) Balkenlager, (6) Lastgeschirr

Wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht der Prüfstand aus einem Fundament (1) und einem Portal (2), das der Aufnahme eines hydraulischen Antriebssystems (3) sowie zweier Hydraulikzylinder (4) dient. Die CFRP- bzw. CRP-Balken werden an vier Punkten am Prüfstand gerüstet. An den äußeren Punkten ist der Balken in zwei beweglichen Lagern (5) eingespannt. Die Lager sind auf dem Fundament montiert. Die beiden inneren Punkte dienen der Kraftaufbringung, die durch ein Lastgeschirr (6) realisiert wird.

Aufgrund der geforderten Kräfte und Geschwindigkeiten bietet sich eine hydraulische Umsetzung an. Im Folgenden wird auf den daraus resultierenden Auslegungszielkonflikt bei der Dimensionierung des hydraulischen Systems eingegangen. Die Maximalkraft des Zylinders entspricht hierbei dem Produkt aus Kolbenfläche und maximalem Druck. Der erforderliche Pumpenvolumenstrom ergibt sich wiederum aus dem Produkt aus der maximal geforderten Geschwindigkeit und der Zylinderfläche. Da einerseits im statischen Versuch deutlich geringere Geschwindigkeiten als in dynamischen Tests und andererseits in dynamischen Versuchen nur etwa halb so große Kräfte wie im statischen Betrieb benötigt werden, ist es zweckmäßig, für die beiden Betriebsarten zwei unterschiedliche Zylinder einzusetzen. Auf diese Weise wird eine bedarfsgerechte Dimensionierung der Pumpe erreicht. Das Lastgeschirr kann entweder an den statischen Zylinder oder den dynamischen Zylinder montiert werden.

Ein besonderes Merkmal des Prüfstands ist sein innovatives und energieeffizientes Antriebskonzept. Statt einer konventionellen Servohydraulik wurde ein elektrohydraulisches Antriebskonzept implementiert. Dabei wird der Ölfluss nicht durch Servoventile gesteuert, sondern direkt über eine drehzahlgeregelte Pumpe, die von einem Servomotor angetrieben wird.

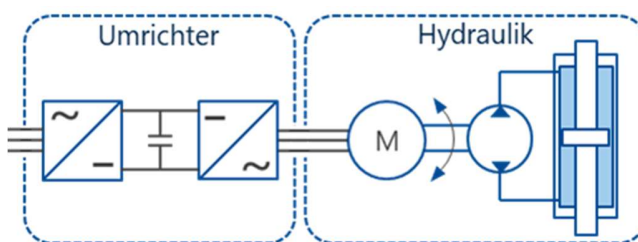


Abb. 3: Prinzip des elektrohydraulischen Antriebs

Das elektrohydraulische System basiert auf einer Radialkolbenpumpe, die von einem Servomotor angetrieben wird, der von einem Umrichter gesteuert wird. Die Zylinderbewegung entsteht durch das Umpumpen von Öl zwischen den beiden Zylinderkammern. Über die Pumpendrehzahl wird die Zylindergeschwindigkeit geregelt. Zur Kompensation von Leckagen und zur Erhöhung der Systemsteifigkeit wird der geschlossene hydraulische Kreis zwischen Pumpe und Zylinder mittels eines Hilfsaggregats vorgespannt. Das Prinzip ist in Abbildung 3 dargestellt.

Der Prüfstand wird weggeregelt betrieben. Hierzu ist in der übergeordneten Steuerung (Beckhoff SPS) ein Positionsregelkreis implementiert, der mittels eines PI-Reglers realisiert wird. Die Stellgröße des Reglers entspricht der vorgegebenen Soll Drehzahl der hydraulischen Pumpe. Abhängig vom jeweiligen Prüfling und dem gewählten Anregungspunkt ist eine Anpassung der Reglerparameter erforderlich. Um den Betrieb mit einem einheitlichen Parametersatz zu ermöglichen, ist am Prüfstand ein Amplitudenphasen-Regler implementiert. Dieser optimiert mithilfe eines Least Mean Square Algorithmus im Zeitbereich Phase und Amplitude des harmonischen PID-Sollsignals so, dass auch bei nicht optimal eingestellten PID-Parametern das Istsignal dem Sollsignal folgt [Kuo95].

3. Vergleich zwischen elektro- und servohydraulischer Umsetzung

In einem servohydraulischen System erzeugt ein Elektromotor (typischerweise eine asynchrone Maschine) einen Ölfluss mit einem konstanten Druck. Die Bewegung des Hydraulikzylinders wird mit einem Servoventil gesteuert. Das Ventil begrenzt den Ölfluss und lässt nur die Menge durch, die für die Zylinderbewegung benötigt wird. Die Energie des nicht für den Prozess genutzten Drucköls wird am Servoventil in Wärme umgewandelt. Diese hohen Energieverluste führen zu einem erheblichen Temperaturanstieg des Öls und macht somit ein zusätzliches Kühlsystem erforderlich. Dieses verbraucht selbst wiederum zusätzliche Energie. Außerdem kann jegliche Energie, die während der Belastung im Prüfling gespeichert wird, nicht zurückgewonnen werden.

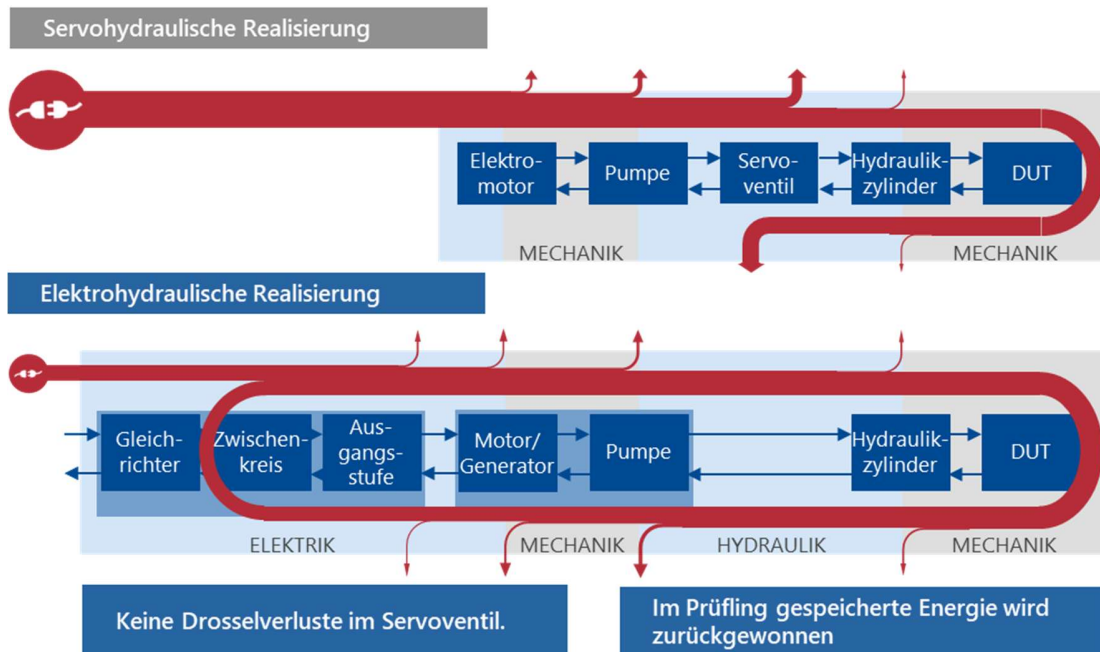


Abb. 4: Energiefluss eines elektrohydraulischen im Vergleich zu einem servohydraulischen Antrieb

Im Gegensatz dazu erzeugen elektrohydraulische Systeme den erforderlichen Volumenstrom direkt durch geschwindigkeitsgeregelter, hochdynamische Motorpumpeneinheiten. Dieser Ansatz bietet zwei große Vorteile in Bezug auf die Energieeffizienz. Zum einen entfallen die Drosselverluste am Servoventil. Zum anderen kann während der Entlastungsphase des Prüflings die während der Belastungsphase eingebrachte Verformungsenergie zurückgewonnen, vorübergehend elektrisch im Zwischenkreis gespeichert und für nachfolgende Belastungszyklen wiederverwendet werden. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Energieflüsse beider Antriebskonzepte. [HOF22]

3.1. Experimentelle Untersuchung

Die genannten Vorteile wurden durch Simulationen und Experimente untersucht. Der folgende Abschnitt stellt die Ergebnisse dar. Wie oben dargelegt, sind die Ergebnisse der Vierpunktbiegeversuche für die Entwicklung von Windturbinen-Rotorblättern von entscheidender Bedeutung. Deshalb mussten bereits während der Entwicklungs- und Umsetzungsphase des Prüfstands experimentelle Daten vorliegen.

Zu diesem Zweck führte die IABG im Auftrag von Nordex Versuche in einem Vorversuchsaufbau durch, bei dem möglichst viele bereits vorhandene Komponenten genutzt wurden. Am IABG-Standort standen eine Hydraulik-Öl-Versorgung, Zylinder verschiedener Baugrößen, unterschiedliche Servoventile sowie ein modular aufgebautes mechanisches System zur Verfügung. Daher wurde dieser temporäre Versuchsstand servohydraulisch realisiert. Der Versuchsaufbau war mit folgenden Messstellen ausgestattet: einer Positionsmessung mittels Kabelzug-Encoder, einer Kraftmessung am Zylinder mittels einer Kraftmessdose sowie Druck- und Durchflussmessungen in der Versorgungs- und Rücklaufleitung; zusätzlich wurden die Zylinderkammerdrücke aufgezeichnet. Die aus diesem Vorversuchsaufbau gewonnenen Daten ermöglichen einen experimentellen Vergleich beider Antriebskonzepte. Dieser Vergleich ist jedoch aus folgenden zwei Gründen eingeschränkt:

1. **Unterschiedliche Zylinderkonfigurationen bei den servohydraulischen Tests:** Bei der IABG standen Zylinder verschiedener Baugrößen zur Verfügung. Um den benötigten Volumenstrom zu minimieren, wurden die Zylindergrößen jeweils an die für den jeweiligen Test erforderlichen Kräfte angepasst. Dieses Vorgehen reduzierte die Testkosten. Im Gegensatz dazu verfügt der elektrohydraulische Prüfstand nur über einen einzigen Zylinder, der für sämtliche dynamischen Tests verwendet wird.
2. **Unterschiedliche Geschwindigkeitsauslegung:** Der elektrohydraulische Prüfstand ist für eine maximale Geschwindigkeit von 0,62 m/s ausgelegt. Die servohydraulischen Tests wurden hingegen mit fast doppelt so hohen Geschwindigkeiten (0,90 bzw. 1,10 m/s), durchgeführt, um die Versuchszeit zu verkürzen.

Um die beiden Ansätze vergleichen zu können, wird anstelle des Leistungsverbrauchs daher der Energieverbrauch pro Lastzyklus, gemessen in kW_s, betrachtet. Es wurden zwei Prüfserien durchgeführt: Eine mit einer Amplitude von 88 mm bei einer Frequenz von 2 Hz bzw. 1,3 Hz und eine mit einer Amplitude von 72 mm bei 2 Hz bzw. 1,6 Hz. Wie bereits erwähnt, war das servohydraulische System (Kolbenfläche des Zylinders 1909 mm²) für diesen einzelnen Lastfall optimiert, während der elektrohydraulische Prüfstand für einen breiteren Betriebsbereich ausgelegt ist (Kolbenfläche des Zylinders 8796 mm²). Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Experimentelle Ergebnisse

Test	Servohydraulik	Elektrohydraulik	Faktor
72.0 mm @ 2.0/1.6 Hz	30.0 kW _s	8.3 kW _s	3,7
88.0 mm @ 2.0/1.3 Hz	34.3 kW _s	10.2 kW _s	3,4

Im ersten Test verbrauchte der servohydraulische Prüfstand etwa das 3,7-fache an Energie gegenüber dem elektrohydraulischen Prüfstand. Im zweiten Test lag der Energiebedarf des servohydraulischen Systems immer noch bei rund dem 3,4-fachen des elektrohydraulischen Antriebssystems. Durch den Einsatz einer Elektrohydraulik, lassen sich bei einem angenommenen Strompreis 22 ct/kWh somit die Energiekosten für eine Testkampagne von 1 Million Zyklen von rund 2.000 € auf etwa 550 € senken. Würde das servohydraulische Testsystem dieselben Zylinderabmessungen besitzen wie der elektrohydraulische Prüfstand, wäre sein Energieverbrauch sogar noch höher. Damit wird klar, wie stark sich der Einsatz eines elektrohydraulischen Prüfstands in Bezug auf Energieeinsparungen und Kostensenkungen auszahlt.

3.2. Numerische Untersuchung

Da die experimentellen Daten nicht vollständig vergleichbar sind, wurde zusätzlich ein numerischer Vergleich durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden Modelle eines servohydraulischen und eines elektrohydraulischen Prüfstands entwickelt und anhand der gemessenen Daten kalibriert. Das servohydraulische Modell wurde in MATLAB Simulink erstellt (Abb. 5). Ein wesentlicher Vorteil dieses Modells besteht darin, dass es mit den Komponentendaten parametrisiert wird und somit mit Komponentendaten skaliert. Der Unterschied zwischen der simulierten und der gemessenen Leistungsaufnahme lag dabei zwischen -5,1 % und -7,7 %, also etwas unterhalb der tatsächlich gemessenen Werte. Der Energieverbrauch des elektrohydraulischen Systems wurde mit einem kombinierten Modell simuliert, bestehend aus einem MATLAB-basiertem Hydrauliksystemmodell und einem Pumpen-Leistungselektronikmodell des Herstellers. Die Simulationsergebnisse wurden anhand von Messdaten des Balkenprüfstands validiert. Die simulierte Leistungsaufnahme lag dabei 30 – 35 % unter den gemessenen Werten. Diese Abweichung lässt sich durch Ungenauigkeiten im Pumpen- und Energiemanagement-Modell erklären.

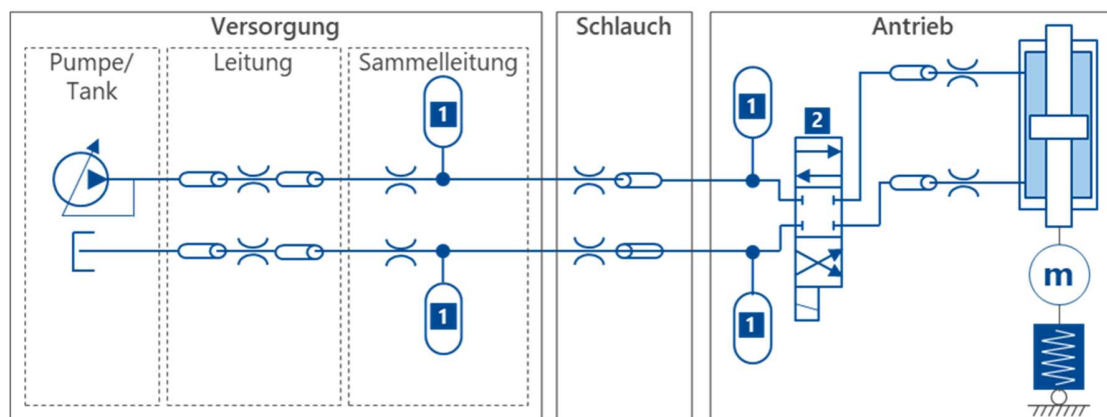


Abb. 5: Aufbau des Servohydraulischen Modells. (1) Hydraulikspeicher, (2) Servoventil

Abbildung 6 und 7 vergleichen den simulierten Energiebedarf der beiden Antriebskonzepte in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude für zwei Prüfproben: eine mit hoher Steifigkeit (800 kN/m, Abb. 6) und eine mit niedriger Steifigkeit (40 kN/m, Abb. 7). In beiden Fällen wurde ein modaler Dämpfungsgrad von 10 % angenommen. Die Diagramme stellen den Energiebedarf der Servohydraulik als Prozentsatz des elektrohydraulischen Bedarfs dar. In beiden Steifigkeitsszenarien weist das elektrohydraulische System den gleichen generellen Trend auf: Seine höchste Effizienz wird bei niedrigen Frequenzen und großen Amplituden erreicht. In diesem Bereich verbraucht die Servohydraulik bis zu 13-mal mehr Energie. Bei hohen Frequenzen und kleinen Amplituden benötigt die Servohydraulik dagegen weniger elektrische Energie. Der zusätzliche Energieaufwand für die Öl-Kühlung wurde hierbei allerdings nicht berücksichtigt. Bei dem nachgiebigeren Balken zeigen sich bei hohen Amplituden leicht höhere Energieeinsparungen.

Beide Balken wurden zusätzlich in einem repräsentativen Wöhlerstest mit einer Prüfungsdauer von zwei Wochen analysiert (vgl. Tabelle 2). Die Ergebnisse zeigen deutliche Energieeinsparungen: Das elektrohydraulische System reduziert den Energieverbrauch im Mittel um 89 % beim weichen und um 87 % beim steifen Balken. Wird dieser Einspareffekt in operative Kosten umgerechnet, ergeben sich bei einem Strompreis von 0,22 €/kWh und einer Testkampagne mit neun Prüflingen (Gesamt-Testdauer sechs Wochen) erhebliche Kostenvorteile – die Energiekosten sinken beim weichen Balken von 6.963 € auf 1.855 € bzw. beim steifen Balken von 7.591 € auf 1.481 €. Auf Basis dieser Werte lässt sich ein theoretisches jährliches Einsparpotenzial von bis zu 48.000 € ableiten, was das signifikante ökonomische Potenzial elektrohydraulischer Antriebssysteme in Langzeit-Ermüdungsprüfungen verdeutlicht.

Tabelle 2: Repräsentativer Wöhler-Balkentest. Beide Simulationen basierten auf Balken, deren Steifigkeit den gesamten Betriebsbereich des Prüfstands gut abdeckte.

Amp.	Freq.	Last- zyklen	Geringe Steifigkeit (40 kN/m)			Hohe Steifigkeit (800 kN/m)		
			Peak Force [kN]	Servo hyd. [kWh]	Elektro hyd. [kWh]	Spitzen- Kraft [kN]	Servo hyd. [kWh]	Elektro hyd. [kWh]
[mm]	[Hz]	[mio]						
100.00	1.00	1.00	4.00	31.46	6.99	80.00	27.67	8.98
130.00	0.75	0.10	5.20	85.50	9.70	104.00	88.21	11.59
160.00	0.50	0.01	6.40	139.73	12.43	128.00	149.45	14.49
Total:				256.70	29.12	Total:	265.00	35.05

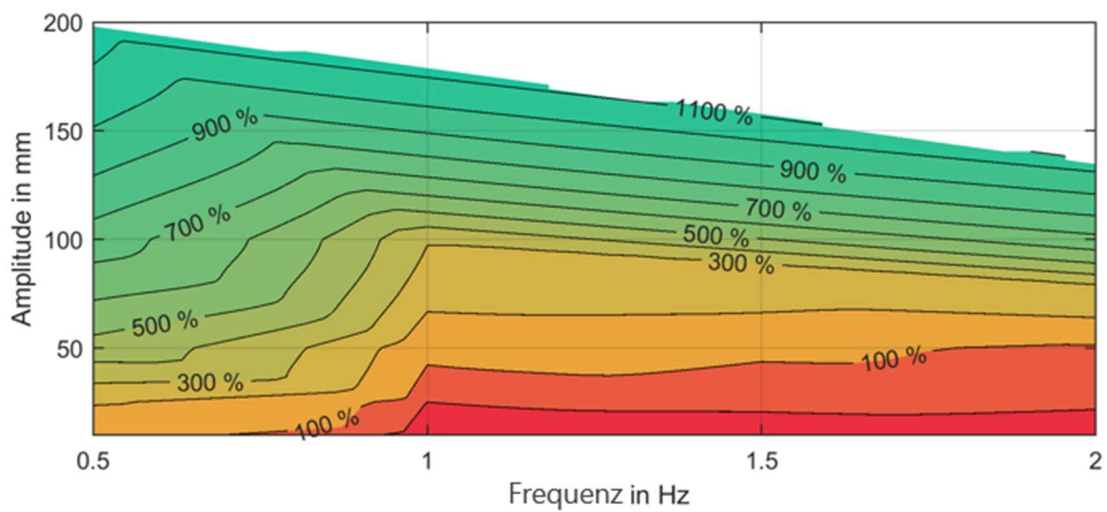


Abb. 6: Relativer Energieverbrauch eines servohydraulischen Antriebs im Vergleich zu einem elektrohydraulischen Antrieb in einem Testszenario mit hoher Steifigkeit (800 kN/m).

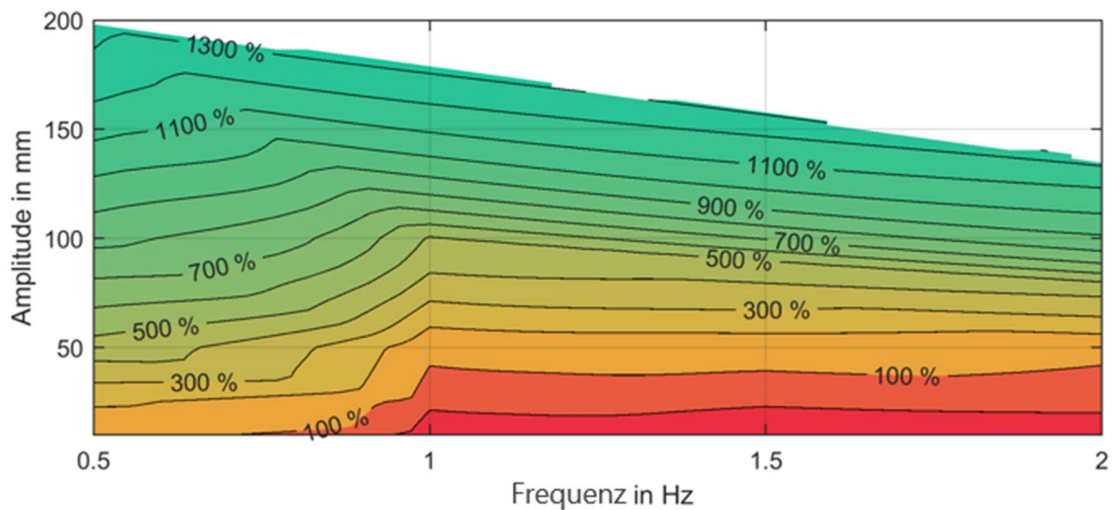


Abb. 7: Relativer Energieverbrauch eines servohydraulischen Antriebs im Vergleich zu einem elektrohydraulischen Antrieb in einem Testszenario mit geringer Steifigkeit (40 kN/m).

3.3. Interaktives Webtool zur Ermittlung der Energieeinsparung

Jede Prüfanwendung weist anwendungs- und systemspezifische Randbedingungen auf, sodass sich die Potenziale zur Reduzierung des Energiebedarfs und der Betriebskosten jeweils individuell zu betrachten sind. Zur quantitativen Abschätzung dieser Einsparpotenziale wurde ein interaktiver Energieeinsparungsrechner erstellt, mit dem sich der mögliche Nutzen des Einsatzes elektrohydraulischer Antriebstechnik im jeweiligen Prüffeld schnell und systematisch ermitteln lassen. Die zugrunde liegenden Leistungen werden dabei mittels analytischer Zusammenhänge berechnet und auf Basis gemessener Wirkungsgrade skaliert. Ein Teil des Webinterface wird in Abbildung 8 dargestellt.

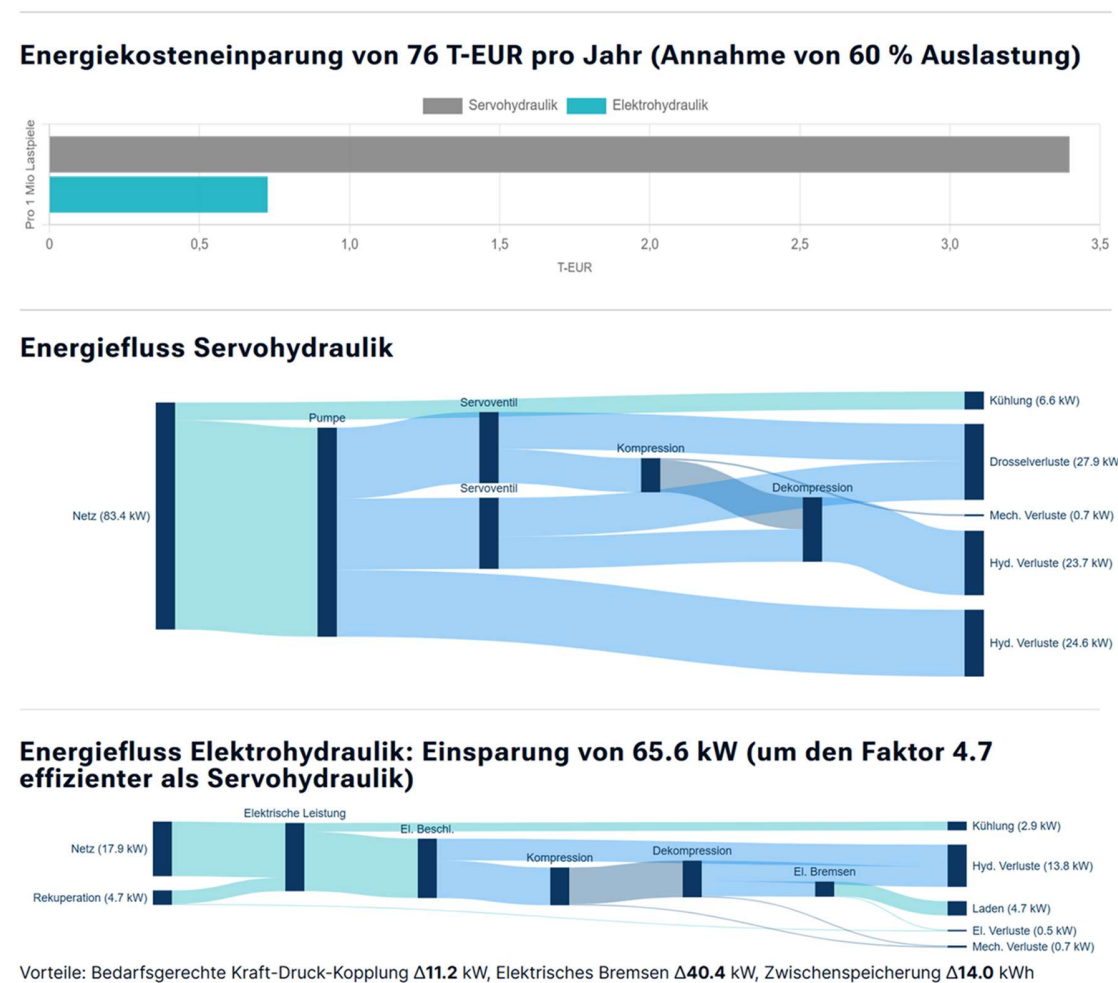


Abb. 8: Interaktives Webtool zur Berechnung der Energieeinsparung und Visualisierung der Energieflüsse.

In der Abbildung sind folgende Parameter abgebildet: Prüfling: Feder, Prüffrequenz: 1,5 Hz, Wegamplitude: 100 mm, Kraftamplitude: 20 kN, Mittelast: 40 kN.

Link: <https://www.iabg.de/leistungen/testen-qualifizieren/pruefstandsbau/elektrohydraulische-antriebe>

4. Diskussion und Ergebnis

Es wurde ein Prüfstand für die Qualifizierung von CFRP- (kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff) und CRP- (kohlefaserverstärkter Kunststoff) Materialien für Anwendungen in der Windenergiebranche entwickelt. Da die Proben nicht beliebig miniaturisiert werden können, werden sie auf bis zu 13 m lange Balsaholzträger laminiert und in einem Vier-Punkt-Biegeversuch untersucht. Die Versuche erfordern harmonische dynamische Lasten bis zu 200 kN und statische Belastungen bis zu 400 kN.

Zur Reduzierung der Betriebskosten ist der Prüfstand mit einem hocheffizienten elektrohydraulischen Antriebssystem ausgestattet, das die im Prüfling gespeicherte Energie zurückgewinnt und die hydraulischen Verluste im Vergleich zu konventionellen servohydraulischen Systemen minimiert. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass sich die Energiekosten gegenüber einem servohydraulischen Antrieb um etwa 70 % senken lassen. Ergänzende Simulationsstudien, in denen unterschiedliche Zylindergrößen analysiert wurden, ergeben ein rechnerisches Einsparpotenzial von bis zu 91 %. Überträgt man diese Ergebnisse auf eine typische Prüfkampagne mit zwei unterschiedlichen Balkensteifigkeiten, ergeben sich jährliche Energiekosteneinsparungen von bis zu 48.000 €.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das System insbesondere bei niedrigen Frequenzen und hohen Amplituden besonders energieeffizient ist und gegenüber einem konventionellen servohydraulischen Antrieb deutliche Einsparungen ermöglicht. Dieser Betriebsbereich ist für viele Dauer- und Ermüdungsprüfungen charakteristisch. Darüber hinaus lässt sich das Antriebskonzept auf weitere Prüfzenarien übertragen, in denen Energie aus der Bewegung zurückgewonnen werden kann. Dies umfasst Tests von elastischen Prüflingen mit großen Verformungen ebenso wie Anwendungen, bei denen große Massen durch sinusförmige Anregungen bewegt werden.

Insgesamt stellt das elektrohydraulische Antriebssystem ein effizientes Werkzeug zur Verkürzung von Entwicklungszyklen im Windenergiesektor dar, da es eine entwicklungsnahe Prüfung von Bauteilen und Werkstoffen ermöglicht. Gleichzeitig macht die signifikante Reduktion der Energiekosten langfristige Dauerlauf- und Ermüdungstests wirtschaftlich realisierbar.

Literatur

- [HOF22] Hoffmann, S.; Glauer, S.; Dany, S.; Schmidt, H.: Flexible und energieeffiziente Prüfsysteme für Dauerlaufprüfungen. Prüfmethodik für Betriebsfestigkeitsversuche in der Fahrzeug-industrie. DVM, Sindelfingen, 2022
- [Kuo95] Kuo, S. M.; Morgan, D.: Active noise control systems: Algorithms and DSP implementation. John Wiley & Sons, New York, 1995

Spezielle Regelungsverfahren für Dauerlauf-Prüfstände

Christian Perdok

TMX Solutions GmbH, Bachseifenweg 10, 61169 Friedberg, Deutschland

Zusammenfassung

Bei Dauerlauf-Prüfständen in der Material- und Komponentenprüfung werden häufig periodische Lastprofile vorgegeben, die über lange Zeiträume mit hoher Genauigkeit reproduziert werden müssen. Klassische Folgeregelungen stoßen hierbei aufgrund von Totzeiten, Stellgrößenbeschränkungen, Nichtlinearitäten und begrenzter Regelkreisbandbreite an ihre Grenzen, insbesondere bei dynamischen Sollwertverläufen.

In diesem Beitrag wird ein spezielles Regelungsverfahren zur exakten Nachbildung periodischer Sollwertvorgaben vorgestellt, das die Wiederholbarkeit der Belastungszyklen gezielt ausnutzt. Der Ansatz basiert auf einer frequenzbereichsbasierten, repetitiven Regelung, bei der die Abweichung zwischen Soll- und Istsignal periodenweise erfasst, spektral analysiert und mit dem inversen Frequenzgang der Regelstrecke bewertet wird. Durch Rücktransformation und iterative Integration der Korrektursignale wird eine nahezu fehlerfreie Sollwertfolge innerhalb eines definierten Frequenzbereichs erreicht.

Das Verfahren erlaubt eine deutliche Erweiterung des effektiven Übertragungsbereichs gegenüber konventionellen Reglerstrukturen und kompensiert gleichzeitig periodische Störungen gleicher oder vielfacher Grundfrequenz. Voraussetzungen, Grenzen der Anwendbarkeit sowie Anforderungen an Messkette, Rechenplattform und Echtzeitfähigkeit werden diskutiert.

Nomenklatur

A – Amplitude

f – Frequenz

f_0 – Grundfrequenz des periodischen Sollsignals

$G(j\omega)$ – Frequenzgang der Regelstrecke

$G^{-1}(j\omega)$ – Inverser Frequenzgang der Regelstrecke

j – Imaginäre Einheit

k – Index des Regelschrittes

N – Anzahl der Abtastwerte pro Periode

T – Periodendauer des Sollsignals

t – Zeit

u(t) – Eingangssignal der Regelstrecke

$u_{j,k}$ – j-te komplexe spektrale Komponente des Eingangssignals im k-ten Regelschritt

x(t) – Ausgangsgröße der Regelstrecke

$x_{j,k}$ – j-te komplexe spektrale Komponente der Ausgangsgröße im k-ten Regelschritt

Spezielle Regelungsverfahren für Dauerlauf-Prüfstände

$r(t)$ – Sollsignal

r_j – j -te komplexe spektrale Komponente des Sollsignals

$e(t)$ – Regeldifferenz

K_j – Komplexe Reglerverstärkung für die j -te spektrale Komponente

ω – Kreisfrequenz

FFT – Schnelle Fourier-Transformation

iFFT – Inverse schnelle Fourier-Transformation

1. Einleitung

Dauerlauf-Prüfstände werden in der Material-, Komponenten- und Systemprüfung eingesetzt, um das Ermüdungsverhalten unter realitätsnahen, zyklischen Belastungen zu untersuchen. Die hierbei vorgegebenen Lastprofile weisen häufig einen periodischen Charakter auf oder wiederholen sich synchron zu einem Triggerereignis, beispielsweise in Abhängigkeit vom Drehwinkel rotierender Komponenten. Für die Aussagekraft und Reproduzierbarkeit der Versuche ist eine möglichst exakte Nachbildung dieser Sollwertverläufe über lange Zeiträume erforderlich.

Die Umsetzung solcher periodischer Lastvorgaben stellt hohe Anforderungen an die Regelungstechnik. Klassische Folgeregelungen stoßen insbesondere bei dynamischen Sollwertverläufen an ihre Grenzen, da Totzeiten, Stellgrößenbeschränkungen, Nichtlinearitäten sowie eine begrenzte Regelkreisbandbreite eine ausreichende Genauigkeit verhindern. Eine Erhöhung der Regelbandbreite ist in der Praxis häufig nicht möglich, da bereits moderate Totzeiten zu erheblichen Phasenverzögerungen führen und damit die Stabilitätsreserven des geschlossenen Regelkreises einschränken. Infolgedessen kann das Sollsignal nur in einem begrenzten Frequenzbereich mit hinreichender Genauigkeit übertragen werden.

Liegt die Sollwertvorgabe jedoch in periodischer Form vor, eröffnet sich die Möglichkeit, die Wiederholbarkeit der Belastungszyklen gezielt für die Regelung auszunutzen. Anstatt ausschließlich auf eine Echtzeitkorrektur innerhalb einer Periode zu setzen, kann das Regelungssystem aus den Abweichungen vergangener Perioden lernen und das Eingangssignal iterativ so anpassen, dass das resultierende Ausgangssignal der gewünschten Vorgabe zunehmend genauer folgt. Auf diese Weise lassen sich systematische Abweichungen, beispielsweise infolge von Totzeiten oder frequenzabhängiger Dämpfung, gezielt kompensieren.

Ziel dieses Beitrags ist die Vorstellung und Analyse eines speziellen Regelungsverfahrens zur exakten Nachbildung periodischer Sollwertvorgaben auf Dauerlauf-Prüfständen. Der vorgestellte Ansatz basiert auf einer frequenzbereichsbasierten repetitiven Regelung, bei der die Regeldifferenz periodenweise ausgewertet und mit dem inversen Frequenzgang der Regelstrecke bewertet wird. Es werden die Herleitung des Verfahrens, die Stabilitätsbedingungen und praktische Aspekte der Umsetzung auf realen Prüfständen dargestellt.

2. Prüfstandsbeschreibung und Methodik

2.1 Prüfstand und Systemannahmen

Der betrachtete Anwendungsfall ist ein Dauerlauf-Prüfstand zur Erzeugung periodischer Lastprofile, wie sie typischerweise in der Materialprüfung mit hydraulischen oder elektromechanischen Aktuatoren auftreten. Die Regelstrecke umfasst die Aktoren, die mechanische Struktur des Prüflings sowie die Sensorik zur Erfassung der relevanten Ausgangsgröße, beispielsweise Kraft, Weg oder Beschleunigung.

Für die nachfolgende Herleitung wird angenommen, dass sich das Gesamtsystem im betrachteten Frequenzbereich näherungsweise linear und zeitinvariant verhält. Nichtlinearitäten, Sättigungen und Reibungseffekte sind zwar vorhanden, werden jedoch als hinreichend klein vorausgesetzt, sodass sie die stationäre periodische Antwort nicht dominieren. Weiterhin wird angenommen, dass das System für die betrachteten Frequenzen stabil ist und sich nach jeder Periode ein stationärer Zustand einstellt.

Die Sollwertvorgabe besteht aus einem periodischen Signal mit bekannter Periodendauer, dessen spektrale Anteile auf einen definierten Frequenzbereich begrenzt sind. Alternativ kann die Periodizität durch ein externes Triggerereignis, beispielsweise einen Drehwinkel, synchronisiert sein.

2.2 Grundidee der frequenzbasierten repetitiven Regelung

Wird ein stabiles lineares System mit einem periodischen Eingangssignal beaufschlagt, stellt sich nach dem Abklingen der Einschwingvorgänge eine stationäre periodische Ausgangsgröße ein. Diese unterscheidet sich von der Sollvorgabe in Amplitude und Phase entsprechend dem Frequenzgang der Regelstrecke.

Da die einzelnen spektralen Komponenten eines periodischen Signals voneinander unabhängig übertragen werden, kann jede Frequenzkomponente separat betrachtet werden. Für jede dieser Komponenten lässt sich eine iterative Korrektur formulieren, welche die Abweichung zwischen Soll- und Istwert über aufeinanderfolgende Perioden reduziert. Im stationären Fall stellt sich die Regelstrecke für jede spektrale Komponente als komplexer Verstärkungsfaktor dar, sodass die Regelung keine zusätzliche Dynamik aufweist.

Auf dieser Grundlage wird eine iterative Regelung im Frequenzbereich formuliert, bei der die komplexen spektralen Komponenten der Regeldifferenz als Zustandsgrößen betrachtet werden. Unter der Voraussetzung, dass das System nach jeder Iteration eingeschwungen ist, ergibt sich ein einfaches lineares Iterationsgesetz, aus dem sowohl Stabilitätsbedingungen als auch optimale Reglerparameter direkt abgeleitet werden können.

2.3 Mathematische Beschreibung des iterativen Regelalgorithmus

Zunächst soll der einfache Fall betrachtet, dass bei einem linearen System die Ausgangsgröße einem periodischen Vorgabesignal folgen soll. Das Vorgabesignal soll dabei lediglich in einem definierten Frequenzbereich spektrale Komponenten enthalten. Nimmt man vorläufig an, dass das betrachtete System stabil ist, so wird sich bei einer periodischen Eingangsgröße, nach dem Abklingen der Einschwingvorgänge, eine stationäre, periodische Ausgangsgröße einstellen. Die spektralen Komponenten der Ausgangsgröße unterscheiden sich dabei in Betrag und Phase von der Eingangsgröße. Es wird deshalb jede Komponente einzeln betrachtet, die mit der komplexen Verstärkung des Frequenzgangs bei der betrachteten Frequenz übertragen wird. Da jede Komponente von jeder, mit einer anderen Frequenz, unabhängig ist, kann für jede einzeln exakt auf die Sollwertvorgabe mit einem einfachen I-Regler geregelt werden. Zu beachten ist dabei jedoch, dass sich die Regelung auf den (komplexen) Wert der Komponente bezieht und das Zeitsignal als sinusförmiges Signal phasenrichtig erzeugt werden muss.

mit

S^j der j^{ten} (komplexen) Komponente der Sollwertvorgabe;

Spezielle Regelungsverfahren für Dauerlauf-Prüfstände

G^j der Wert des Frequenzganges bei der j -fachen Basisfrequenz

X_k^j der j^{ten} (komplexen) Komponente des Reglerausganges nach dem k^{ten} Regelschritt

Y_k^j der j^{ten} (komplexen) Komponente der Ausgangsgröße nach dem k^{ten} Regelschritt

V^j der komplexen Reglerverstärkung für die j^{te} (spektrale) Komponente

Lässt sich das zu betrachtende Regelungssystem formulieren als:

$$Y_k^j = G^j X_k^j; \quad X_{k+1}^j = X_k^j + V^j(S^j - Y_k^j) = X_k^j + V^j(S^j - G^j X_k^j) \quad (1)$$

Und damit für die Ausgangsgröße

$$Y_{k+1}^j = (1 - V^j G^j) Y_k^j + V^j G^j S^j \quad (2)$$

Bezüglich der zu regelnden Größe stellt sich die Regelstrecke als einfacher Faktor ohne weitere Dynamik dar. Es ist also zu beachten, dass die Gleichungen (1) und (2) nur gelten, wenn stationäre Verhältnisse vorliegen und deshalb das System nach jedem Regelschritt eingeschwungen sein muss.

Die Lösung für den k^{ten} Schritt erhält man durch fortlaufendes Einsetzen:

$$\underline{Y}_{k+1} = (1 - V_\omega G_\omega)^{k+1} \underline{Y}_0 + \sum_{i=0}^k (1 - V_\omega G_\omega)^i V_\omega \underline{S}_k \quad (3)$$

Für eine konstante Eingangsgröße kann man die geschlossene Lösung angeben

$$\underline{Y}_{k+1} = (1 - V_\omega G_\omega)^{k+1} \underline{Y}_0 + (1 - (1 - V_\omega G_\omega)^k) \underline{S} \quad (4)$$

Als Endwert ergibt sich die gewünschte Lösung

$$\underline{Y}_\infty = \underline{S} \quad (5)$$

Damit lässt sich die Stabilitätsbedingung: $0 < |(1 - V_\omega G(j\omega))| < 1$ direkt ablesen. (6a)

Für ein ideales Einschwingen in einem Schritt (Dead-Beat-Verhalten) führt die Wahl von

$$\underline{V}_\omega = \frac{1}{G(j\omega)} \quad (6b)$$

offensichtlich zum Ziel. Es muss beachtet werden, dass es sich bei der Regelstrecke um ein **stabiles System** handeln muss. Die Kompensation kann bis zu einer Frequenz durchgeführt werden bei der die Übertragungsfunktion (insbesondere die Phase) ausreichend genau erfasst werden kann.

Das folgende Bild zeigt die Regelschritte bei einer einfachen sinusförmigen Vorgabe und einer gewählten Verstärkung von $V^j = 0.6 \frac{1}{G^j}$. Zur Verdeutlichung wird angenommen, dass die Berechnung der Korrektur in beliebig kurzer Zeit erfolgen kann und nach einer halben Periode stationäre Verhältnisse vorliegen.

Spezielle Regelungsverfahren für Dauerlauf-Prüfstände

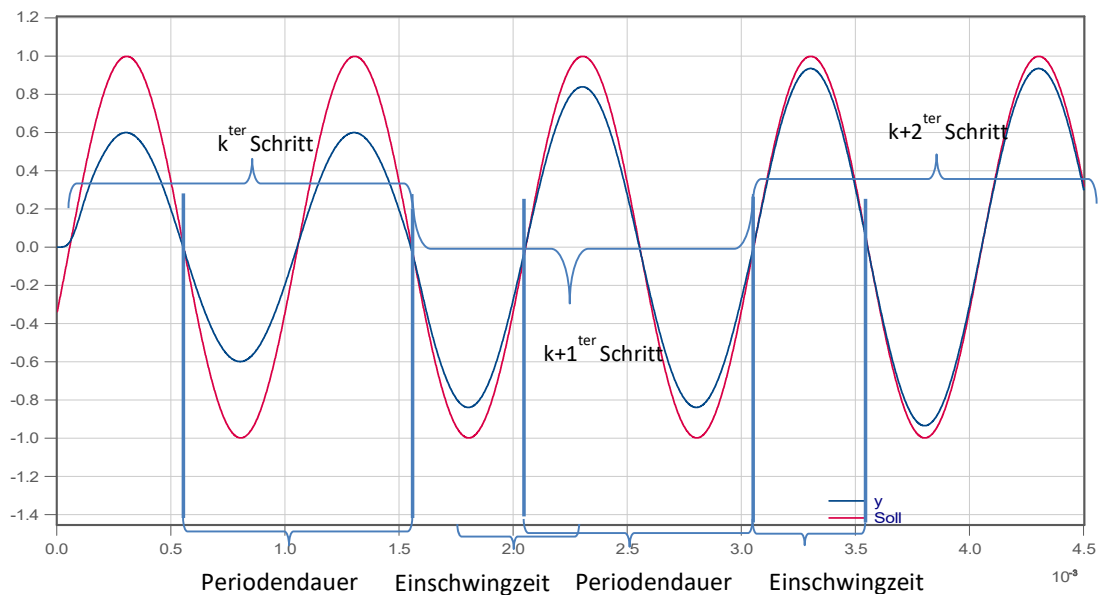


Abb. 1

Durch die Wahl des Verstärkungsfaktors wird die Gl(2) zu einem System mit reellen Koeffizienten, so dass sich in jedem Schritt lediglich die Amplitude des Zeitsignals ändert.

Die vorgestellte Beschreibung bildet die theoretische Grundlage für die im nächsten Abschnitt erläuterte praktische Implementierung des Regelverfahrens im Frequenzbereich.

2.4 Praktische Umsetzung des Kompensationsgliedes

Die praktische Realisierung des Regelverfahrens erfolgt periodenweise im Frequenzbereich. Nach Abschluss einer oder mehrerer Perioden wird die Regeldifferenz zwischen Soll- und Istsignal erfasst und mittels schneller Fourier-Transformation in den Frequenzbereich überführt.

Alle spektralen Anteile oberhalb einer definierten Grenzfrequenz werden unterdrückt, da der Frequenzgang der Regelstrecke in diesem Bereich nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann. Die verbleibenden spektralen Komponenten werden mit dem inversen Frequenzgang der Regelstrecke bewertet und anschließend durch eine inverse Fourier-Transformation wieder in den Zeitbereich überführt. Das resultierende Korrektursignal wird zu den zuvor gespeicherten Reglerwerten addiert und in der nächsten Periode als Eingangssignal ausgegeben.

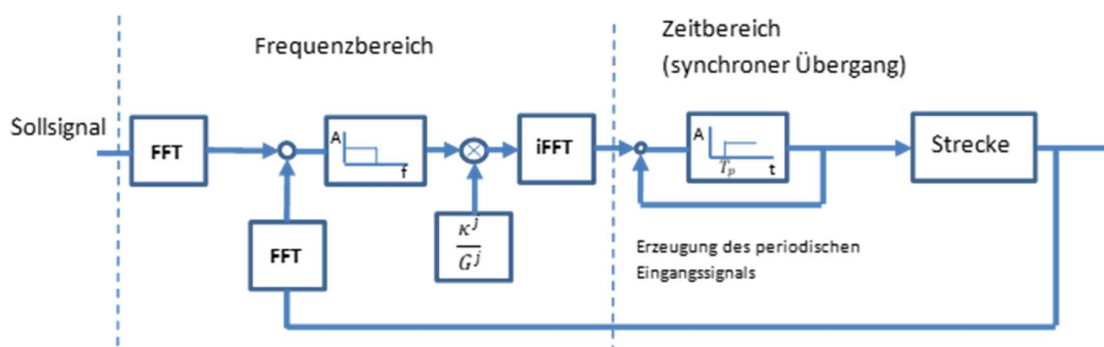


Abb. 2

Spezielle Regelungsverfahren für Dauerlauf-Prüfstände

Zur Vermeidung von spektraler Leakage ist sicherzustellen, dass die Anzahl der Abtastwerte pro Periode einer Zweierpotenz entspricht und die Abtastung exakt synchron zur Periodendauer erfolgt. Alternativ muss der Algorithmus mit einer Interpolation auf eine Zweierpotenz ausgestattet werden. Die Korrekturwerte des Frequenzganges müssen genau für die diskreten Frequenzen der FFT vorliegen.

2.5 Anforderungen an Messkette und Hardware

Die Umsetzung des beschriebenen Regelverfahrens stellt spezifische Anforderungen an die eingesetzte Hardware und Messkette. Die Sensorik muss über eine ausreichende Bandbreite verfügen und eine stabile Phasenlage im betrachteten Frequenzbereich aufweisen. Phasenfehler wirken sich unmittelbar auf die Wirksamkeit der Kompensation aus.

Für die Datenerfassung ist eine äquidistante Abtastung aller Prozessgrößen erforderlich. Dies ermöglicht eine konsistente Analyse der Signale und die Durchführung spektraler Verfahren. Die Rechenplattform muss in der Lage sein, Fourier-Transformationen (FFT) sowie inverse Fourier-Transformationen (IFFT) in Echtzeit durchzuführen und Berechnungen für Schrittketten online zu unterstützen.

Darüber hinaus muss die Soll-Ist-Differenz für jeden Abtastzeitpunkt online berechnet werden. Alle Abtastwerte sowie die berechneten Soll-Ist-Differenzen sind in einem zyklischen Speicher für mindestens eine vollständige Periode der Signale zwischenspeichern, um eine nachträgliche Auswertung und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Die zeitliche Synchronisation zwischen Datenerfassung, Signalverarbeitung und Aktoransteuerung ist entscheidend, um die deterministische Ausführung der Berechnungen sicherzustellen. Solche Anforderungen werden typischerweise durch Echtzeit-PCs, PXI-Systeme oder FPGA-basierte Lösungen erfüllt.

3. Ergebnisse

3.1 Versuchs- und Demonstratoraufbau

Zur qualitativen Bewertung des vorgestellten Regelverfahrens wurde ein Demonstratorprüfstand aufgebaut, der typische Eigenschaften realer Dauerlauf-Prüfstände abbildet. Der Aufbau besteht aus zwei linear geführten elektromechanischen Antrieben, die mechanisch gegeneinander gekoppelt sind.

Der erste Antrieb dient zur Vorgabe eines periodischen Wegprofils und fungiert als Führungssachse. Der zweite Antrieb erzeugt eine Gegenkraft, die abhängig vom relativen Wegverlauf geregelt wird. Auf diese Weise lässt sich ein wegabhängiges Kraftprofil realisieren, wie es beispielsweise bei Material- oder Komponentenprüfungen mit nichtlinearem Steifigkeitsverhalten auftritt.

Der Demonstrator erlaubt die getrennte Betrachtung von Führungs- und Lastregelung und eignet sich damit zur qualitativen Analyse des Konvergenzverhaltens sowie der Störunterdrückung des vorgeschlagenen Regelverfahrens. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf normierten Signalverläufen und dienen der Veranschaulichung der prinzipiellen Wirkungsweise.

3.2 Qualitatives Konvergenzverhalten über aufeinanderfolgende Perioden

Zur Beurteilung der Regelgüte wird die normierte Regeldifferenz zwischen Soll- und Istsignal über aufeinanderfolgende Perioden betrachtet. Ausgangspunkt ist eine initiale Sollwertvorgabe ohne vorherige Kompensation, bei der sich aufgrund der frequenzabhängigen Eigenschaften der Regelstrecke deutliche Amplituden- und Phasenabweichungen einstellen.

Spezielle Regelungsverfahren für Dauerlauf-Prüfstände

Mit Aktivierung der frequenzbasierten repetitiven Regelung wird die Regeldifferenz periodenweise ausgewertet und zur Korrektur des Eingangssignals genutzt. Qualitativ zeigt sich eine monotone Abnahme der normierten Abweichung mit jeder Iteration. Bereits nach wenigen Perioden ist eine deutliche Annäherung an die Sollvorgabe erkennbar.

Die Konvergenz erfolgt dabei frequenzselektiv: Spektrale Anteile innerhalb der definierten Übertragungsbandbreite werden effektiv kompensiert, während höherfrequente Anteile unverändert bleiben. Dieses Verhalten entspricht der theoretischen Herleitung und bestätigt die Wirksamkeit der frequenzselektiven Iteration.

3.3 Frequenzselektive Fehlerreduktion

Zur weiteren qualitativen Analyse wird die Regeldifferenz im Frequenzbereich betrachtet. Die normierten Amplituden der spektralen Komponenten zeigen, dass insbesondere die Harmonischen der Grundfrequenz innerhalb des definierten Arbeitsbereichs sukzessive reduziert werden.

Die Regelung bewirkt eine gezielte Korrektur derjenigen Frequenzanteile, für die der Frequenzgang der Regelstrecke hinreichend genau bekannt ist. Außerhalb dieses Bereichs bleiben die spektralen Komponenten unverändert, was zur Stabilität des Gesamtverfahrens beiträgt.

Dieses frequenzselektive Verhalten stellt einen wesentlichen Unterschied zu klassischen zeitkontinuierlichen Reglerstrukturen dar, bei denen eine Erhöhung der Regelgüte typischerweise mit einer Erweiterung der geschlossenen Bandbreite einhergeht und somit Stabilitätsreserven reduziert.

3.4 Unterdrückung periodischer Störungen

Ein weiterer qualitativer Effekt des vorgeschlagenen Regelverfahrens ist die Unterdrückung periodischer Störungen mit gleicher oder ganzzahliger Vielfachfrequenz der Sollvorgabe. Solche Störungen treten in Prüfständen häufig auf, beispielsweise durch rotierende Maschinen oder periodisch wirkende Nebenaggregate.

Da diese Störungen ebenfalls als spektrale Komponenten im Frequenzbereich erscheinen, werden sie von der iterativen Korrektur erfasst und kompensiert. Im stationären Zustand ergibt sich für diese Frequenzanteile eine vollständige oder weitgehende Unterdrückung der Störeinflüsse, sofern sie innerhalb der betrachteten Bandbreite liegen.

4. Diskussion

Die qualitativen Ergebnisse bestätigen die theoretisch hergeleiteten Eigenschaften der frequenzbasierten repetitiven Regelung. Insbesondere zeigt sich, dass durch die Nutzung der Periodizität eine nahezu vollständige Kompensation der spektralen Sollwertanteile innerhalb eines definierten Frequenzbereichs möglich ist, ohne die Stabilitätsgrenzen des zeitkontinuierlichen Regelkreises zu überschreiten.

Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens liegt in der Trennung zwischen Echtzeitregelung innerhalb einer Periode und iterativer Korrektur über mehrere Perioden. Dadurch können systematische Abweichungen, die durch Totzeiten, Phasenverzögerungen oder frequenzabhängige Dämpfung verursacht werden, gezielt ausgeglichen werden.

Die Wirksamkeit des Ansatzes ist jedoch an mehrere Voraussetzungen geknüpft. Neben einer hinreichend genauen Kenntnis des Frequenzganges der Regelstrecke sind eine präzise zeitliche Synchronisation sowie eine konsistente Abtastung der Signale erforderlich. Phasenfehler in der Messkette wirken sich unmittelbar auf die Qualität der Kompensation aus und begrenzen die maximal nutzbare Bandbreite.

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf einem vereinfachten Demonstratoraufbau und normierten Signalverläufen. Eine quantitative Bewertung unter realen Prüfstandsbedingungen erfordert weiterführende Messreihen, die derzeit

aufgebaut werden. Industrielle Anwendungen des Verfahrens bestätigen die prinzipielle Praxistauglichkeit, können jedoch aus Gründen der Vertraulichkeit nicht dargestellt werden.

5. Schlussfolgerung

In diesem Beitrag wurde ein frequenzbereichsbasiertes repetitives Regelungsverfahren zur exakten Nachbildung periodischer Sollwertvorgaben auf Dauerlauf-Prüfständen vorgestellt. Durch die iterative Korrektur der spektralen Komponenten wird eine gezielte Kompensation systematischer Abweichungen aufgrund von Totzeiten, frequenzabhängiger Dämpfung und Phasenverschiebungen ermöglicht. Das Verfahren nutzt dabei die Wiederholbarkeit der Perioden gezielt aus und trennt die Echtzeitregelung innerhalb einer Periode von der übergeordneten, iterativen Korrektur.

Für die erfolgreiche Umsetzung ist eine hinreichend genaue Kenntnis der Regelstrecke erforderlich. Häufig wird diese über eine messtechnische Ermittlung des Frequenzgangs gewonnen. Das zugrundeliegende Mess-, Steuer- und Regelsystem sollte eine Bedienoberfläche mit automatischer Auswertesequenz bereitstellen, sodass der Frequenzgang als Datensatz (z. B. aufgeteilt in Real- und Imaginärteil) während der Inbetriebnahme gemessen, gespeichert und direkt im System verwendet werden kann.

Die erzielte Regelgüte übertrifft die einer klassischen zeitbasierten Regelung deutlich, insbesondere innerhalb des definierten Frequenzbereichs. Darüber hinaus erlaubt das Verfahren eine frequenzselektive Unterdrückung periodischer Störungen, ohne die Stabilität des Gesamtregelkreises zu beeinträchtigen.

Ein vielversprechender Ausblick liegt in der Erweiterung des Algorithmus auf andere Prüfstandplattformen und mehrachsige Systeme. Weiterhin können adaptivere Ansätze oder die Kombination mit nichtlinearen Regelstrategien die Bandbreite und Anwendbarkeit des Verfahrens in der Praxis noch erhöhen.

Danksagung

Ein großes Dankeschön geht an Dr. Franz Hillenbrand für die Unterstützung bei der Ausarbeitung.

Literatur

- [1] Robust Repetitive Control and Applications, Edi Kurniawan
- [2] Digital Repetitive Control under Varying Frequency Conditions, Ramos, Costa Castelló, Olm

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

Michael Ruthrof, Sebastian Pflaum

red-ant GmbH, Taunusstrasse 51, 80807 München, Deutschland

Zusammenfassung

Die Früherkennung mechanischer Schäden an Antriebsstrangkomponenten wie Lagern und Verzahnungen spielt eine zentrale Rolle bei der Vermeidung von Folgeschäden während Prüfstandsversuchen. Durch eine rechtzeitige Identifikation von Schadensmechanismen, beispielsweise Verzahnungspitting oder Lagerschäden, kann der Prüfling vor weiteren Folgeschäden geschützt werden. Dies ermöglicht den gezielten Austausch der betroffenen Komponenten, während intakte Bauteile weiterhin genutzt werden können. Auf diese Weise lassen sich aus einem einzelnen Prüfling deutlich umfassendere Erkenntnisse gewinnen, als dies bei einem frühzeitigen Totalausfall möglich wäre. In diesem Beitrag wird ein praxiserprobtes Verfahren zur Schadensfrüherkennung vorgestellt, das Körperschallmessungen, Ordnungsanalysen und Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) kombiniert.

Nomenklatur

mA – Milli-Ampere, Stromstärke

Hz – Hertz, Frequenz

kHz – Kilohertz, Frequenz

MHz – Mega Hertz, Frequenz

NVH – Noise Vibration Harshness

g rms – Beschleunigung als Effektivwert $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$

m/s – Meter pro Sekunde, Geschwindigkeit

m/s² – Meter pro Sekunde im Quadrat, Beschleunigung

ms – Milli-Sekunden, Zeit

ZEO – Zahneingriffs Ordnung

WO – Wellen Ordnung

AM – Amplituden Modulation

FM – Frequenz Modulation

SBWO – Seitenbänder des Zahneingriffs durch AM/FM

1. Einleitung

In den letzten Jahren wurden zunehmend datengetriebene Ansätze entwickelt, die Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) nutzen, um Muster in großen Datenmengen zu erkennen und die Diagnose zu automatisieren. Insbesondere maschinelles Lernen ermöglicht die Klassifikation von Schadenszuständen und die Prognose von Ausfallwahrscheinlichkeiten. Dennoch besteht weiterhin die Herausforderung, robuste Modelle zu entwickeln, die auch bei der Prototypen Entwicklung unter variierenden Last- und Drehzahlbedingungen zuverlässig arbeiten.

1.1 Stand der Technik

Klassische Zustandsüberwachung stützt sich auf Schwingungsanalysen, die aus Zeitsignalen mittels FFT in Frequenzspektren überführt werden und mit bekannten kinematischen Erregerfrequenzen verglichen werden. Bei drehzahlvariablen Prüfabläufen stößt die reine Spektralanalyse jedoch an Grenzen (Verschmieren/Verzerren der Linien), weshalb Ordnungsanalyse (Order Tracking) als drehzahlreferenzierte Auswertung etabliert ist [1,2]: sie hält drehzahlharmonische Komponenten trotz Geschwindigkeitsänderungen auf konstanten „Ordnungen“ und erleichtert die Zuordnung zu Fehlerursachen (Unwucht, Ausrichtfehler, Zahneingriffsordnung, etc.).

Für die praktische Umsetzung existieren robuste Workflows und Software-Toolchains (z. B. DEWETRON/Dewesoft [3] MATLAB-Beispiele [4]), die die Winkelreferenz (Tachometer/Encoder) und die winkel-synchrone Segmentierung pro Umdrehung beschreiben.

Zur Bewertung von Maschinenzuständen liefern die ISO-Normen der Reihe 20816 allgemeine Richtlinien zur Messung und Bewertung von Maschinenvibrationen (u. a. RMS-Geschwindigkeit auf Gehäusen und p-p-Schwingweg an Wellen), wobei die Kriterien sowohl für Betriebsüberwachung als auch Abnahmetests formuliert sind [5]. ISO 20816-1:2016 ersetzt die älteren Grundlagnormen (ISO 10816-1, ISO 7919-1) und vereinheitlicht die Messphilosophien für Gehäuse- und Wellenmessungen.

Für die Schadensklassifikation von Wälzlagern ist ISO 15243:2017 maßgeblich; sie beschreibt Erscheinungsbilder, charakteristische Merkmale und häufige Ursachen (z. B. Ermüdung, Graufleckigkeit/Micropitting, Korrosion, Verschleiß) und unterstützt die visuelle Befundung [6].

Bei Getrieben gilt die Kombination aus Time Synchronous Averaging (TSA) und Ordnungsauswertung als Best-Practice [7,8]: TSA extrahiert periodische Signaturen synchron zu einer Referenzwelle, unterdrückt asynchrone Anteile und erhöht die Empfindlichkeit gegenüber Zahneingriffsmodulation und Seitenbändern; aktuelle Arbeiten zeigen zudem tacholose TSA-Varianten, die die Phaseninformation aus Beschleunigungssignalen rekonstruieren—wichtig bei schwer zugänglichen Prüfständen.

Die Leistungsfähigkeit verschiedener TSA-Algorithmien zur Zahnschadendetektion ist systematisch untersucht; die Rauschreduktion folgt näherungsweise $1/\sqrt{N}$ über die Anzahl gemittelter Umdrehungen, und frequenzdomänen-TSA zeigt häufig die höchste Sensitivität.

Körperschall/Acoustic Emission (AE) bietet für frühe Pitting-Initiation Vorteile durch seine hohe Bandbreite (typisch > 50 kHz) und Impuls-Sensitivität; Studien an Stirnradgetrieben berichten, dass AE-Sensorik Pitting Stunden vor offen sichtbarem Versagen detektieren kann, während klassische Beschleunigungsaufnehmer begrenzt sind.

Neuere Reviews zu AE in Getrieben betonen die Fortschritte, aber auch den Bedarf an standardisierten Auswerteprozessen und Modellen (z. B. Lubrikationseinfluss), was die Kombination mit bewährter Vibrations-/Ordnungsanalyse sinnvoll macht. [9,10]

Für Wälzlager ist die Hüllkurvenanalyse (Envelope, Hilbert-Demodulation) ein klassisches und weiterhin hochwirksames Werkzeug zur Extraktion von Stoßimpulsfolgen und deren charakteristischen Fehlerfrequenzen (Außenring/Innenring/Käfig/Rolle). Zeitnahe Arbeiten kombinieren Hüllkurvenmerkmale mit ML-Klassifikatoren oder verbessern die Demodulationskette (z. B. Teager-Operator, spektrale Kurtosis) und zeigen sehr hohe Genauigkeiten auf Benchmark-Datensätzen. [11,12]

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

Datengetriebene Ansätze auf Basis von Maschinellem Lernen und Deep Learning ergänzen die signalverarbeitenden Methoden, insbesondere zur Robustheit bei variabler Drehzahl/Last und Compound-Fehlern. Multitask- und domänenrobuste Verfahren adressieren Domain-Shift zwischen Prüfständen und Betriebszuständen; für Getriebe/Planetensätze wurden belastbare Verbesserungen gegenüber konventionellen Architekturen berichtet. [13,14,15]

1.2 Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag ein praxiserprobtes Verfahren vorgestellt, das Körperschallmessungen, Ordnungsanalysen und KI-Methoden kombiniert, um eine zuverlässige und frühzeitige Erkennung von Schäden an Antriebsstrangkomponenten zu gewährleisten.

Die Früherkennung mechanischer Schäden an Antriebsstrangkomponenten wie Lagern und Verzahnungen ist entscheidend, um Folgeschäden während Prüfstandsversuchen zu vermeiden und die Aussagekraft der Tests zu erhöhen. Durch die rechtzeitige Identifikation von Schadensmechanismen, beispielsweise Verzahnungspitting oder Lagerschäden, können geschädigte Komponenten gezielt ausgetauscht werden, während intakte Teile weiterhin genutzt werden. Dies ermöglicht eine deutlich umfassendere Datenerhebung aus einem einzelnen Prüfling und reduziert die Kosten für zusätzliche Versuche. In diesem Beitrag wird ein praxiserprobtes System zur Schadensfrüherkennung vorgestellt, das Körperschall-/Vibrationsmessungen, Ordnungsanalyse und künstliche Intelligenz (KI) kombiniert.

2. Prüfstandsbeschreibung und Methodik

Die Prüfstände sind in der Regel für die Dauererprobung von Fahrzeugkomponenten wie Elektro- oder Verbrennungsmotoren, Getrieben sowie kompletten Antriebssträngen ausgelegt. Dies bedeutet, dass die Dauer einer Prüfung stark variieren kann – in der Praxis reicht sie von wenigen Stunden bis zu mehreren Monaten. Das hier vorgestellte Messverfahren ist so konzipiert, dass die erfassten Daten bei längeren Prüfzeiträumen automatisch und intelligent reduziert werden, sodass die wesentlichen Informationen erhalten bleiben. Die Prüfungen können sowohl statisch (Drehmoment und Drehzahl werden zeitweise eingestellt) als auch dynamisch erfolgen (Drehzahlen und Drehmomente werden aus realen Fahrzeugversuchen nachgebildet). Die im Folgenden beschriebenen Verfahren des maschinellen Lernens wurden zudem unter anspruchsvollen Rennsportbedingungen, einschließlich der Formel 1, getestet.

Die Datenerfassung der Körperschallsensoren erfolgt über das modulare MIG16-EFD-System der Firma red-ant GmbH. Die Sensoren werden sowohl am Prüfobjekt (z. B. Getriebe, Motor) als auch an zentralen Prüfstandskomponenten montiert. Sie erfassen die Oberflächenschwingbeschleunigung im Bereich von 0 bis 50.000 m/s² bei Frequenzen zwischen 0 und 70 kHz. Für Getriebe aus dem Bereich der Militär- und LKW-Fahrzeugtechnik werden in der Regel empfindlichere Sensoren mit einem Messbereich von 0 bis 1.000 m/s² eingesetzt, da diese Werte dem Verhalten der Antriebsstrangkomponenten im Normalzustand sowie im beginnenden Schadenszustand entsprechen.

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

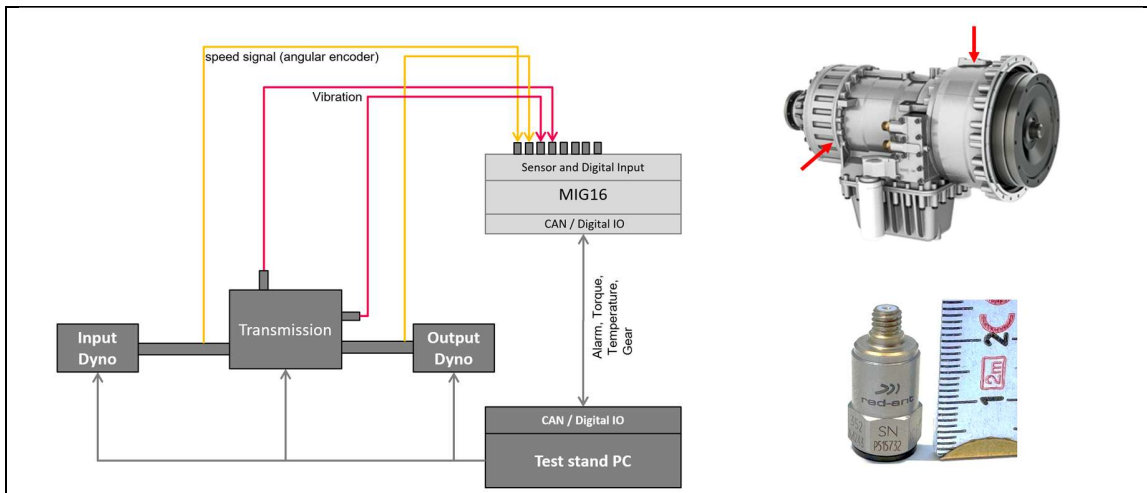


Abb. 1: Signale vom Prüfstand zur Datenerfassung; typischer Prüfling mit 2 Messstellen für Körperschall; typischer Körperschallsensor mit Größenmaßstab (Länge 24 mm).

Die Körperschallsensoren nutzen die Integrated Electronics Piezo Electric (IEPE)-Technologie. Sie werden über integrierte Ladungsverstärker mit einer hochpräzisen Stromquelle von 4 mA bei nominell 24 Volt gespeist. Die Versorgung erfolgt über dieselbe Leitung wie die Signalübertragung (einadrig mit Masse), wobei Leitungslängen bis zu 50 Metern realisierbar sind.

Die Signale werden zeitäquidistant mit 6,4 kHz über einen Sigma-Delta-A/D-Wandler abgetastet. Dabei kommt ein digitales Antialiasing-Filter in Kombination mit einem vorgeschalteten analogen Zweipol-Bessel-Filter (400 kHz) zum Einsatz, das Signale oberhalb von 0,48 der Abtastfrequenz auf unter 110 dB dämpft. Das resultierende Signal weist eine Auflösung von 24 Bit (± 10 Volt Aussteuerung) und ein Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) von unter 130 dB auf.

Zusätzlich zu den Körperschallsignalen werden die Drehwinkelsignale der Eingangs- und Abtriebswellen mit 100 MHz erfasst. Alle Messgrößen – einschließlich Drehmoment und Öltemperatur (auch über serielle Schnittstellen wie CAN) – werden über eine gemeinsame Hardware-Zeitbasis synchronisiert.

Die erfassten Signale werden anschließend verschiedenen Analysen unterzogen, um sogenannte NVH-Indikatoren zu berechnen. In der Praxis hat sich die parallele Berechnung mehrerer Indikatoren auf Basis von Zeit-, Frequenz- und Winkelinformationen bewährt. Im Folgenden werden zwei exemplarische Indikatoren vorgestellt: der Kurzzeiteffektivwert und das Ordnungsspektrum. Der Kurzzeiteffektivwert des Körperschallsignals (siehe Gleichung 1) wird über eine kurze Zeitperiode (z. B. 50 ms) berechnet und dient als Grundlage für die Bewertung des Schwingungsverhaltens.

$$(1) \quad s_{\text{eff}} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n x_i^2 \Delta t_i} = \sqrt{\frac{1}{T} [x_1^2 \Delta t_1 + x_2^2 \Delta t_2 + x_3^2 \Delta t_3 \cdots + x_n^2 \Delta t_n]}$$

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

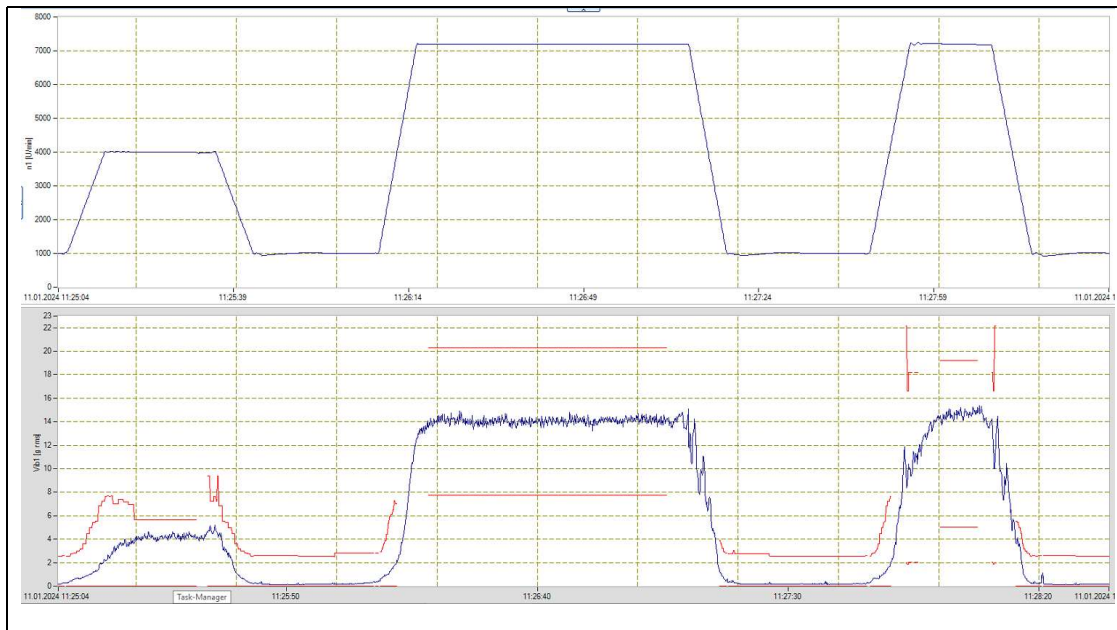


Abb. 2: Grafiken der erfassten Drehwinkelgeschwindigkeit und des berechneten Kurzzeiteffektivwerts (in g rms) eines Körperschallsignals eines Getriebeprüflings

In der oben dargestellten Grafik ist ein Beispiel für einen Getriebeprüflauf zu sehen. Die obere Darstellung zeigt den Verlauf der Drehwinkelgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 180 Sekunden sowie den dazu berechneten Effektivwert-Indikator des Körperschallsignals (blau). Die Berechnungsperiode beträgt hier 100 ms, was bedeutet, dass dieser NVH-Indikator mit einer Frequenz von 10 Hz ermittelt wird. Zusätzlich sind in der Grafik die oberen und unteren Grenzwerte (rot) dargestellt, die das Messsystem MIG16 EFD mithilfe KI-gestützten maschinellen Lernens berechnet hat.

Ein weiterer Indikator ist die Abweichung vom gelernten Ordnungsspektrum. Hierzu wird zunächst aus den Körperschallsignalen und den Drehzahlen ein Ordnungsspektrum berechnet. Dabei werden Fehler des Drehwinkelgebers (z. B. fehlende oder kurzzeitig gestörte Encoder-Pulse) sowie Laufzeitunterschiede (Körperschall in Stahl: 5900 m/s, Drehwinkelsignal im BNC-Kabel: 2×10^8 m/s) durch ein spezielles, von red-ant entwickeltes Verfahren zur Berechnung der Drehwinkelgeschwindigkeit kompensiert. Dazu wird für jeden Drehwinkel ein Polynom dritten Grades über das erfasste Drehwinkelsignal gelegt und ein Best-Fit-Signal berechnet. Mit diesem idealisierten Drehwinkelsignal werden die Körperschallsignale anschließend drehwinkelsynchron erneut abgetastet. Ein drittes Antialiasing-Filter wird dabei dynamisch an die aktuelle Drehwinkelgeschwindigkeit für jeden Abtastpunkt angepasst. Eine anschließende Fast-Fourier-Transformation erzeugt schließlich ein Ordnungsspektrum über eine frei wählbare Anzahl von Wellenumdrehungen.

Eine KI-basierte Lernkomponente mit statistischen Verfahren erstellt aus dem fehlerfreien Betrieb des Prüflings Referenzspektren, mit denen das jeweils aktuelle Ordnungsspektrum kontinuierlich verglichen wird. Dabei werden unterschiedliche Betriebszustände (z. B. Drehwinkelgeschwindigkeit, Öltemperatur, Gang, Drehmoment) berücksichtigt, um robuste Referenzspektren zu generieren.

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

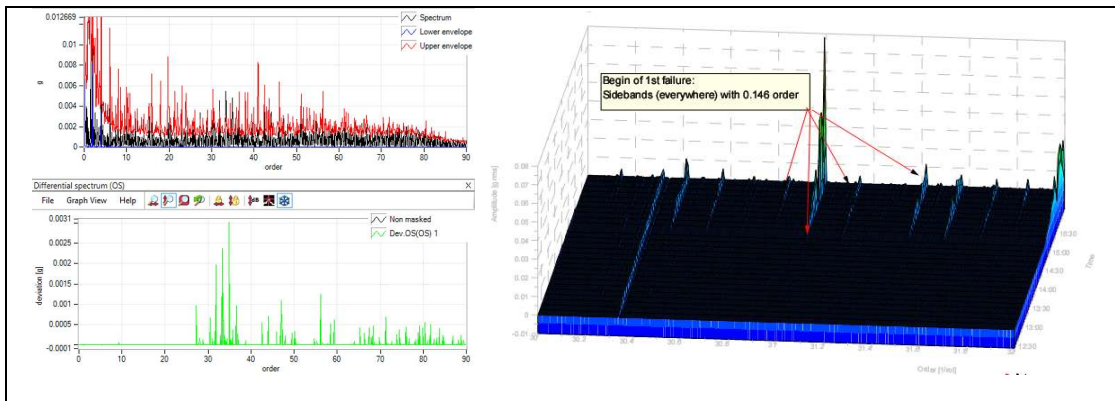


Abb. 3: Links: Ordnungsspektrum mit oberer und unterer Referenz (rot und blau). Darunter: Abweichungsspektrum (grün). Rechts: Verlauf der Abweichungsspektren bei einem typischen Lagerschadensfall.

Veränderungen im Körperschallverhalten, wie sie bei beginnenden Lager- oder Verzahnungsschäden auftreten, werden von diesem Verfahren zuverlässig erkannt. Der integrierte Alarmmanager mit KI-Unterstützung bewertet diese Abweichungen und meldet Anomalien frühzeitig und präzise. Dadurch sind eine automatisierte und sichere Schadensfrüherkennung sowie die rechtzeitige Abschaltung des Prüfstands möglich – oftmals deutlich vor dem Auftreten sichtbarer oder thermischer Anzeichen.

3. Ergebnisse

Kinematik des Prüflings

Die Daten für diesen Beitrag stammen aus einem Dauererprobungsversuch eines LKW-Achsenherstellers. Um die geistigen Eigentumsrechte des Kunden zu schützen, wurden alle Daten anonymisiert. Der Zeitraum, die Drehzahlen, die Drehmomente und die Zähnezahlen wurden entsprechend verändert.

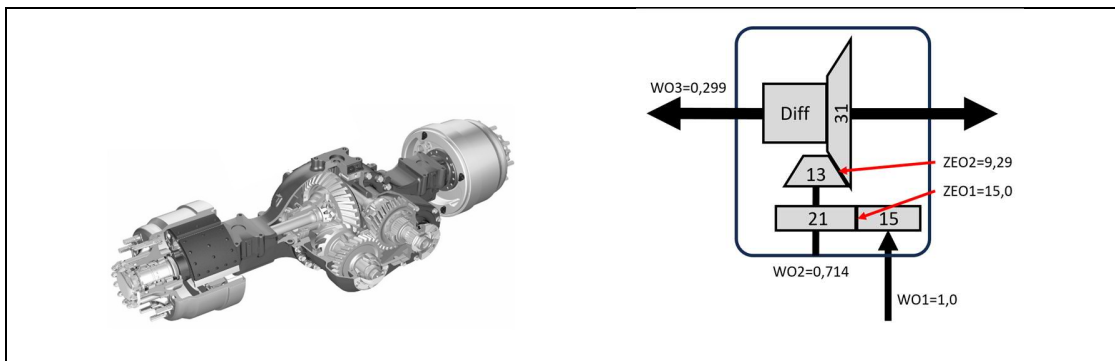


Abb. 4: Links: Beispiel eines zweistufigen Achsgetriebes mit Differential [16]. Rechts: Verzahnungsschema des Prüflings mit den zugehörigen Zahneingriffs- und Wellenordnungen.

Für die Durchführung der Ordnungsanalyse wird eine Welle des Prüflings als Referenz herangezogen. In diesem Fall dient die Eingangswelle **WO1** als Bezugspunkt. Ihre Winkelgeschwindigkeit wird für die Analysezwecke auf den normierten Wert von **1,0** festgelegt.

Die Wellenordnungen des Prüflings werden relativ zur Eingangswelle **WO1** anhand der jeweiligen Übersetzungsverhältnisse berechnet. Diese ergeben sich aus den Zahnzahlen der beteiligten Zahnräder:

- (2) $WO1 = 1,0$
- (3) $WO2 = Z1/Z2 = 0,714$

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

$$(4) \text{ WO3} = Z1/Z2 * Z3/Z4 = 0,299$$

Die Verzahnungsordnungen werden durch die Multiplikation der jeweiligen Wellenordnung mit der Zähnezahl des auf der entsprechenden Welle montierten Zahnrads bestimmt.

$$(5) \text{ ZEO1/2} = \text{WO1} * Z1 = 1,0 * 15 = 15,0$$

$$(6) \text{ ZEO3/4} = \text{WO2} * Z3 = Z1/Z2 * Z3 = 9,29$$

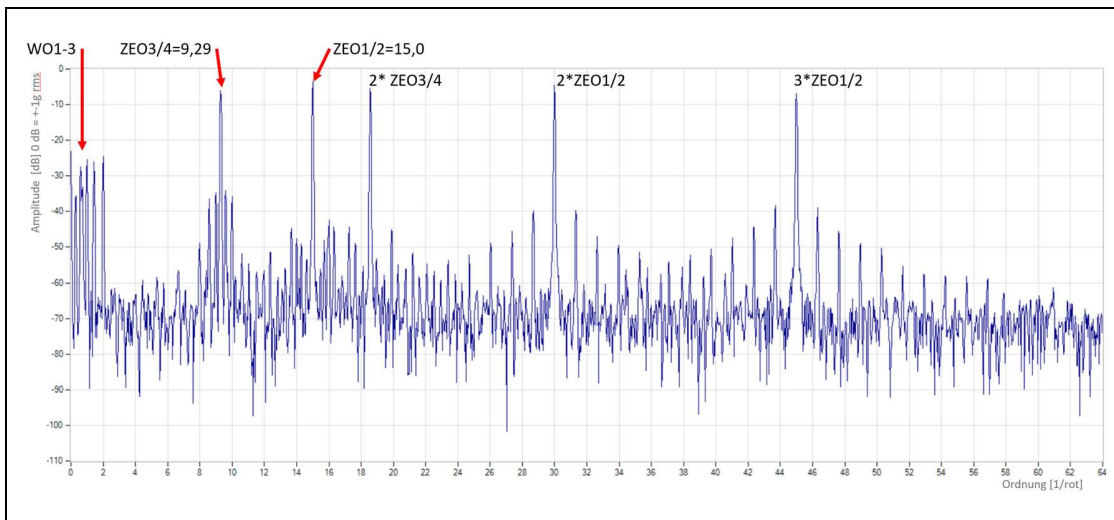


Abb. 5: Ordnungsspektrum des Prüflings im Bereich von 0. bis 64. Ordnungen, dargestellt in Dezibel (0 dB entspricht 1 g rms) bei einer Drehzahl von 2.500 U/min und einem Antriebsmoment von 900 Nm im Zugbetrieb. Die Darstellung umfasst sowohl die zugehörigen Wellenordnungen (WO) als auch die Zahneingriffsordnungen (ZEO).

Prüfbedingungen und Lernverhalten der Zeitbasierten Indikatoren:

Die Testbedingungen entsprechen einem sogenannten High-Load-/Short-Cycle-Test. Dabei fährt der LKW zunächst mit hoher Last bergauf, anschließend ohne Retarder bergab und schließlich bei mittlerer Last auf der Autobahn. Das Prüfprofil ist komprimiert, wobei die Lastwechsel (Zug/Schub) im Vordergrund des Versuchs stehen. Die untenstehende Grafik zeigt einen Zyklus mit einer Dauer von etwa 60 Sekunden.

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

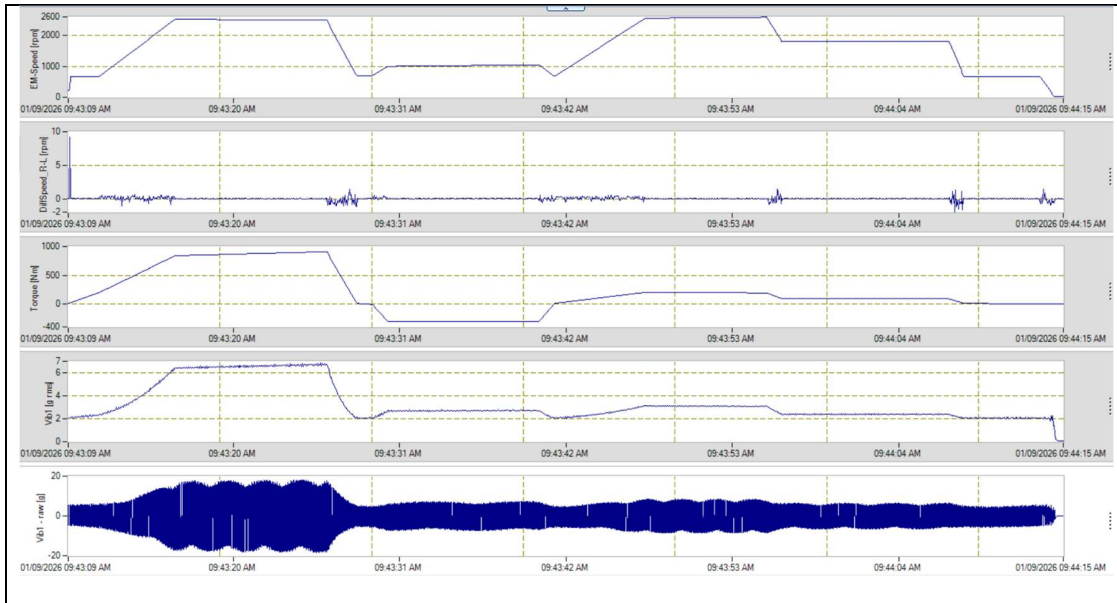


Abb. 6: Verlauf eines Prüfzyklus. Von oben nach unten dargestellt: Antriebsdrehzahl, Differentialdrehzahl, Antriebsmoment sowie Körperschallsignal (berechnet als Kurzzeiteffektivwert bei 20 Hz und als Rohsignal mit 100 kHz / 24-Bit-Auflösung).

Das Messsystem erlernt mithilfe von KI-gestütztem maschinellem Lernen den Zyklus sowie das Verhalten des Prüflings unter Last. Für diesen Lernprozess sind mehrere Zyklen erforderlich. Der Fortschritt des Lernens wird anhand der Grenzwertbildung im unteren Bild deutlich. Bereits nach drei Zyklen (ca. 180 Sekunden) sind die Grenzwerte für die häufig gefahrenen Bedingungen ermittelt.



Abb. 7: Verlauf der ersten fünf Prüfzyklen. Von oben nach unten dargestellt: Antriebsdrehzahl, Antriebsmoment sowie Körperschallsignal (blau: berechnet als Kurzzeiteffektivwert, rot: obere und untere Grenzwerte, ermittelt mittels maschinellen Lernens).

Nach etwa zwei Stunden ist der Lernzyklus zu rund 96 % abgeschlossen. Die untenstehende Grafik veranschaulicht diesen Fortschritt. Die verbleibenden 4 % sind auf stark transiente Prüfbedingungen zurückzuführen, die eine

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

vollständige Modellierung in der gegebenen kurzen Zeit verhindern. Eine umfassende Körperschallpegelüberwachung deckt jedoch auch diese fehlenden Zeitabschnitte ab. Zusätzlich wird der Lernprozess kontinuierlich überwacht, um eine stabile Anpassung an wechselnde Lastprofile sicherzustellen. Die Integration von KI-Algorithmen ermöglicht eine dynamische Anpassung der Grenzwerte, wodurch die Anomalie Erkennung weiter verbessert wird. Diese Vorgehensweise erhöht die Zuverlässigkeit des Systems und reduziert das Risiko von Fehlalarmen erheblich.

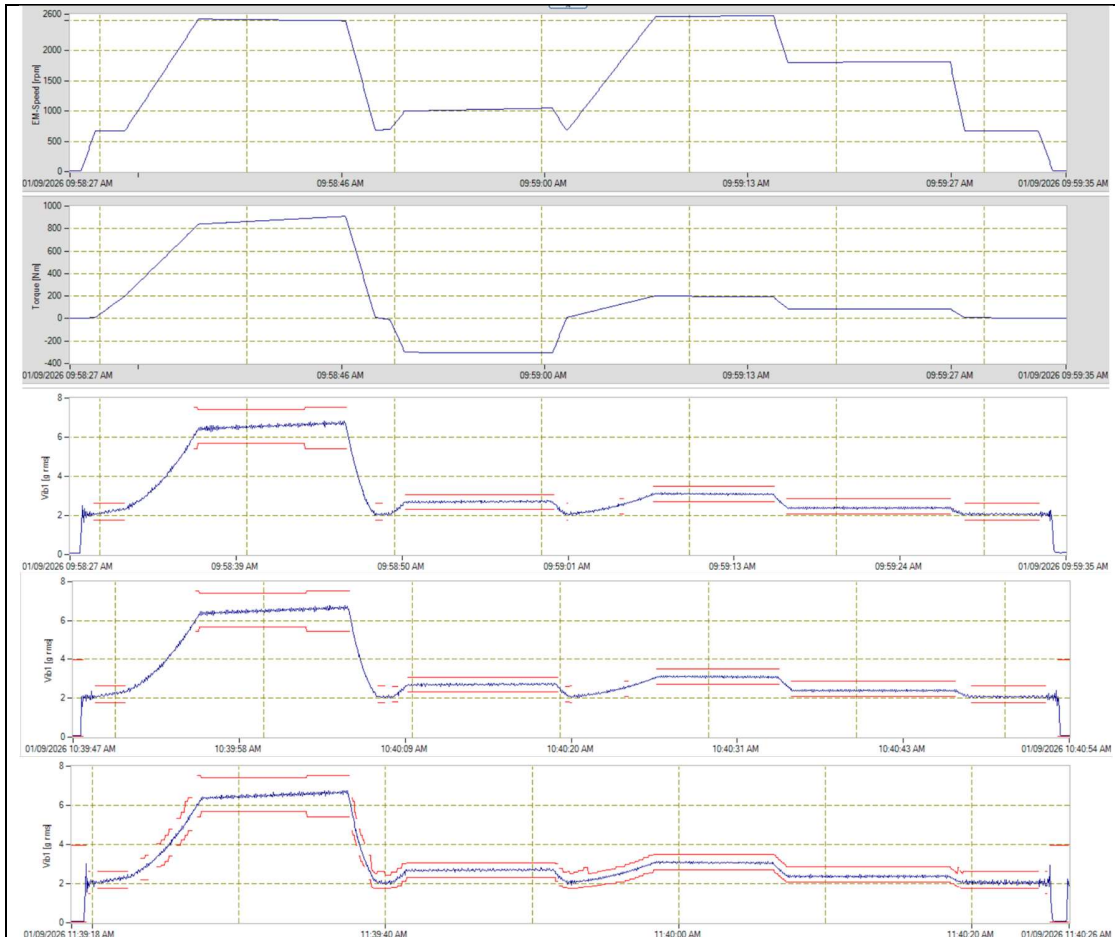


Abb. 8: Verlauf des Lernens zeitbasierter Indikatoren. Von oben nach unten dargestellt: Antriebsdrehzahl, Antriebsmoment sowie Körperschallsignal nach ca. 20 Minuten, 1 Stunde und 2 Stunden (blau: berechnet als Kurzzeiteffektivwert, rot: obere und untere Grenzwerte, ermittelt mittels maschinellen Lernens).

Lernverhalten der winkelbasierten Indikatoren:

Aus dem Körperschallsignal und der Drehzahl wird fortlaufend ein Ordnungsspektrum für jeweils 32 Umdrehungen berechnet. Um eine höhere zeitliche Auflösung zu erzielen, wird zusätzlich nach den ersten 16 Umdrehungen ein weiteres Ordnungsspektrum für ebenfalls 32 Umdrehungen erstellt. Dadurch ergibt sich eine Überlappung von 50 % zwischen den berechneten Ordnungsspektren, was die zeitliche Auflösung deutlich verbessert. Sowohl die Überlappung als auch die spektrale Auflösung sind im Messsystem frei konfigurierbar und unabhängig von der Auflösung des Winkelencoders.

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

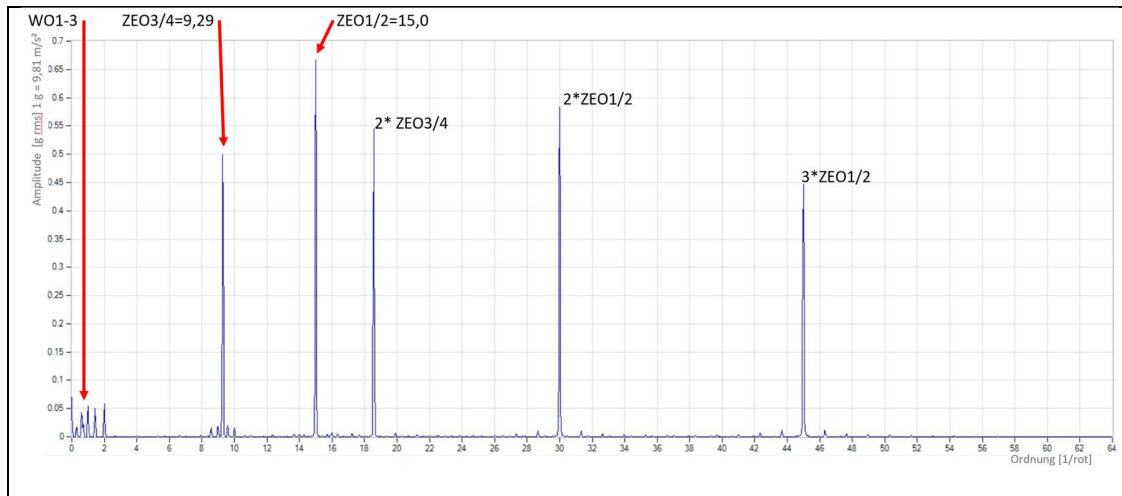


Abb. 9: Ordnungsspektrum des Prüflings im Bereich der 0. bis 64. Ordnung, linear dargestellt, bei einer Drehzahl von 2.500 U/min und einem Antriebsmoment von 900 Nm im Zugbetrieb. Die Darstellung umfasst die Wellenordnungen (WO), die Zahneingriffsordnungen (ZEO) sowie deren ganzzahlige Harmonischen.

Aus mehreren Ordnungsspektren werden, abhängig von den Prüfbedingungen, die das Körperschallsignal maßgeblich beeinflussen – wie Drehzahl, Differenzdrehzahl, Drehmoment oder Öltemperatur –, unterschiedliche Referenzspektren gebildet.

Zur quantitativen Bewertung der Zustandsabweichung werden die Referenzspektren herangezogen: Aus dem aktuellen Ordnungsspektrum wird durch Differenzbildung mit der zugehörigen Referenz ein Differenzordnungsspektrum berechnet, das spektrale Abweichungen (Amplitude und ggf. Phasenlage) normiert und vergleichbar darstellt.

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

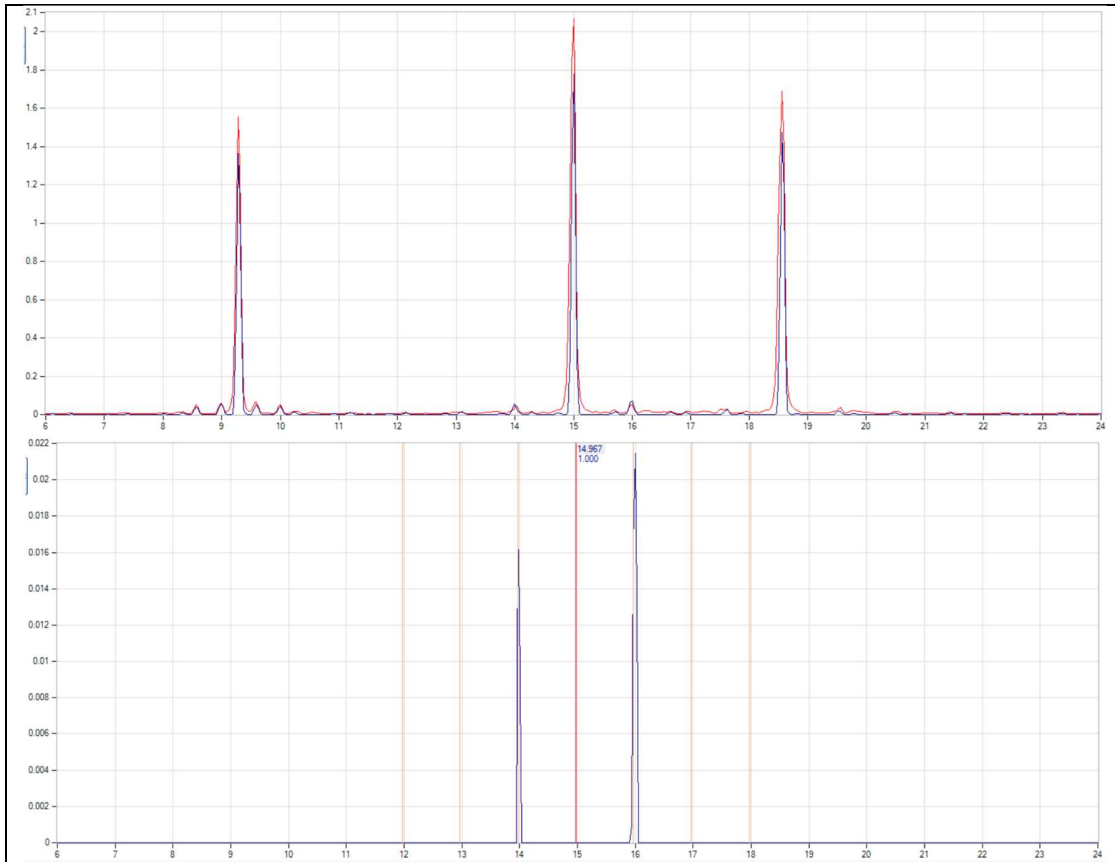


Abb. 10: Oben: Ordnungsspektrum (blau) mit KI-generierter Referenz (rot). Unten: berechnetes Differenzordnungsspektrum aus der Referenz und dem aktuellen Ordnungsspektrum.

Die Differenzspektren enthalten ausschließlich die Ordnungslinien, deren Amplituden die Referenzwerte über- oder unterschreiten. Zur Bildung des Indikators „Abweichung aus dem Ordnungsspektrum“ werden alle Beträge dieser Differenzen über die relevanten Ordnungslinien summiert. Das Ergebnis wird als einzelner Datenpunkt dargestellt. Ein solcher Datenpunkt wird nach jeweils 16 Umdrehungen berechnet, wodurch eine zeitlich hochauflösende Überwachung der spektralen Abweichungen gewährleistet ist.

Verlauf der Prüfung und Ergebnisse:

Die Prüfung wurde nach zwei Stunden aufgrund eines durch das Messsystem ausgelösten Alarms – verursacht durch eine signifikante Abweichung im Ordnungsspektrum – automatisch abgeschaltet. Die anschließende Analyse der Messdaten ermöglichte eine Eingrenzung der Schadensursache auf das Antriebsritzel mit 15 Zähnen. Die nachfolgende zerlegende Befundung bestätigte diese Diagnose und zeigte ein etwa 10 mm² großes Grübchen auf der Verzahnung der Antriebswelle.

Die Messdaten dokumentieren den Schadensverlauf über etwa fünf Zyklen. Ab 11:38 Uhr (siehe Abbildung 12 unten) ist erstmals eine signifikante Abweichung des Ordnungsspektrums von der Referenz erkennbar.

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring



Abb. 11: Die letzten fünf Zyklen vor der Abschaltung. Von oben nach unten dargestellt: Antriebsdrehzahl, Antriebsmoment, Körperschallsignal sowie der Indikator „Abweichung aus dem Ordnungsspektrum“.

Die anschließende zerlegende Befundung zeigt großes Grübchen auf der Antriebwellenverzahnung (siehe Abb. 12).

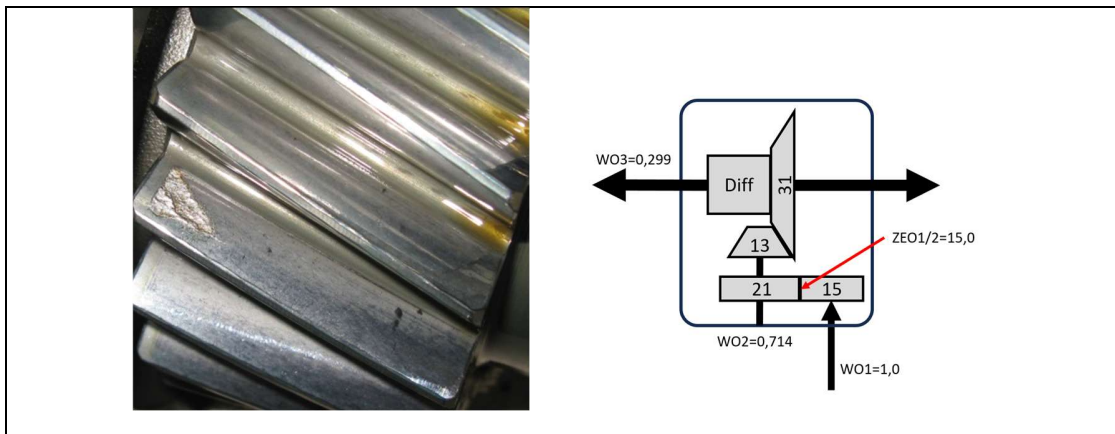


Abb. 12: Beispielbild der Grübchenbildung 10 mm² Antriebswelle auf Zahnrad Z1 mit 15 Zähnen.

4. Diskussion

Zur weiteren Klärung des Schadensbildes in den Körperschallmessdaten ist ein kurzer Exkurs zur Kinematik des Getriebes und zum Verhalten des Körperschalls bei Schädigung erforderlich. Bereits im unbeschädigten Zustand sind in den Ordnungsspektren sogenannte Seitenbänder um die Zahneingriffsordnungen erkennbar. Diese entstehen durch eine Überlagerung von Amplituden- und Frequenzmodulation (AM/FM) des Zahneingriffs. Die Seitenbänder treten jeweils in einem Abstand von der zugehörigen Wellenordnung auf. Da der Zahneingriff ZEO1/2 hier von zwei Zahnradern auf unterschiedlichen Wellen mit den Ordnungen WO1 und WO2 gebildet wird, entstehen insgesamt vier Seitenbänder.

- (7) $SBWO_{1r,l} = ZEO1/2 \pm WO1 = 15,0 \pm 1,0$
- (8) $SBWO_{2r,l} = ZEO1/2 \pm WO2 = 15,0 \pm 0,714$

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

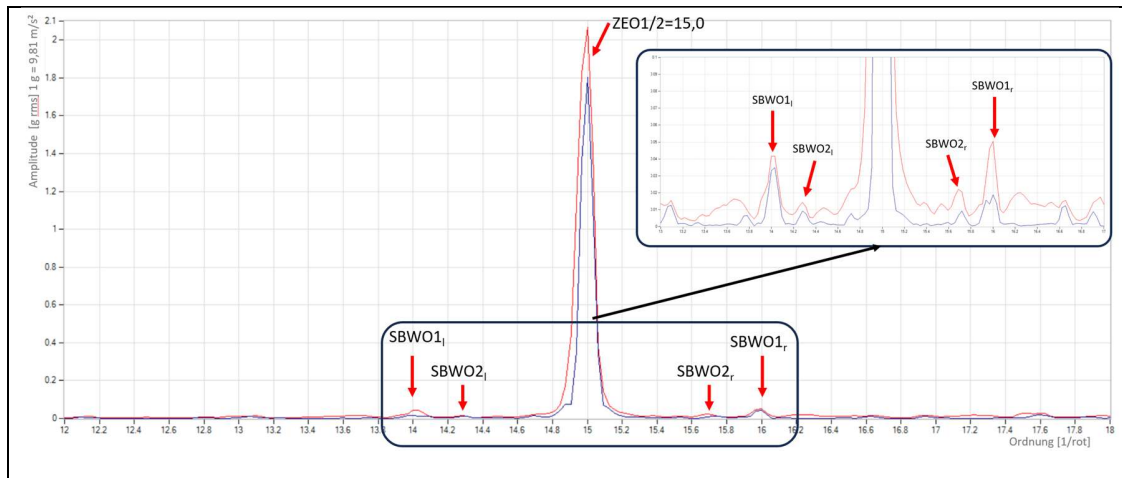


Abb. 13: Beginn des Versuchs: Ordnungsspektrum (blau) des Prüflings im Bereich von 12. bis 18. Ordnungen, Detailansicht um die Zahneingriffsordnung ZEO1/2 mit zwei Paaren von Seitenbändern (SBWO1_{r,l} und SBWO2_{r,l}). Die Referenz (rot) wurde durch eine KI-basierte Lernkomponente aus dem fehlerfreien Betrieb des Prüflings generiert.

Die Seitenbänder spielen eine zentrale Rolle bei der Schadensfrüherkennung: Bei Grübchen- oder Rissbildung an der Verzahnung steigt die kombinierte Amplituden- und Frequenzmodulation (AM/FM) der Zahneingriffsordnung (ZEO) in Abhängigkeit von der Wellenordnung des geschädigten Zahnrads messbar an. Ursache ist die parametererregte Schwingung des Zahneingriffs, die durch den lokalen Defekt einmal pro Umdrehung der betroffenen Welle moduliert wird:

- Erhöhte Amplitudenmodulation (AM): Ein Grübchen führt zu einer lokalen Änderung der Zahnsteifigkeit. Dadurch schwankt die Kraftübertragung während des Zahneingriffs stärker. Diese periodische Variation der Kraft erzeugt eine messbare Amplitudenmodulation im Körperschallsignal.
- Verstärkte Frequenzmodulation (FM): Das Grübchen verursacht mikroskopische Änderungen im Zahnflankenspiel und in der Kontaktgeometrie. Dies führt zu minimalen, aber regelmäßigen Schwankungen der Zahneingriffsfrequenz. Die Folge ist eine Frequenzmodulation, die sich in den Seitenbändern um die Zahneingriffsordnung (ZEO) bemerkbar macht.
- Seitenbandstruktur im Ordnungsspektrum: Die Modulation tritt einmal pro Umdrehung des geschädigten Zahnrades auf. Dadurch entstehen Seitenbänder um die ZEO in einem Abstand, der der Wellenordnung des defekten Zahnrads entspricht. Mit zunehmender Grübchengröße steigt die Seitenbandamplitude messbar an – ein typischer Frühindikator für beginnende Schäden.

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

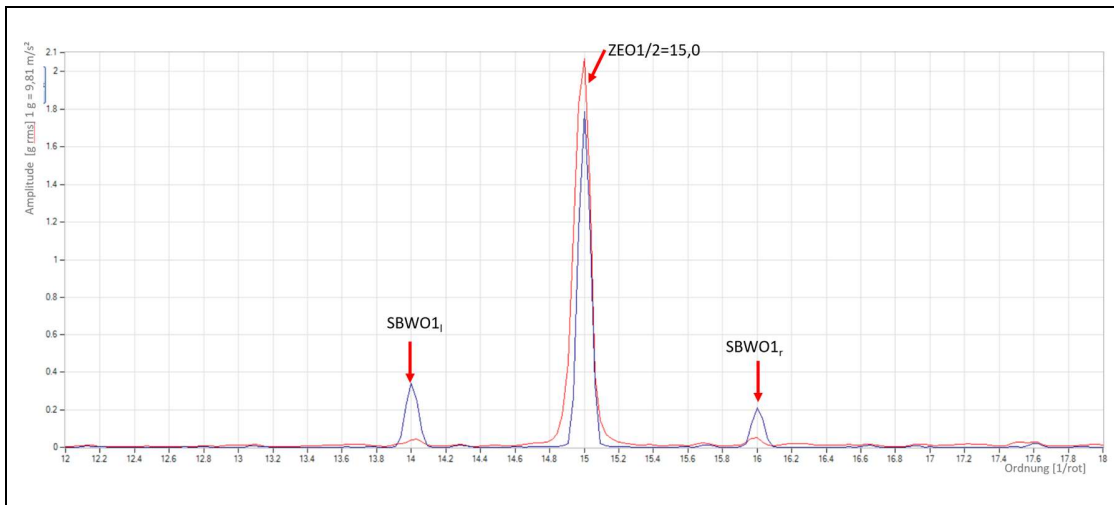


Abb. 14: Kurz vor der Abschaltung: Ordnungsspektrum (blau) des Prüflings im Bereich von 12. bis 18. Ordnung, Detailansicht um die Zahneingriffsordnung ZEO1/2 mit deutlich angestiegenen Seitenbändern (SBWO1_{r,l}). Die zugehörige Referenz ist in Rot dargestellt.

Im Verlauf des Versuchs (vergleiche Abb. 13 mit Abb. 14) sind die Seitenbänder SBWO1_{r,l} um die Zahneingriffsordnung ZEO1/2 deutlich sichtbar angewachsen. Untenstehende Abb. 15 zeigt als 3D Ordnungsspektrum den Verlauf der Entstehung der Seitenbänder SBWO1_{r,l} in den letzten fünf Zyklen.

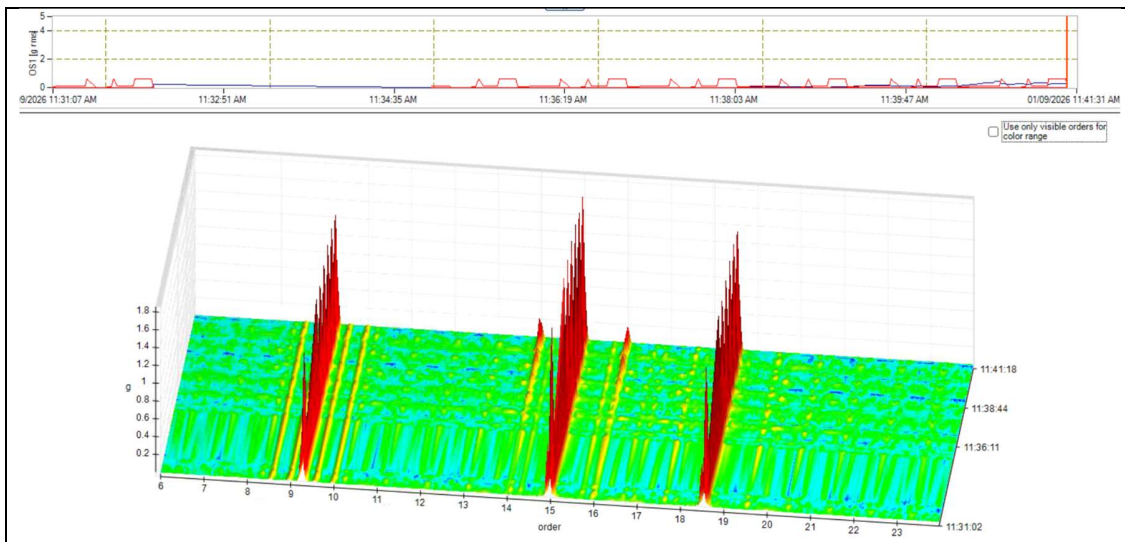


Abb. 15: Die letzten fünf Zyklen vor der Abschaltung zeigen im Ordnungsspektrum ein deutliches Anwachsen der Seitenbänder (SBWO1_{r,l}). Im 3D-Ordnungsspektrum wird dieser Verlauf über die Zeit besonders anschaulich sichtbar.

5. Schlussfolgerung

Die Methoden zur KI-basierten Referenzbildung für Körperschallsignale im Zeit-, Frequenz- und Winkelbereich werden von der **red-ant GmbH** seit über 20 Jahren erforscht und in Messsysteme integriert, die eine Echtzeitüberwachung des Prüfstands und des Prüflings ermöglichen.

Auch in der Produktionsendkontrolle können die vorgestellten Verfahren – KI-basierte Referenzbildung und maschinell erlerntes Körperschallverhalten – erfolgreich eingesetzt werden. Die red-ant GmbH hat hierzu im Jahr

Schadensfrüherkennung am Antriebsstrangprüfstand durch Körperschallanalyse und KI-gestütztes Ordnungsspektrum-Monitoring

2022 eine Kooperation mit der ZF Group gestartet und ein praxisbewährtes Verfahren entwickelt, das auch anderen Kunden in der Produktion von Getrieben, Verbrennungsmotoren, E-motoren, Lenksystemen, Aktuatoren, Stoßdämpfern, Federgabeln, etc. zur Verfügung steht.

Das hier vorgestellte Verfahren wird derzeit von über 100 Kunden weltweit eingesetzt und hat sich sowohl im Dauerlaufbetrieb als auch bei Fahrzeugtest auf der Straße und im Gelände bewährt. Die Methodik bietet eine skalierbare Lösung für moderne Prüfstände und verbessert entscheidend die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Diagnosequalität.

Literatur

- [1] Uchtmann, K.; Wirth, R. – *Maschinendiagnose an drehzahlveränderlichen Antrieben mittels Ordnungsanalyse*. Fachartikel, Flender GmbH.
- [2] Vibration Research – *What is Order Analysis?* Technischer Artikel.
- [3] Dewesoft – *Ordnungsanalyse mit DEWETRON's OXYGEN Messsoftware*. Technische Dokumentation.
- [4] MathWorks – *Order Analysis of a Vibration Signal*. MATLAB-Dokumentation.
- [5] ISO 20816-1:2016 – *Mechanische Schwingungen – Messung und Beurteilung von Maschinenschwingungen – Teil 1: Allgemeine Richtlinien*. Internationale Organisation für Normung (ISO).
- [6] ISO 15243:2017 – *Wälzlager – Schäden und Ausfälle – Begriffe, Merkmale und Ursachen*. Internationale Organisation für Normung (ISO).
- [7] Bechhoefer, E.; Kingsley, M. – *A Review of Time Synchronous Average Algorithms*. PHM Society, 2009.
- [8] Nguyen, T.-D. et al. – *Tacholeless Time Synchronous Averaging for Gear Fault Diagnosis in Wind Turbine Gearboxes Using a Single Accelerometer*. Zeitschrift *Machines*, 2024.
- [9] Grzeszkowski, M. et al. – *Experimental Study on the Pitting Detection Capabilities for Spur Gears Using Acoustic Emission and Vibration Analysis Methods*. WZL Aachen / AGMA, 2019.
- [10] Leaman, F. – *A Review on Acoustic Emissions of Gear Transmissions: Source, Influencing Parameters, Applications and Modeling*. Zeitschrift *JVET*, 2024.
- [11] Prawin, J. – *Bearing Fault Diagnosis using Enhanced Envelope Analysis*. NDT.net (ICINDE 2022).
- [12] Rebiai, M. et al. – *FPGA implementation of an improved envelope detection approach for bearing fault diagnosis*. Zeitschrift *JEAS*, Springer, 2024.
- [13] Sohaib, M. et al. – *Gearbox fault diagnosis using improved feature representation and multitask learning*. *Frontiers in Energy Research*, 2022.
- [14] Hwang, T. et al. – *Robust deep learning-based fault detection of planetary gearbox using enhanced health data map under domain shift problem*. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2023.
- [15] Chen, Y. et al. – *Gearbox fault diagnosis method based on deep learning multi-task framework*. *International Journal of Structural Integrity*, 2023.
- [16] Quelle: Volvo FactSheet/RTS2370A_Ger_01_331202065.pdf

Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen für Prüfstandsversuche

Benedikt Mundl; Michael Städele

monalysis GmbH, Leonhardstraße 19, 87437 Kempten, Deutschland

Zusammenfassung

Die Qualität von Prüfstandsergebnissen hängt maßgeblich davon ab, inwieweit die im realen Einsatz auftretenden Lasten und Beanspruchungen korrekt erfasst, bewertet und in ein geeignetes Kollektiv überführt wurden. Die Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen folgt i.d.R. einer klar strukturierten Methodik, welche die Instrumentierung des Fahrzeugs, die Durchführung von Referenzmessungen sowie die Erfassung der Lasten im realen oder simulierten Einsatz umfasst.

Ist ein Auslegungsmaßstab vorhanden, so wird ein einzelnes Fahrzeug sowohl für Referenzmessungen als auch für (simulierte) Einsatzmessungen genutzt. Ist kein Auslegungsmaßstab vorhanden, müssen die relevanten Lasten und Beanspruchungen direkt aus dem realen Einsatz abgeleitet werden. Da hierfür in der Regel keine vollständige, umfangreiche Instrumentierung über lange Zeiträume wirtschaftlich wie auch technisch realisierbar ist, kommt das Durability-Transfer-Verfahren als zentrales methodisches Element zum Einsatz. Auf Basis der Einsatzdaten wird dann ein Kollektiv komponiert, welches die relevanten Lastanteile gerafft beinhaltet.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass reale Einsatzbedingungen stark variieren und sowohl fahrzeug- als auch kundenspezifisch geprägt sind. Zukünftige Entwicklungen werden insbesondere durch eine zunehmende Automatisierung der Datenauswertung, den verstärkten Einsatz von KI sowie durch vernetzte Fahrzeugflotten geprägt sein. Dadurch lassen sich Prüfstandskollektive noch realistischer, effizienter und zielgerichteter ableiten.

1. Einleitung

Prüfstandsversuche sind ein zentrales Element in der Entwicklung und Absicherung von Fahrzeugen und deren Komponenten. Ziel dieser Versuche ist es, Einsatzbeanspruchungen möglichst realitätsnah, reproduzierbar und in angemessener Zeit abzubilden. Die Qualität der Prüfstandsergebnisse hängt dabei maßgeblich davon ab, inwieweit die im realen Einsatz auftretenden Lasten und Beanspruchungen korrekt erfasst, bewertet und in ein geeignetes Prüfstandskollektiv überführt werden.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass reale Einsatzbedingungen stark variieren und sowohl fahrzeug- als auch kundenspezifisch geprägt sind. Abhängig vom Entwicklungsstand, von vorhandenen Auslegungsdaten sowie von der Verfügbarkeit von Messfahrzeugen ergeben sich unterschiedliche methodische Vorgehensweisen zur Erhebung der relevanten Lasten. Insbesondere ist zu unterscheiden, ob ein Auslegungsmaßstab bereits existiert oder ob dieser erst auf Basis von Einsatzmessungen und Annahmen abgeleitet werden muss.

Der vorliegende Beitrag beschreibt systematisch die Vorgehensweisen zur Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen für Prüfstandsversuche. Dabei werden zwei grundlegende Szenarien betrachtet:

- zum einen der Fall, dass ein Auslegungsmaßstab vorhanden ist und Messungen mit einem einzelnen Fahrzeug durchgeführt werden, und
- zum anderen der Fall, dass kein Auslegungsmaßstab existiert und Messungen mit einer Fahrzeugflotte notwendig sind.

Beide Szenarien werden hinsichtlich Methodik, Messkonzept, Datenauswertung und Ableitung des Prüfstandskollektivs dargestellt.

Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen für Prüfstandsversuche

2. Grundsätzliche Methodik zur Lastenerhebung

Unabhängig vom konkreten Szenario folgt die Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen einer klar strukturierten Methodik. Zentrale Elemente sind dabei die Instrumentierung des Fahrzeugs, die Durchführung von Referenzmessungen unter definierten Bedingungen sowie die Erfassung der Lasten im realen oder simulierten realen Einsatz.

2.1 Instrumentierung und Sensorisierung

Die Instrumentierung stellt die Grundlage jeder belastbaren Lastanalyse dar. Ziel ist es, alle relevanten physikalischen Größen zu erfassen, die für die Bewertung der strukturellen Beanspruchung oder der Funktionssicherheit eines Systems notwendig sind. Typische Messgrößen sind Kräfte, Momente, Beschleunigungen, Dehnungen, Drücke oder Temperaturen.

Die Auswahl und Positionierung der Sensoren erfolgt auf Basis einer Lastannahme oder eines bekannten Schwachstellenkonzepts. Besonderes Augenmerk liegt auf einer ausreichend hohen Messgenauigkeit, der dynamischen Bandbreite sowie der Robustheit der Sensorik gegenüber Umwelteinflüssen. Eine sorgfältige Verifikation der Funktionsfähigkeit der Sensorik vor und nach den Messkampagnen ist zwingend erforderlich, um systematische Fehler zu minimieren und die Vergleichbarkeit der Messungen sicherzustellen.

2.2 Referenzmessungen auf dem Erprobungsgelände

Referenzmessungen dienen dazu, einen reproduzierbaren Bezugspunkt für spätere Vergleiche zu schaffen. Sie werden typischerweise auf Erprobungsgeländen oder Prüfstrecken durchgeführt, auf denen definierte Fahrmanöver und Lastfälle gezielt abgebildet werden können. Beispiele hierfür sind definierte Fahrbahnunebenheiten, Brems- und Beschleunigungsmanöver oder Kurvenfahrten mit vorgegebenen Parametern.

Diese Referenzmessungen ermöglichen es, die gemessenen Lasten eindeutig bestimmten Fahrzuständen zuzuordnen und bilden eine Brücke zwischen realem Einsatz und Prüfstand. Insbesondere bei vorhandenen Auslegungsmaßstäben sind Referenzmessungen essenziell, um den Zusammenhang zwischen theoretischer Auslegung und real gemessener Beanspruchung zu überprüfen.

2.3 Messungen im (simulierten) Einsatz

Messungen im Einsatz zielen darauf ab, die tatsächlichen Beanspruchungen während der Nutzung durch den Kunden abzubilden. Dies kann entweder durch reale Fahrten im Kundeneinsatz oder durch simulierte Einsatzszenarien erfolgen. Die Einsatzmessungen zeichnen sich durch eine hohe Variabilität der Lastkollektive aus, da sie von individuellen Fahrprofilen, Umgebungsbedingungen und Nutzungsintensitäten abhängen.

Die Herausforderung besteht darin, aus diesen umfangreichen und oft heterogenen Daten diejenigen Lastanteile zu extrahieren, die für die Bauteil- oder Systemauslegung relevant sind. Hierzu kommen statistische Auswertungen, Klassierungen von Lastkollektiven sowie gegebenenfalls KI-gestützte Verfahren zum Einsatz. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass eine Messung im tatsächlichen Kundeneinsatz, aufgrund der Kosten für die Instrumentierung wie auch wegen der Bedienung der Messtechnik, nicht mit einem vollumfänglich ausgerüsteten Fahrzeug vorgenommen werden kann. Hier müssen KI-basierte Ansätze das Erfassen unterstützen.

3. Vorgehen bei vorhandenem Auslegungsmaßstab

3.1 Grundsätzlicher Ablauf

Ist ein Auslegungsmaßstab vorhanden, kann dieser als Referenz für die Bewertung der gemessenen Lasten herangezogen werden. Der Ablauf gliedert sich in folgende Schritte:

Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen für Prüfstandsversuche

1. Instrumentierung und Kalibrierung
2. Referenzmessungen auf dem Erprobungsgelände
3. Messungen im realen oder simulierten Einsatz
4. Gegenüberstellung von Auslegungsmaßstab und Einsatz
5. Ableitung des Prüfstandskollektivs

Der vorhandene Auslegungsmaßstab dient dabei als Vergleichsgröße, um Abweichungen zwischen angenommener und realer Beanspruchung zu identifizieren.

3.2 Szenario 1: Auslegungsmaßstab vorhanden und ein Fahrzeug für Einsatzmessungen

In diesem Szenario wird ein einzelnes Fahrzeug sowohl für Referenzmessungen als auch für Einsatzmessungen genutzt.

3.2.1 Sensorisierung und Kalibrierung

Das Fahrzeug wird umfassend sensorisiert, wobei die Auswahl der Messstellen auf dem bestehenden Auslegungsmaßstab basiert. Nach der Installation erfolgt eine Roll-Out Messung zur Überprüfung der Funktion aller Sensorsignale unter definierten Bedingungen, um sicherzustellen, dass die gemessenen Daten korrekt interpretiert werden können.

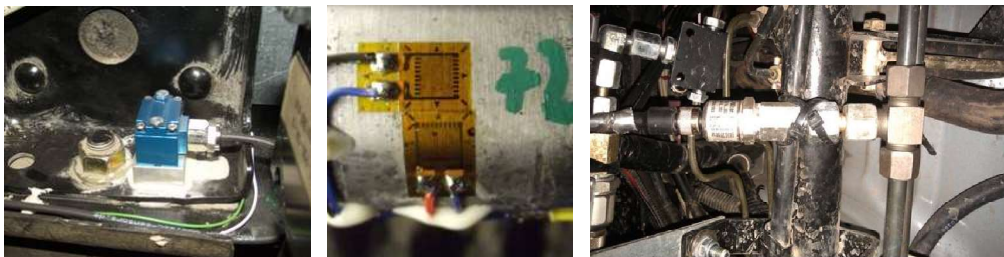


Abb.1: Sensoren

3.2.2 Referenzmessungen

Die Referenzmessungen werden auf einem Erprobungsgelände durchgeführt. Ziel ist es, die Lastantwort des Fahrzeugs bei bekannten und reproduzierbaren Manövern zu erfassen. Diese Messungen bilden die Basis für spätere Vergleiche mit den Einsatzdaten.

3.2.3 Messung im Einsatz

Anschließend wird das Fahrzeug im repräsentativen Einsatz betrieben. Die Messungen erfassen dabei sämtliche relevanten Lasten über einen ausreichend langen Zeitraum, um repräsentative Daten zu erhalten. Besondere Bedeutung kommt der Dokumentation der Einsatzbedingungen zu, um die Messergebnisse korrekt einordnen zu können.

3.2.4 Vergleich Einsatz und Referenz

Die gemessenen Einsatzlasten werden den Referenzmessungen sowie dem Auslegungsmaßstab gegenübergestellt. Abweichungen werden analysiert und bewertet. Ziel ist es, zu identifizieren, ob der Auslegungsmaßstab konservativ, realistisch oder nicht ausreichend ist.

Auf Basis dieser Analyse wird ein Prüfstandskollektiv abgeleitet, welches die relevanten Lasten des Einsatzes reproduzierbar und gerafft abbildet.

Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen für Prüfstandsversuche

4. Vorgehen ohne vorhandenen Auslegungsmaßstab unter Anwendung des Durability-Transfer-Verfahrens

4.1 Grundsätzlicher Ablauf

Ist kein Auslegungsmaßstab vorhanden, müssen die relevanten Lasten und Beanspruchungen direkt aus dem realen Einsatz abgeleitet werden. Da hierfür in der Regel keine vollständige, umfangreiche Instrumentierung über lange Zeiträume wirtschaftlich wie auch technisch realisierbar ist, kommt das Durability-Transfer-Verfahren als zentrales methodisches Element zum Einsatz. Mit dem Durability Transfer Verfahren ist man in der Lage, Langzeitmessungen bei stark reduziertem Applikationsaufwand mit autarker Messtechnik an Fahrzeugflotten vorzunehmen. Aus einfach zu messenden Beschleunigungen und CAN-Größen (sog. Referenzgrößen) werden mit diesem Verfahren Beanspruchungs- und Lastzeitfolgen in unterschiedlichsten Fahrzeugbereichen zuverlässig und kostengünstig abgeleitet.

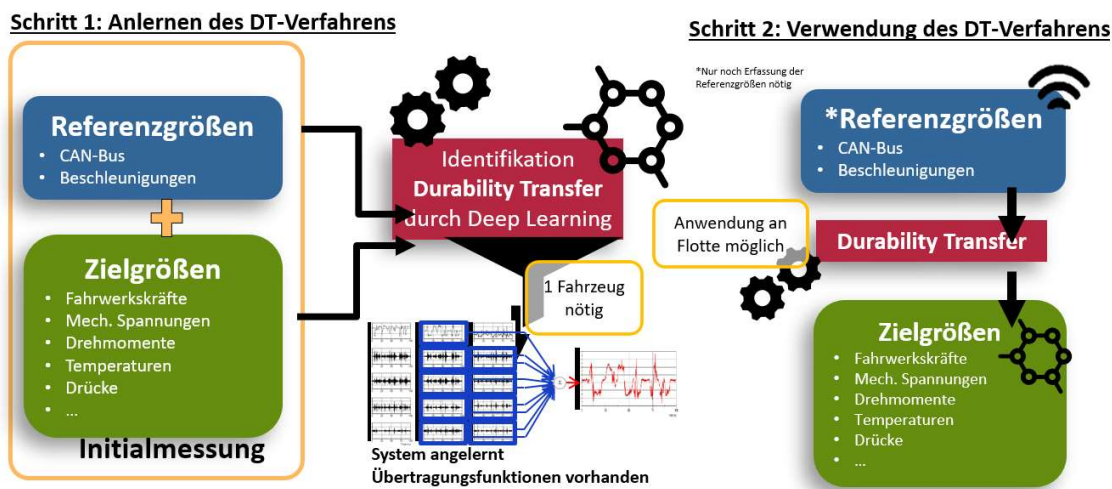


Abb. 2: Funktionsweise des DT-Verfahrens

Der Ablauf zur Ermittlung eines Prüfstandkollektivs gliedert sich in diesem Fall in folgende Schritte:

1. Instrumentierung und Kalibrierung
2. Referenzmessungen auf dem Erprobungsgelände
3. Modellbildung für das Durability-Transfer-Verfahren
4. Langzeitmessungen im Einsatz mit reduzierter Sensorik
5. Ableitung von Last- und Beanspruchungszeitfolgen
6. Gegenüberstellung von Einsatz- und Referenzmessungen
7. Komposition eines Erprobungszyklus und Ableitung des Prüfstandkollektivs

4.2 Sensorisierung und Kalibrierung

Zu Beginn wird nur ein ausgewähltes Referenzfahrzeug umfassend instrumentiert. Neben den relevanten Referenzgrößen werden an diesem Fahrzeug an allen interessierenden Bereichen Messstellen appliziert, um

Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen für Prüfstandsversuche

Beschleunigungen, lokale Beanspruchungen, Kräfte oder Momente direkt zu erfassen. Diese Messungen dienen der Modellbildung und Parametrierung des Durability-Transfer-Verfahrens.

Parallel dazu werden in die weiteren Fahrzeuge einer interessierenden Flotte lediglich die einfach zu messenden Referenzgrößen eingerüstet und wenn möglich mit einer mobilfunkfähigen OBU ausgerüstet, damit die relevanten Daten aus den Flottenmessungen direkt übertragen werden können.

4.3 Referenzmessungen auf dem Erprobungsgelände

Die Referenzmessungen werden mit dem einen Referenzfahrzeug auf definierten Erprobungsstrecken durchgeführt. Ziel ist es, charakteristische Fahrzustände und Lastfälle kontrolliert zu erzeugen und dabei sowohl die direkt gemessenen Beanspruchungen als auch die korrespondierenden Beschleunigungs- und CAN-Signale zu erfassen.

Diese Messungen bilden die Datengrundlage für das Durability-Transfer-Verfahren. Sie erlauben es, Zusammenhänge zwischen einfach zu messenden Eingangssignalen und komplexen strukturellen Beanspruchungen in verschiedenen Fahrzeugbereichen abzuleiten. Gleichzeitig dienen sie als Referenz für die spätere Validierung der im Einsatz berechneten Lastzeitfolgen.

4.4 Anwendung des Durability-Transfer-Verfahrens im Einsatz

Das Durability-Transfer-Verfahren ermöglicht Langzeitmessungen im realen Einsatz mit stark reduziertem Applikationsaufwand und autarker Messtechnik. Anstelle einer vollständigen Instrumentierung werden Fahrzeuge der Flotte lediglich mit einer kompakten Messtechnik ausgestattet, die Beschleunigungen sowie ausgewählte CAN-Größen aufzeichnet.

Auf Basis der zuvor durchgeführten Referenzmessungen werden Modelle parametrisiert, die aus diesen einfach zu messenden Größen zuverlässig Beanspruchungs- und Lastzeitfolgen ableiten. Das Verfahren überträgt somit die im Referenzfahrzeug erlernten Zusammenhänge auf eine große Anzahl von Einsatzfahrzeugen.

Durch diesen Ansatz können Beanspruchungen in unterschiedlichsten Fahrzeugbereichen – etwa an Strukturkomponenten, Fahrwerkselementen oder Anbindungspunkten – kostengünstig und über lange Zeiträume ermittelt werden. Gleichzeitig ermöglicht die autarke Messtechnik eine Datenerfassung ohne Eingriff in den regulären Fahrzeugbetrieb, was insbesondere für Flottenmessungen im Kundeneinsatz von entscheidender Bedeutung ist.

4.5 Statistische Auswertung und Ableitung repräsentativer Kundenprofile

Die aus dem Durability-Transfer-Verfahren abgeleiteten Last- und Beanspruchungszeitfolgen werden anschließend statistisch ausgewertet. Durch die große Anzahl an Fahrzeugen und Einsatzprofilen lassen sich Streuungen im Kundenverhalten sowie unterschiedliche Einsatzbedingungen abbilden.

Auf Basis dieser Auswertung wird ein repräsentatives Kundenprofil definiert, häufig in Form eines sogenannten 1%- Kunden. Dieses Profil beschreibt eine realistische Nutzung, die für die Auslegung und Absicherung am Prüfstand maßgeblich ist.

4.6 Vergleich Einsatz und Referenz sowie Ableitung des Prüfstandskollektivs

Abschließend werden die aus dem Einsatz abgeleiteten Beanspruchungen mit den Referenzmessungen vom Erprobungsgelände verglichen. Dieser Vergleich dient der Plausibilisierung und Validierung des Durability-Transfer-Verfahrens.

Auf Basis der validierten Einsatzdaten wird ein Erprobungszyklus komponiert, der die relevanten Lastanteile gerafft und für den Prüfstand geeignet aufbereitet. Daraus wird schließlich ein Prüfstandskollektiv abgeleitet, welches die

Erhebung relevanter Lasten und Beanspruchungen für Prüfstandsversuche

realen Einsatzbeanspruchungen statistisch abgesichert und reproduzierbar abbildet.

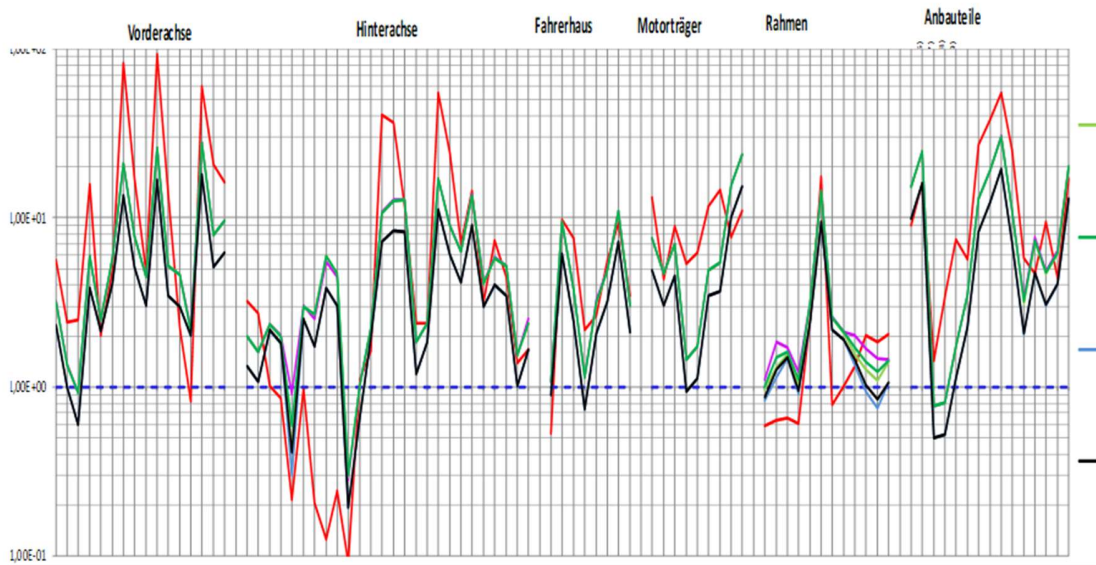


Abb 3.: Komposition Erprobungszyklus

5. Ableitung des Prüfstandskollektivs

Die Ableitung des Prüfstandskollektivs stellt den abschließenden Schritt dar. Ziel ist es, die komplexen und variablen Einsatzlasten in ein reproduzierbares, zeitlich komprimiertes und prüfstandstaugliches Lastkollektiv zu überführen. Dabei müssen sowohl maximale Lasten als auch die Häufigkeit der Beanspruchungen berücksichtigt werden.

Je nach Szenario basiert das Prüfstandskollektiv entweder auf einem vorhandenen Auslegungsmaßstab oder auf statistisch abgesicherten Einsatzdaten.

Multivalente Messtechnik – Grundlage für belastbare KI und intelligente Prüfstands Systeme

Bernhard Rennhofer

Gantner Instruments Test&Measurement GmbH, Oskar-Sembach-Ring 26a, 92107 Lauf an der Pegnitz

Quellen

Teile der Texte sind mit Unterstützung von ChatGPT entstanden, wurden jedoch auf Ihre Richtigkeit hin überprüft. ChatGPT wird als Quelle im laufenden Text nicht mehr explizit ausgewiesen. Unternehmensbedingt sind auch viele Texte direkt aus dem Wissen von Gantner Instruments GmbH entnommen und nicht alle Textpassagen werden entsprechend mit Quellenangaben versehen.

Copyright

Copyright ©Bernhard Rennhofer – Gantner Instruments Test&Measurement GmbH 2026

Für die Verwendung an der Konferenz TestRig 2026 und dessen Begleitband in Druck wie auch in digitaler Form freigegeben.

Einleitung: Was bedeutet der Begriff multivalent in der Messtechnik?

Bevor man über die Zukunft messtechnischer Anwendungen – insbesondere im Zusammenhang mit künstlicher Intelligenz – sprechen kann, müssen die Anforderungen betrachtet werden, die durch neue Herausforderungen entstehen. Ein multivalentes Messsystem bildet die Grundlage, um diesen zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden.

Multivalent bedeutet in diesem Kontext, dass ein Messsystem in mehreren Funktionen wirksam eingesetzt werden kann: Es erfasst nicht nur verschiedene Messgrößen, sondern bietet zudem eine offene und flexible Kommunikationsvielfalt, wodurch unterschiedliche Datenquellen in einem einzigen System aggregiert werden können.

Besitzt ein solches System darüber hinaus die Fähigkeit, jederzeit in Umfang, Funktion und Kanalzahl erweiterbar zu sein, spricht man von einem modularen, skalierbaren und multivalenten Messsystem.

Im Folgenden soll der Begriff des multivalenten Messsystems in den Kontext der künstlichen Intelligenz als Teil der notwendigen qualitativ hochwertigen Messtechnik genauer beleuchtet werden. Vor allem im Bezug der wechselhaften und sich schnell ändernden Anforderungen sowie dem Prinzip des „Garbage in / Garbage Out“ sind solche Arten von Messtechniken ein Schlüsselfaktor für zukünftige Simulationsmodelle und deren Erfolg.

Anforderungen an die Messtechnik

Das Thema mit der Auflösung und der Messunsicherheit

Eine Auflösung ist im Grunde eine Angabe, welche die kleinstmögliche Darstellung eines jeden Signals auf einer Achse darstellen kann. An der Stelle nicht gleich zu setzen mit der Messunsicherheit. Alle A/D Wandler nutzen das Prinzip, bei dem als Input ein analoges Signal angelegt wird und am Output ein entsprechendes digital codiertes Signal ausgegeben wird.



Symbol eines A/D Wandlers

Dabei wird die Auflösung eines A/D Wandlers in Bit angegeben. Der unendliche Wertebereich von analogen Messgrößen wird dabei auf den endlichen binären Wertebereich aufgeteilt. Man spricht auch von Quantisieren

und jede einzelne Stufe entspricht dabei ein Quant. Ein 4bit Wandler könnte somit einen Messbereich von 10V zum Beispiel in 16 Quantisierungsstufen unterteilen. Jeder Schritt, also Quant hätte dabei 0,625V.

$$q = \frac{V_{Range}}{2^n}$$

Standardgrößen für A/D Wandler (Typ SAR und deltaSigma) sind 8bit, 12bit, 16bit und 24bit. Darüber hinaus finden sich vor allem bei Digitalmultimeter die Angabe Digits bzw. Counts. Die Digits sind dabei anders zu verstehen als die Bit Angabe. Ein DMM mit 3½ Digits kann 1999 Stellen darstellen. Das Komma kann dabei je nach Messbereich frei gesetzt werden. Eine ganze Zahl - also in dem Beispiel die 3 von der Digit Darstellung - kann einen Wert von 0 bis 9 annehmen. Der Bruch ½ gibt im Zähler den maximalen Wert an und im Nenner die Anzahl der möglichen Zustände. Daraus ergeben sich für die Digitalanzeige eines Digitalmultimeters mit 3½ Digits.

- 0,000-1,999
- 2,00 bis 19,99
- 20,0 bis 199,9
- 200 bis 1999

Ein Messgerät mit 6¾ Digits kann also 3999999 Stellen darstellen. Man kann die Angabe Digits in eine äquivalente Bit Anzahl umrechnen. So würden 1999 Digits ungefähr 10bit entsprechen oder ein Messgerät mit der Angabe 6½ Digits einem Messgerät mit ungefähr 20Bit.

Übersicht der Auflösungen unterschiedlicher Bit Anzahl

Auflösung	Anzahl der Stufen	Rel. Auflösung [%]
8bit	256	0,391
12bit	4096	0,024
16bit	65536	0,0015
24bit	16777216	0,000006
3 ½ (Digits)	1999	0,05
6 ½ (Digits)	1999999	0,00005

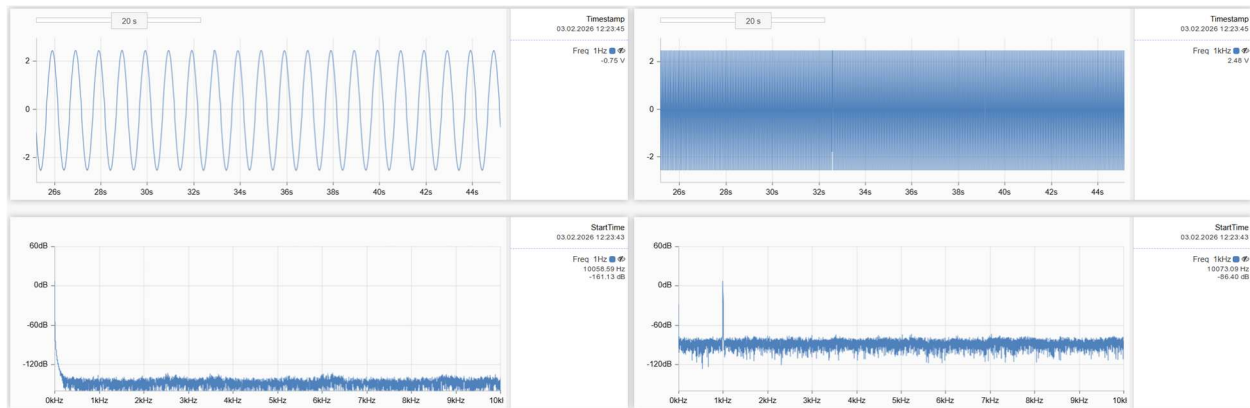
Wie eingangs erwähnt, darf eine Quantisierungsstufe – oder geläufiger: die Auflösung eines Messsystems – nicht mit der Messunsicherheit verwechselt werden. Jede Messkette weist sowohl physikalisch als auch prozessbedingt gewisse Unschärfen auf. Diese dazu führen, dass das digitalisierte Eingangssignal nicht nur quantisiert, sondern auch durch zusätzliche Effekte verfälscht wird. Dazu gehören unter anderem systembedingte Verzerrungen und unvermeidbares Rauschen. Diese Einflüsse bestimmen, mit welcher Genauigkeit ein Messgerät ein analoges Signal tatsächlich erfassen und digital abbilden kann. Damit setzen damit die praktische Grenze zwischen theoretischer Auflösung und real erzielbarer Messgüte. Meistens wird der Abstand zwischen einem Signal und dem Rauschen in dB angegeben und folgt der Formel:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{Signal}}{A_{Noise}} \right)$$

Zu beachten ist, dass das Verhältnis von Signal zu Rauschen stets von der jeweils anliegenden Eingangsfrequenz abhängt. Viele Spezifikationen unterschiedlicher Messtechnikhersteller geben zwar einen „besten Wert“ für den

Signal-Rausch-Abstand (SNR) an, doch häufig fehlt der Hinweis, für welche Frequenz dieser Wert tatsächlich gilt. In der Praxis empfiehlt es sich daher, bei fehlenden Angaben von einem typischen Bereich um 1 Hz auszugehen. Für Anwendungen, in denen die exakte Bestimmung der Messunsicherheit erforderlich ist, sollte der SNR jedoch unbedingt selbst gemessen und ausgewertet werden, anstatt sich ausschließlich auf Herstellerangaben zu verlassen.

Im Folgenden werden zwei praxisnahe Beispiele dargestellt, die jeweils eine FFT-Analyse zweier Sinussignale zeigen. Signal 1 entspricht einem 1-Hz-Sinus, Signal 2 einem 1-kHz-Sinus.



Signal-Rausch Verhältnis an der Q.bloxx-XL A111 bei 1Hz und 1kHz

Auf der linken Seite befindet sich das 1-Hz-Signal. Wie deutlich zu erkennen ist, liegt der Signal-Rausch-Abstand bei über 120 dB. Beim 1-kHz-Signal reduziert sich dieser Wert auf über 90 dB. Anders ausgedrückt bedeutet das: Signale deren Amplitude unter etwa 10 μV bei 1 Hz oder unter 320 μV bei 1 kHz liegt, können nicht mehr zuverlässig detektiert werden und das unabhängig von der theoretischen Auflösung des eingesetzten Messgerätes.

Das Rauschen ist jedoch nur ein Einflussfaktor auf die Messunsicherheit. Weitere relevante Faktoren sind Temperaturdrifts, Alterung der verwendeten Bauteile, das Verhalten eingesetzter Filter sowie der elektrotechnische Aufbau der Messschaltung, sowohl im Messinstrument als auch im Bereich der Sensorschnittstelle. Diese Einflüsse führen zu Messunsicherheitsangaben, die nicht normiert sind und daher häufig nur über die Interpretation der verfügbaren Spezifikationen erschließbar werden. In Datenblättern findet man Messunsicherheiten beispielsweise in Prozent, ppm (parts per million) oder als absolute Werte angegeben. Zu beachten ist, dass diese Angaben in der Regel Best-Case-Szenarien entsprechen – typischerweise bei Raumtemperatur um +23 °C und einer Luftfeuchte von etwa 45 %.

Eine Angabe 0,01% auf dem Messbereich bedeutet somit:

- Annahme: Messbereich +/-10V → gesamter Messbereich 20V
- Messunsicherheit: 0,01%, bzw 100ppm

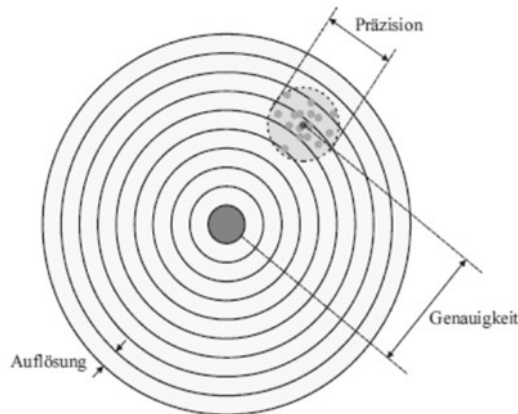
$$u = \frac{\text{Messbereich}}{100} * \text{Messunsicherheit} [\%] = \frac{20\text{V}}{100} * 0,01\% = \pm 2\text{mV}$$

Weitere gängige Angaben sind eine Messunsicherheitsangabe auf den Messbereich plus den erfassten Messwert. Beide Angaben sind vollkommen korrekt.

Wenn man genauer hinsieht, finden sich in vielen Spezifikationen verschiedener Hersteller die Begriffe Messgenauigkeit und Messunsicherheit. Diese werden häufig gleichgesetzt, beschreiben jedoch unterschiedliche Sachverhalte. Die Messunsicherheit ist eine quantifizierte Angabe, die durch das verwendete Messmittel und die Messbedingungen bestimmt wird. Sie gibt an, in welchem Bereich um das Messergebnis der wahre Wert mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit erwartet werden kann.

Beispiel: Beträgt die Messunsicherheit ± 2 mV und beträgt der angegebene Wert 5,000 V, dann ist ein Messergebnis im Bereich von 4,998 V bis 5,002 V im Sinne der gewählten Vertrauenswahrscheinlichkeit akzeptabel.

Die Messgenauigkeit hingegen beschreibt die Übereinstimmung eines Messergebnisses mit dem wahren Wert. Sie ist eine qualitative Eigenschaft eines Messverfahrens oder eines Gerätes und wird daher nicht als numerischer Wert angegeben. Während die Messunsicherheit den Bereich definiert, in dem der wahre Wert mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt, charakterisiert die Messgenauigkeit die Güte dieser Annäherung. In anderen Worten: Die Messgenauigkeit bewertet die tatsächliche Nähe des Messwertes zur Realität.

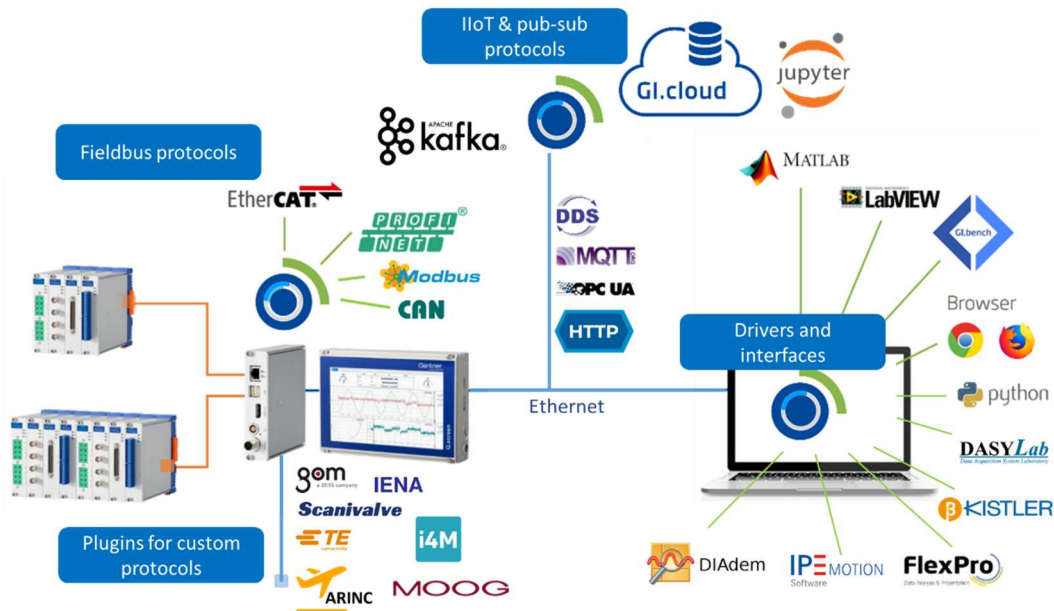


Auflösung, Präzision und Genauigkeit (Testo, 2023, S. 15)

Ein weiterer zentraler Begriff ist die Präzision, die in der Messtechnik häufig mit der Wiederholgenauigkeit gleichgesetzt wird. Beide Konzepte beziehen sich auf die Streuung der Messergebnisse und beschreiben, wie eng mehrere Messwerte beieinander liegen, wenn alle Umgebungsbedingungen konstant sind und die Messungen in einem kurzen Zeitintervall erfolgen. Streng genommen ist Präzision der Oberbegriff für die Nähe der Messergebnisse zueinander, während die Wiederholgenauigkeit die Präzision unter streng identischen Bedingungen beschreibt, also mit demselben Messverfahren, demselben Gerät, demselben Bediener und unter unveränderten Umgebungsbedingungen. Die entsprechenden Definitionen und Prüfbedingungen sind in der Norm ISO 5725 beschrieben.

Die Konnektivität

Moderne Messsysteme bieten heutzutage eine Fülle an Schnittstellen, um diverse Kanäle für Signale einzubinden. Das können typische analoge Signale sein, Feldbussysteme wie Profinet oder EtherCAT, CAN oder Modbus. Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere hersteller- und produktspezifisch Schnittstellen. Die Offenheit auch solche Geräte flexibel einzusetzen, grenzen echte multivalente Systeme von allgemeinen ab.



Konnektivität einer modernen Messsystemlösung

Zusätzlich sind die zu lösenden Aufgaben nicht allein auf die Echtzeitumgebung beschränkt. Auch auf der nicht deterministischen Systemseite eröffnet sich ein breites Spektrum an Anforderungen und Möglichkeiten. Eine entsprechende API muss in der Lage sein, diese Aufgaben abzudecken und sowohl den Datenaustausch als auch die Weiterverarbeitung flexibel zu unterstützen. Dazu gehören industrielle IoT Schnittstellen wie MQTT oder OPC UA als verbreitete Vertreter für den Austausch von Prozessdaten. Darüber hinaus spielen moderne Programmiersprachen und Werkzeuge zur Datenanalyse eine immer größere Rolle. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit leicht einsetzbarer Werkzeuge wie Pytorch oder TensorFlow gewinnen Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens und der vorausschauenden Instandhaltung weiter an Bedeutung. Künstliche Intelligenz wird damit zu einem zentralen Bestandteil zukünftiger Analysesysteme, da sie Muster, Trends und Ausnahmesituationen in komplexen Datenbeständen erkennen und in Techniken der Prozessüberwachung oder Entscheidungsunterstützung einfließen lassen kann.

Neben einer leistungsfähigen API spielen auch Aspekte wie Cyber Security, Datenbandbreite und Datenaufbereitung eine wesentliche Rolle in modernen Messsystemen. Besonders im Cloud Umfeld hat Sicherheit einen hohen Stellenwert, da Messdaten zunehmend in verteilten Architekturen verarbeitet, gespeichert und analysiert werden. Dabei stehen nicht mehr klassische relationale Datenbanken im Vordergrund, sondern moderne nicht relationale und verteilte Time Series und NoSQL Systeme, die speziell für hochfrequente Messdaten und kontinuierliche Datenströme ausgelegt sind.

Die GI.cloud folgt genau diesem Architekturprinzip. Sie basiert auf einem verteilten NoSQL Time Series Datenbanksystem, das für extrem schnelle Zeitreihen bis in den Mikrosekundenbereich optimiert ist und kontinuierliches Streaming, horizontale Skalierung, Hot und Cold Storage Konzepte sowie ereignisbasierte Verarbeitung und analytische Auswertungen unterstützt. Damit solche Architekturen zuverlässig betrieben werden können, müssen Sicherheitsmechanismen wie starke Authentifizierungsverfahren, verschlüsselte Übertragungswege, robuste Zugriffskontrollen und konsequente Mandantentrennung umgesetzt werden, insbesondere wenn Messdaten über öffentliche oder hybride Cloud Strukturen laufen.

Gleichzeitig erfordern die enormen Datenraten moderner Sensorik effiziente Methoden zur Datenreduktion, Signalvorverarbeitung und intelligenten Filterung, um Übertragungswege und zentrale Speicher zu entlasten. Erst durch diese Vorverarbeitung lässt sich sicherstellen, dass Daten in einer Form vorliegen, die für

weiterführende Analysen, automatisierte Auswertungen oder den Einsatz von künstlicher Intelligenz tatsächlich nutzbar sind.

Gerade im Zusammenhang mit künstlicher Intelligenz entstehen zusätzliche Anforderungen an Messinstrumente und Datenerfassungssysteme. Themen wie Messunsicherheit, Datenqualität und Datenintegration gewinnen im Kontext von Machine Learning und datengetriebenen Modellen erheblich an Bedeutung. KI Modelle können nur dann robuste und belastbare Ergebnisse liefern, wenn die zugrunde liegenden Signale korrekt erfasst, sauber aufbereitet und eindeutig interpretierbar sind. Dadurch entwickeln sich Messtechnik und Datenmanagement zunehmend zu zentralen Bestandteilen eines ganzheitlichen KI Systems, in dem die Qualität der Eingangsdaten maßgeblich über die Leistungsfähigkeit der daraus resultierenden Modelle entscheidet.

Qualität und Quantität bei künstlicher Intelligenz

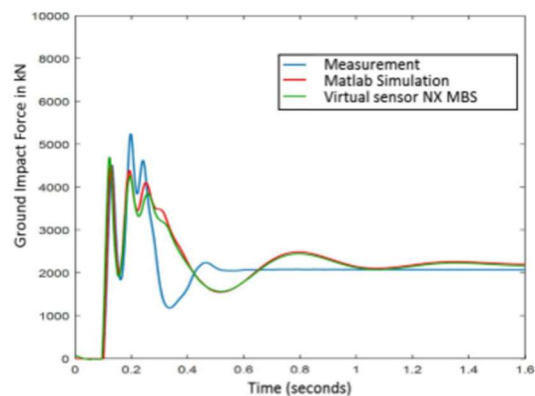
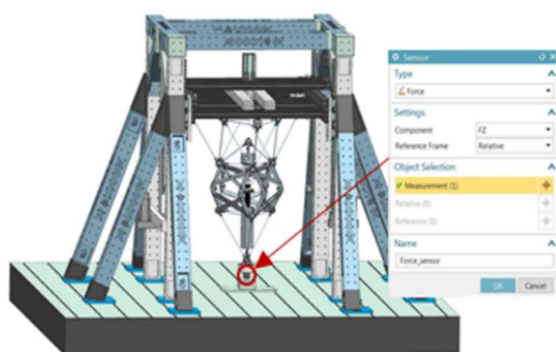
Die Grundlage leistungsfähiger KI-Modelle und simulationsgestützter Digital Twins ist die Qualität und Quantität der erfassten Messdaten. In der Messtechnik bedeutet dies, dass die zugrunde liegenden Sensorsignale nicht nur in großer Menge vorliegen müssen, sondern vor allem eine hohe Aussagekraft besitzen. Für KI-Algorithmen – insbesondere für Modelle zur Anomalie Erkennung, Prädiktion oder Musterklassifikation – ist qualitative Minderleistung oft kritischer als ein Mangel an Datenpunkten. Rauschen, fehlende Kalibrierung, unzureichende Auflösung, Drift oder falsch konfigurierte Abtastraten können die Lernfähigkeit von KI-Systemen massiv einschränken und zu verzerrten oder unzuverlässigen Ergebnissen führen.

Mehr Datenpunkte führen daher nur dann zu besseren Ergebnissen, wenn die Signale korrekt synchronisiert, lückenlos erfasst und hinsichtlich Kontextinformationen (z. B. Lastzustände, Temperaturen, Betriebsparameter) eindeutig zuordenbar sind. Nur dann lassen sich die realen physikalischen Zusammenhänge tatsächlich abbilden.

Für simulationsbasierte Modelle und digitale Zwillinge spielt die Datenvalidität zusätzlich eine Schlüsselrolle: Nur präzise Messwerte mit geringer Unsicherheit ermöglichen eine zuverlässige Parametrisierung von Modellen, die später echte Betriebszustände vorhersagen oder optimieren sollen. Schlechte Datenqualität führt hier direkt zu falschen Modellparametern, die auch durch große Datenmengen nicht kompensiert werden können. Die Verlässlichkeit einer Simulation ist am Ende nur so gut wie die realen Messdaten, mit denen sie gespeist wird. Daraus folgt, dass Modelle die mit Messdaten bestimmter Messunsicherheit erstellt wurden, auch nur im Rahmen dieser Messunsicherheit simulierte Ergebnisse wiedergeben kann.

Das Zusammenspiel aus hochauflösender, rauscharm erfasster Sensorik, korrekter zeitlicher Synchronisation, skalierbarer Datenhaltung und intelligenter Datenvorverarbeitung bildet daher die Grundlage für erfolgreiche KI-Anwendungen und belastbare simulationsbasierte Modelle. Systeme wie die GI.cloud unterstützen dies, indem sie speziell für hochfrequente Time-Series-Daten optimiert sind, große Datenmengen effizient speichern und Echtzeit-Analysen ermöglichen.

Das folgende Beispiel soll exemplarisch die Ergebnisse einer realen Messung im Vergleich zu einer Matlab-Simulation im Rahmen eines Software-in-the-Loop (SIL)-Ansatzes sowie den Resultaten eines virtuellen Sensors aus einem Hardware-in-the-Loop (HIL)-Ansatzes veranschaulichen.

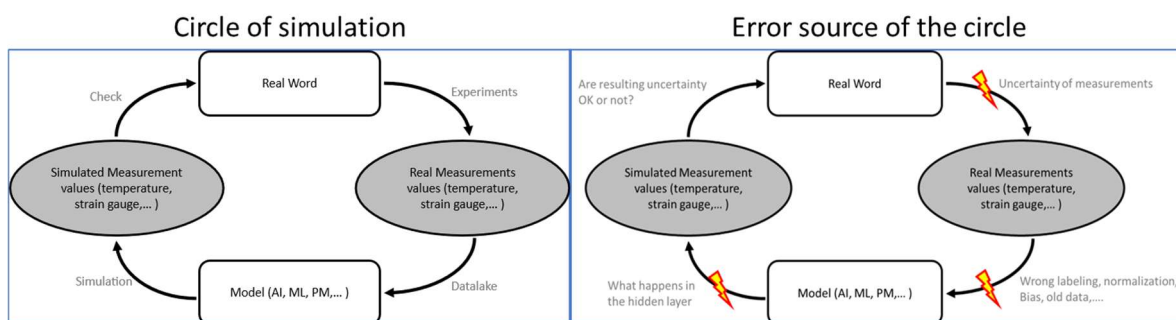


Enabling the digital twin: a review of the modelling of measurement uncertainty on data transfer standards and its relationship with data from tests
Jose Rios, Georg Stautter, Mirtz Weber and Reiner Anderl, 2020

Beispiel realer und Simulierter Messdaten

Die simulierten Werte weisen eine sehr hohe interne Konsistenz auf. Allerdings stimmen sie nicht vollständig mit den realen Messdaten überein. Zwar lässt sich bei den realen Messwerten eine ähnliche Tendenz erkennen, dennoch treten deutliche Abweichungen auf, die hinsichtlich ihrer Ursachen analysiert werden müssen. Um diese Diskrepanz fundiert einordnen zu können, ist zunächst zu klären, welcher Datensatz potenziell die Abweichung verursacht: Weichen die Simulationsergebnisse aufgrund unvollständiger Modellierung von den physikalischen Gegebenheiten ab, oder sind die realen Messwerte durch Messunsicherheiten, äußere Einflüsse oder fehlerhafte Parametrierung beeinflusst?

Aus solchen Versuchen wird deutlich, wie essenziell es ist, Simulationsmodelle, die auf realen Messdaten, geschätzten Parametern oder Erfahrungswerten basieren, kontinuierlich mit der Realität abzugleichen. Die Validierung solcher Modelle ist ein iterativer Prozess: Die reale Welt liefert die Datenbasis für die virtuelle Abbildung, während die virtuelle Welt wiederum durch Vergleich und Gegenprüfung an den realen Messwerten bewertet und verbessert werden muss.

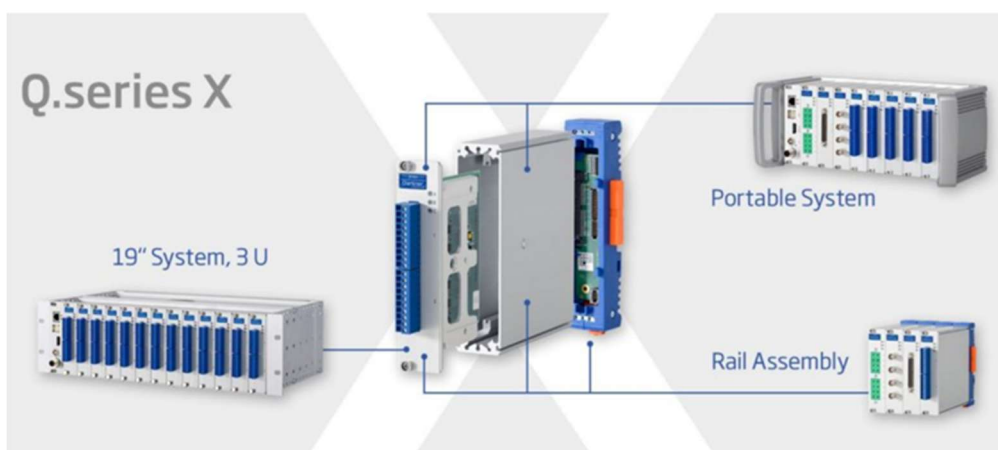


Kreislauf der Datengenerierung für Simulationen und deren Fehlerquellen

Dabei kommt der Qualität der Messtechnik eine zentrale Bedeutung zu. Nur präzise Sensorik, ein sauberer und reproduzierbarer Messaufbau sowie die Minimierung externer Einflüsse gewährleisten, dass die verwendeten Messdaten tatsächlich die physikalische Realität widerspiegeln. Je höher die Datenqualität, desto verlässlicher lassen sich Simulationsmodelle parametrieren, kalibrieren und zur Vorhersage realer Betriebszustände nutzen.

Lösung von Gantner Instruments

Gantner Instruments bietet – bei richtiger Betrachtung der jeweiligen Applikation – eine ideale Grundlage für Anwendungen im Bereich künstlicher Intelligenz, modellbasierter Algorithmen und simulationsgestützter Systeme. Die zuvor beschriebenen Anforderungen an multivalente, hochperformante und exakt synchronisierte Messsysteme werden durch die Plattform der Q.series X in besonderem Maße erfüllt.

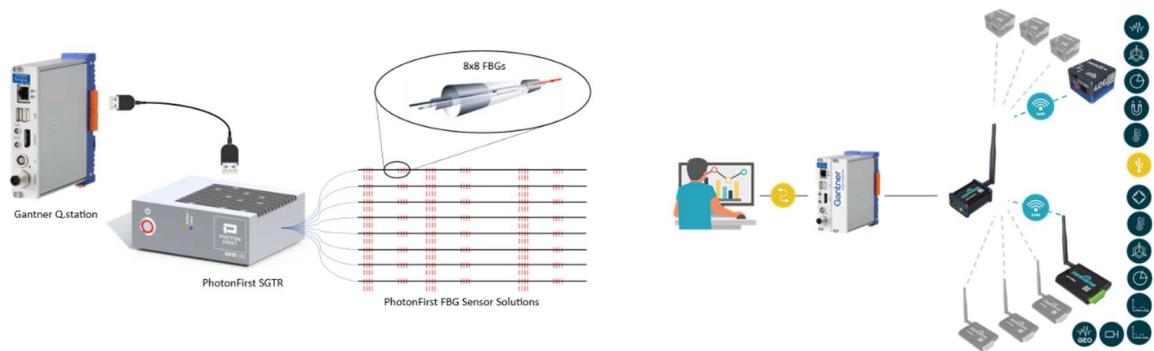


Messtechnisches Konzept der Q.series X von Gantner Instruments

Dank ihrer offenen Schnittstellen zu deterministischen Feldbussystemen, der modularen Architektur und der hohen Skalierbarkeit lassen sich selbst komplexe KI-Workflows, digitale Zwillinge oder Hardware-/Software-in-the-Loop-Ansätze nahtlos integrieren. Das System ist nicht nur flexibel, sondern auch zukunftssicher ausgelegt.

Ein wesentlicher Vorteil ergibt sich aus dem stabilen Echtzeitbetriebssystem, das deterministische Ausführungszeiten bis 10 kHz ermöglicht und Abtastraten bis zu 100 kHz unterstützt. Dadurch können auch hochdynamische physikalische Prozesse zuverlässig erfasst werden – eine Grundvoraussetzung für hochwertige Trainingsdaten, präzise Simulationsmodelle und robuste KI-Vorhersagen.

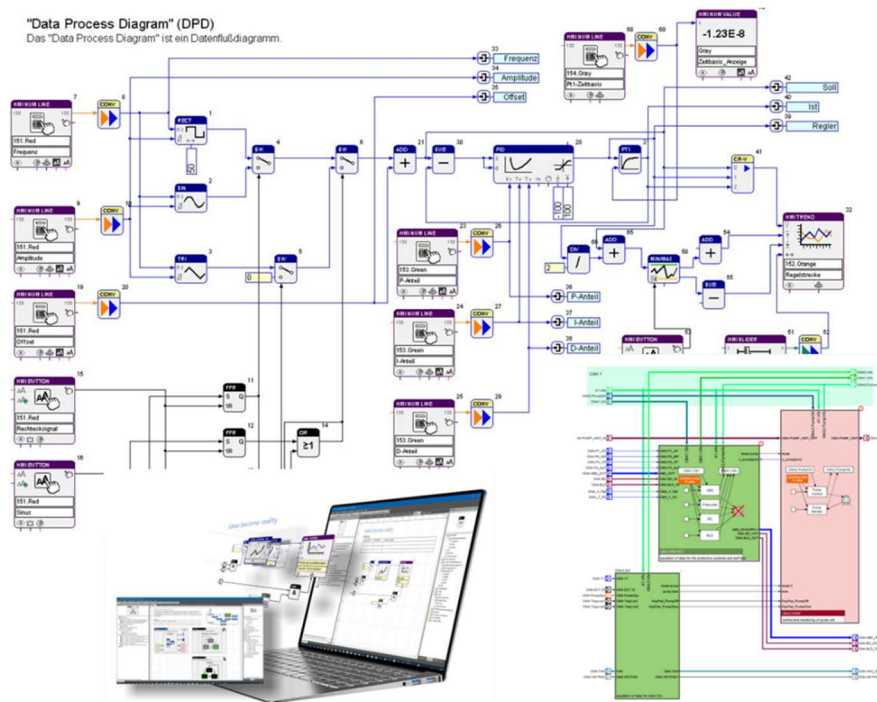
Darüber hinaus verfügen die Geräte über integrierte Datenlogger, die sich durch sogenannte Plug-ins funktional erweitern lassen. Diese Architektur erlaubt nicht nur die einfache Ergänzung kundenspezifischer Funktionen, sondern schafft auch die Basis für langfristige Portabilität und Systemerweiterbarkeit. So können beispielsweise 3rd-Party-Erweiterungen eingebunden werden, etwa zur Integration von Wireless-Sensorik, faseroptischer Messtechnik oder weiteren spezialisierten Datenerfassungsmethoden.



Anbindung von FBG und wireless Sensorik von 3rd Party an Gantner Instruments Controller

Durch die Kombination aus Hochleistungssensorik, skalierbarer Datenarchitektur und offener Systemintegration wird Gantner Instruments zu einem Schlüsselbaustein für moderne, datengetriebene Entwicklungs-, Test- und Validierungsprozesse – von der klassischen Messdatenerfassung über KI-Modelle bis hin zu vollwertigen digitalen Zwillingen.

Test.Con ist ein grafisches Programmiersystem von Gantner Instruments, das speziell für den Einsatz in industriellen Mess-, Steuer- und Automatisierungsanwendungen entwickelt wurde. Es stellt eine modellbasierte Entwicklungsumgebung zur Verfügung, mit der Anwender anwendungsspezifische Funktionen, Steuerungslogik, Berechnungen und Visualisierungen grafisch über Funktionsbausteine und Blockdiagramme erstellen können, ohne klassische Programmiersprachen schreiben zu müssen. Die erstellten Programme laufen in Echtzeit direkt auf Edge-Computing-Geräten wie der Q.station XT-Controller-Familie. Dadurch lassen sich leistungsfähige Automatisierungssysteme realisieren, die Daten erfassen, Prozesse überwachen, regeln und visualisieren. Die integrierte grafische Oberfläche ermöglicht es, komplexe Automatisierungslogik, Prozessvariablensteuerung und PAC-Funktionalitäten (programmable automation controller) intuitiv zu gestalten. Besonders vorteilhaft ist, dass test.con ohne zusätzliche externe Software oder einen permanent angeschlossenen PC auskommt und direkt auf dem Steuergerät läuft. Die Software ist kostenlos nutzbar, erfordert lediglich einen entsprechenden Controller und eignet sich vor allem für Industrie-Automatisierung, Prüfstandsteuerung und datengesteuerte Steuerungsaufgaben im industriellen Umfeld.



Model Based Design mit Test.con

Test.con verbindet grafische Programmierung mit domänenspezifischen Modellen. Es zielt darauf ab, Komplexität zu reduzieren, Fachwissen direkt in die Softwaremodelle einzubetten und die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen technischen Disziplinen zu erleichtern.

Ausblick

Im Kontext von Datenqualität, KI und simulationsgestützten Verfahren zeigt sich ein klarer Ausblick auf die Erweiterungsfähigkeit der Q.station mit test.con. Der Werkzeugkasten SYNTHIA bildet eine engineering nahe Brücke für synthetische, konsistent gelabelte Trainings- und Testdaten – nutzbar für Training sowie Verifikation und Validierung. Kern ist test.con: Dynamische und stochastische Modelle, Fehler- und Anomalie Signaturen, Recorder-Replays und kurvendesignerbasierte Signalbausteine lassen sich kombinieren. Automatisches Labeling über Zustandsmodelle und Exportpipelines, insbesondere zu TensorFlow, schaffen einen reproduzierbaren, auditierbaren Datenpfad; ergänzend ermöglicht die Toolchain HIL-/SIL-Verifikation mit Echtzeit-Einspielung und paralleler Erfassung.

Für die Q.station ergibt sich damit eine schlüssige Entwicklungsrichtung: SYNTHIA TFR kann TFRecord-Datensätze für TensorFlow erzeugen, während SYNTHIA TFI eine Inferenz direkt auf der Q.station in Aussicht stellt – edge-nah für virtuelle Sensorik, Anomalie Erkennung und prädiktive Auswertung. TensorFlow deckt den gesamten ML-Lebenszyklus (Machine Learning) ab; TensorFlow Lite adressiert ressourcenbegrenzte Edge-Geräte, wo die Q.station ihre Stärken in deterministischen Abläufen ausspielt.

Das ist bewusst ein Ausblick, keine zugesicherte Funktion oder finale Architektur. Konkrete Leistungsdaten wie Inferenzraten, Latenzen sowie Speicher- und CPU-Budgets sind modell- und projektabhängig und müssen in der Zielanwendung evaluiert werden. Wichtig bleibt: Datenqualität, Synchronität und Kontext sind entscheidend; synthetische Daten schließen Lücken, die Validität entsteht im Abgleich mit der realen Messwelt innerhalb einer einheitlichen Q.station/test.con Umgebung.

Zusammenfassung

Moderne Prüf- und Messanwendungen stehen vor der Herausforderung, immer größere Datenmengen in hoher Qualität zu erfassen, sicher zu verarbeiten und für Simulationen, KI-Modelle und Digital-Twin-Ansätze nutzbar zu machen. Hochwertige Sensorik, präzise Synchronisation, beherrschte Messunsicherheit und eine robuste Signalaufbereitung bilden dabei die Grundlage für verlässliche Analysen und automatisierte Entscheidungen.

Gleichzeitig gewinnen Konnektivität und Offenheit an Bedeutung: Von klassischen analogen Signalen über Feldbusse bis hin zu IoT-Protokollen sowie Anbindungen an Datenanalyse- und KI-Werkzeuge entsteht ein vielfältiges technisches Ökosystem, das flexible und skalierbare Lösungen erfordert.

Eine Kombination aus leistungsfähiger Echtzeitverarbeitung, modularer Erweiterbarkeit, integrierter Datenaufzeichnung und moderner Cloud-Architektur eignet sich, diese aktuellen und zukünftigen Anforderungen zu erfüllen. Dazu gehören auch der Einsatz synthetischer und realer Daten für KI-Trainingsprozesse, automatische Labeling-Mechanismen, Exportpfade in Formate wie TensorFlow sowie Testverfahren wie Hardware- und Software-in-the-Loop zur Validierung.

Durch diesen ganzheitlichen Ansatz entsteht ein technischer Rahmen, der sowohl klassische Mess- und Prüfaufgaben als auch datengetriebene Verfahren, virtuelle Sensorik, prädiktive Modelle und simulationsgestützte Entwicklungsprozesse unterstützt. Die dargestellten Konzepte verdeutlichen, dass sich sowohl heutige Herausforderungen als auch künftige Entwicklungen einer KI-getriebenen Prüftechnik mit einem integrierten System aus Messtechnik, Datenmanagement und flexibler Softwarearchitektur nachhaltig umsetzen lassen – ohne sich auf einen einzelnen Hersteller fokussieren zu müssen.

Ihr Partner für innovative und zuverlässige Prüfstandsmessungen.



Q.series eXtended
Performance
Up to 4 MHz

Mobilität
Luft- und Raumfahrt
Energie
Infrastruktur und Bauwesen
Forschung
Sicherheit und Verteidigung

Modulares Systemdesign
Hoch genaue Messungen
OnBoard frei konfigurierbare Datenlogger
Hohe Datenverfügbarkeit
Maximale Konnektivität
Automatisierte Abläufe mittels "non Code"
Abtastraten bis 4MHz

Erfahren Sie auf der TestRig 2026, wie Gantner Instruments Messdaten in echten Mehrwert verwandelt - heute und für die nächste Generation von Prüfständen

Mehr Infos auf unserer Website



Kalibrierung einer Sechskomponenten-Messapplikation an einer Nutzfahrzeugachse

Felix Uptmoor

GRIMME Landmaschinenfabrik SE & Co. KG, Hunteburger Str. 32, 49401 Damme, Deutschland

Zusammenfassung

Zur Erfassung der Schnittgrößen (Kräfte und Momente) zwischen Achsschenkel und Raupenlaufwerken einer schweren Erntemaschine wurde eine Sechskomponenten-Messapplikation entwickelt, kalibriert und betrieben. Diese Arbeit zeigt ein Anwendungsbeispiel für Transformationsketten in einem mehrachsigen Messsystem mit überbestimmtem Signaleingang.

Nomenklatur

C – Kalibrierlastenvektor $C \in \mathbb{R}^6$

F – Kraft-Momenten-Vektor $F \in \mathbb{R}^6$

L – Lastmatrix $T \in \mathbb{R}^{(6 \times 6)}$

U – Dehnungssignal $U \in \mathbb{R}^{(6 \leq n \leq 18)}$

R – Reaktionsmatrix; enthält die linearisierten Dehnungsantworten auf die Kalibrierlasten. $R \in \mathbb{R}^{(6 \times 6 \leq n \leq 1)}$

R^+ – Moore-Penrose-Inverse von R . Für $R \in \mathbb{R}^{(m \times n)}$ gilt $R^+ \in \mathbb{R}^{(n \times m)}$

x, y, z – Raumkoordinaten

δ_{ij} – Kronecker-delta

Tabelle 1: Erläuterung des verwendeten Koordinatensystems

Koordinatensystem Kalibrierprüfstand (hier verwendet)	Entsprechende Richtung am Fahrzeug	Fahrzeugkoordinaten (DIN ISO 8855)
x	Vertikal n. unten	$-z$
y	Links (in Fahrtr.); Achse des Rohrabschnitts (Flansch)	y
z	Fahrtrichtung	x

1. Einleitung

An den Raupenlaufwerken einer selbstfahrenden Erntemaschine sollte der sechsachsige Schnittgrößenvektor $S \in \mathbb{R}^6$, bestehend aus drei Kräften und drei Momenten im realen Einsatz erfasst werden.

Basierend auf Serienbauteilen wurde ein eigenes Messsystem geschaffen. Entwicklung, Bau, Kalibrierung, Betrieb und Auswertung wurden in einem kooperativen Projekt zwischen Fahrzeughersteller (GRIMME Landmaschinenfabrik, Damme) und Raupenlieferant (CLAAS Industrietechnik, Paderborn – kurz *CIT*) durchgeführt.

2. Beschreibung der Applikation und Methodik

Ähnlich wie Radnabenmotore einer Triebachse werden die Raupen dieser Maschine auf lenkbare Achsschenkel geflanscht. Sie besitzen ein Pendelgelenk um die Querachse. Dabei ist die Pendelbewegung durch Anschläge begrenzt, um Kollisionen mit dem darüber befindlichen Siebkanal zu verhindern.

Kalibrierung einer Sechskomponenten-Messapplikation an einer Nutzfahrzeugachse

Aufgrund der hohen Lasten und begrenztem Bauraum konnte nicht auf handelsübliche Sechskomponenten-Sensoren zurückgegriffen werden. Ein kurzer rohrförmiger Abschnitt am betreffenden Achsschenkel (*Flansch*) wurde gezielt geschwächt und mit DMS appliziert.

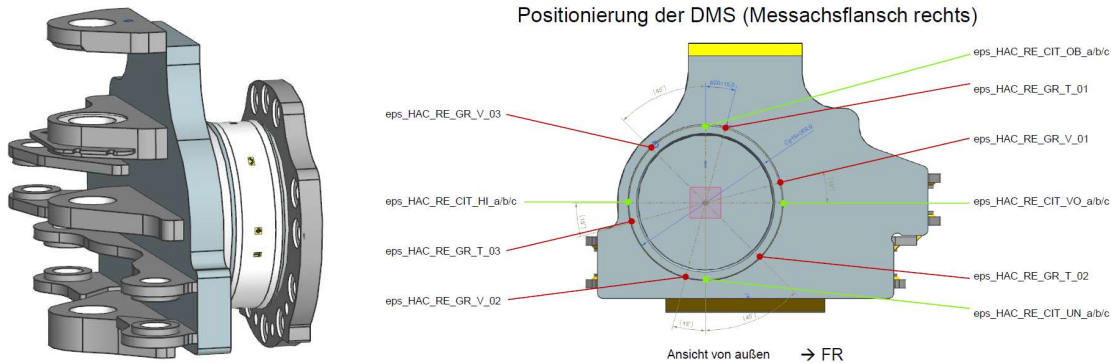


Abb. 1: Messapplikation. Links: Achsschenkel (CAD-Zeichnung). An der linken Seite Laschen für Lenkzapfen, Lenkzylinder und Spurstange, rechts die Flanschplatte für Raupe, dazwischen der kurze Rohrabschnitt mit applizierten DMS. Rechts: Seitenansicht, Anordnung der zehn DMS auf dem Rohrabschnitt.

Zur DMS-Applikation wurden von beiden Kooperationspartnern unterschiedliche Konzepte vorgeschlagen:

Konzept A: Umlaufend sechs zu Halbbrücken verschaltete DMS; im Wechsel je drei T-DMS für Zug in axiale Richtung und 3 Schub-DMS. Aus drei Zugspannungen und drei Schubspannungen an jeweils verschiedenen Stellen sollte auf die sechs gesuchten Schnittgrößen zurückgerechnet werden. Dazu mussten die Dehnungsreaktionen auf sechs bekannte, linear unabhängige Lastformen messtechnisch ermittelt – *kalibriert* werden. Dieses Konzept der Kalibriermatrix orientiert sich an einem kommerziell erhältlichen Sechskomponentensensor. Durch die Verschaltung der Messgitter zu Halbbrücken versprach man sich einen erhöhten, sauberen Signalhub bei gleichzeitiger Kompensation der Temperaturdehnung.

Konzept B: Umlaufend sollten vier DMS-Rosetten (oben, unten, vorne, hinten) appliziert werden, dabei je ein Gitter in Umfangrichtung, eines in axialer Ausrichtung, und eines 45° dazwischen. Die Gitterdehnungen sollten dabei jeweils einzeln erfasst werden, um den ebenen Spannungszustand vollständig rekonstruieren zu können.

Schließlich wurde beschlossen, beide Messkonzepte parallel zu realisieren, so dass am Ende insgesamt 18 Messsignale pro Raupe vorlagen. Die Aussicht, sämtliche Kanäle gleichwertig über ein mathematisches Ausgleichsverfahren für die Messung zu verwenden, war den Durchführenden dabei bewusst, jedoch zunächst nur aus der Theorie bekannt. Beispiele für reale Anwendung mit vergleichbarer Problemstellung finden sich z.B. in [1], [2].

Kalibrierung einer Sechskomponenten-Messapplikation an einer Nutzfahrzeugachse

Tabelle 2: Übersicht der gemessenen Dehnungen

DMS Bezeichnung	Position	Gitter / Ausrichtung zur Rohrachse	Kanal Nr.	Erwartete Sensitivität
CIT_OB	0°	a quer	1	-
		b diagonal (45°)	2	Torsion um y / Querkraft in z
		c längs	3	Kraft in y / Biegemoment um z
CIT_VO	90°	a quer	4	-
		b diagonal (45°)	5	Torsion um y / Querkraft in x
		c längs	6	Kraft in y / Biegemoment um x
CIT_UN	180°	a quer	7	-
		b diagonal (45°)	8	Torsion um y / Querkraft in z
		c längs	9	Kraft in y / Biegemoment um z
CIT_HI	270°	a quer	10	-
		b diagonal (45°)	11	Torsion um y / Querkraft in x
		c längs	12	Kraft in y / Biegemoment um x
GR T 01	15°	T-DMS, längs	13	Kraft in y / Biegemomente um x, z
GR T 02	135°	T-DMS, längs	14	Kraft in y / Biegemomente um x, z
GR T 03	255°	T-DMS, längs	15	Kraft in y / Biegemomente um x, z
GR V 01	75°	Schub-DMS ($\pm 45^\circ$)	16	Torsion um y / Kräfte in x, z
GR V 02	195°	Schub-DMS ($\pm 45^\circ$)	17	Torsion um y / Kräfte in x, z
GR V 03	315°	Schub-DMS ($\pm 45^\circ$)	18	Torsion um y / Kräfte in x, z

Die DMS-Reaktionen auf die zu erfassenden Lastformen wurden für beide Achsflansche physisch in einem Prüfstand (Abb. 2) erfasst – eine rein rechnerische Bestimmung der Dehnungsreaktionen per FEM erwies sich nachträglich als ungeeignet. Wegen der konstruktiven Schwierigkeit, jeweils drei entkoppelte orthogonale Kräfte und Momente in einem Punkt aufzubringen, wurden stattdessen sechs linear unabhängige Kalibrierlasten definiert – jeweils eine Kraft, jedoch mit verschiedenen Wirkrichtungen und Angriffspunkten.

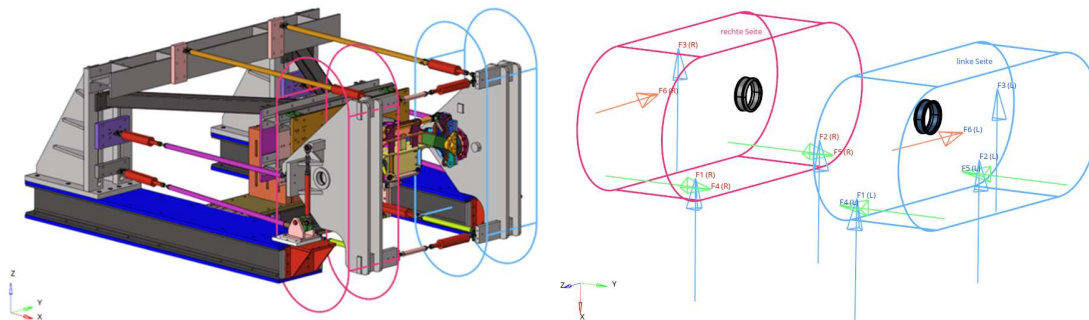


Abb. 2: Kalibrierung. Links: Prüfstands Aufbau. Als Drahtdarstellung die Konturen der beiden Raupen (links blau, rechts rot). Das gesamte Fahrwerk musste zur Kalibrierung aus Platzgründen um 90° gedreht aufgebaut werden. Rechts: Raupenkonturen und Flansche (Rohrabschnitte) mit Kalibrierlasten (Pfeile = Kraftvektoren) zur räumlichen Orientierung

Zu den gemessenen Prüflast-Dehnungs-Kurven wurden Steigungskoeffizienten bestimmt, so dass jede DMS-Reaktion vereinfachend in proportionalen Zusammenhang zu jeder Kalibrierlast gebracht wird. Tabellarisch aufgetragen bilden diese Koeffizienten die *Reaktionsmatrix R*.

Kalibrierung einer Sechskomponenten-Messapplikation an einer Nutzfahrzeugachse

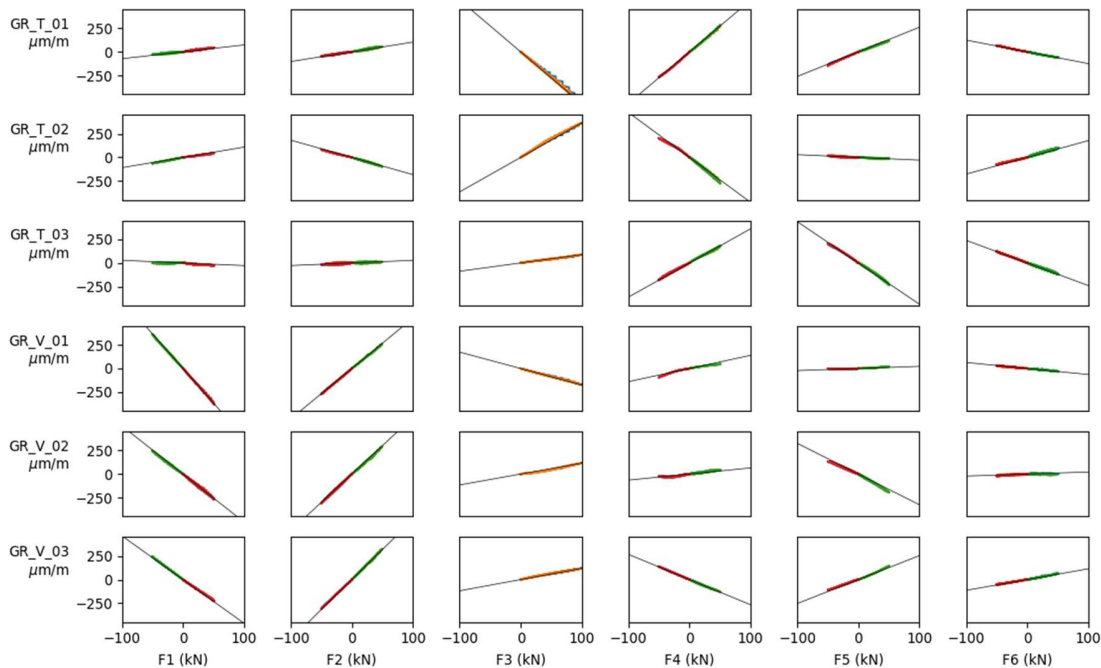


Abb. 3: Reaktionen einiger DMS auf die sechs verschiedenen Kalibrierlastfälle. Jeder Versuch wurde getrennt nach Vorzeichen z.T. mehrfach durchgeführt. Jedes Reaktionsverhalten wurde durch einen einzigen skalaren Parameter charakterisiert – den Steigungskoeffizienten einer Geraden (schwarz).

Nach dem Superpositionsprinzip lässt sich aus R der Dehnungssignalvektor U zu gegebener Linearkombination C der Kalibrierlastfälle berechnen:

$$CR = U \quad (1)$$

Ziel der Messapparatur ist die Bestimmung des Kraft-Momenten-Vektorsignals aus einem mehrkanaligen Dehnungssignal. Benötigt wird eine Umkehrung dieser Gleichung. Die Inverse einer nichtquadratischen Matrix wie R lässt sich mit der *Moore-Penrose-Inversen* [3] vornehmen:

$$R^+ = R^T(RR^T)^{-1} \quad (2)$$

Zu gegebenem 18-stelligen Dehnungsvektor U wird damit zunächst die Zwischengröße der Kalibrierkraftkombination berechnet:

$$C = UR^+ \quad (3)$$

Darin liefert C diejenige Zusammensetzung der Kalibrierlastfälle, welche eingesetzt in Gl. (1) das Ergebnis U in beste Übereinstimmung zum Gegebenen bringen würde.

Die Lastmatrix L ordnet den Kalibrierlasten die jeweils im Flansch wirkenden Kräfte und Momente während der Kalibrierung zu. L sich aus der bekannten Geometrie des Prüfstands für einen beliebigen Bezugspunkt aufstellen. Mit ihr kann aus der Linearkombination der *virtuellen* Kalibrierlasten schließlich der Schnittgrößenvektor F zu jedem Dehnungsvektor berechnet werden:

$$F = CL = UR^+L \quad (4)$$

Setzt man für U ein entsprechendes 18-kanaliges Dehnungssignal ein, erhält man F als 6-achsiges Signal des zeitlich variierenden Kraft-Momenten-Vektors.

3. Ergebnisse

Abb. 4 zeigt die Rückrechnung jeder Kalibrierlast auf jeden Kalibrierversuch, jeweils aufgetragen über die Kalibrierkraft. Diese Darstellung veranschaulicht die Präzision eines mehrachsigen Kraft-Momenten-Sensorsystems: Die aufgegebenen Lastformen zeichnen sich im Messergebnis klar wieder ab. Allerdings zeigen die Signale gegenüber der Erwartungswerten auch deutliche Abweichungen.

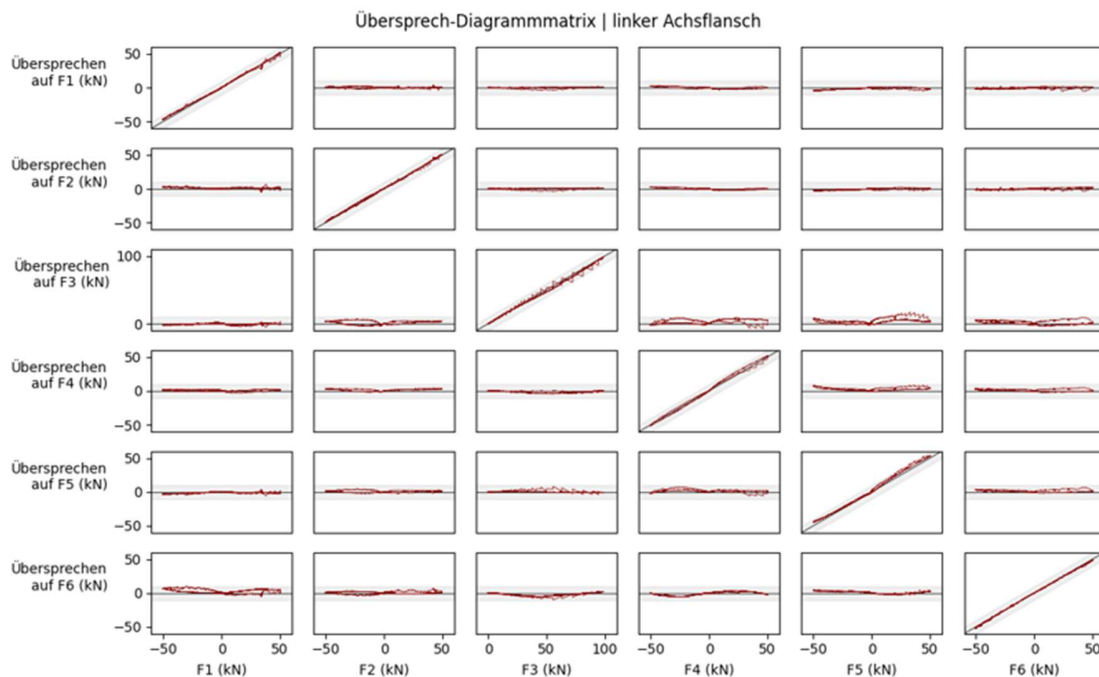


Abb. 4: Übersprech-Diagrammmatrix. Das Schema aus 36 Subdiagrammen zeigt die Reaktionen der von der Messapplikation erfassten sechs virtuellen Kalibrierlastanteile F1...F6 auf die sechs tatsächlichen Kalibrierlasten F1...F6 aus dem Prüfstand während der Kalibrierung. Ein ideales Messsystem ließe in jedem Subdiagramm i,j eine Ursprungsgerade mit der Steigung δ_{ij} erwarten.

Nach Abschluss der Kalibrierung wurde die Achse ins Fahrzeug eingebaut und die Messapplikation zunächst in Fahrversuchen auf einer Teststrecke einigen Plausibilitätstests unterzogen.

Dabei zeigte das Moment um die Querachse (Pendelgelenk) erwartungsgemäß keinen Ausschlag, Umlagerungen der Vertikallasten ließen sich stets durch Bodenneigung oder Fliehkräfteeffekte erklären, ebenso Momente um die vertikale Achse durch überschlägige Berechnungen zum Wendewiderstandsmoment. Schließlich wurde ein Bremsfahrzeug angehängt. Die Zugkraft wurde über eine Kraftmessdose aufgenommen und mit der Summe der Zugkräfte in den beiden Raupen-Messachsflanschen verglichen (s. Abb. 4).

Die Messwerte der Kräfte in y-Richtung (horizontal, quer zur Fahrtrichtung) zeigten sich hingegen unplausibel hoch und wurden daraufhin in allen weiteren Messungen ignoriert.

Im anschließenden Feldeinsatz kam es wiederholt zu einzelnen Signalausfällen. Dank der hohen Redundanz konnte dem jedoch meist durch gezieltes Auslassen betreffender Spalten in der Reaktionsmatrix ohne merkliche Verfälschung des Messergebnisses begegnet werden.

Kalibrierung einer Sechskomponenten-Messapplikation an einer Nutzfahrzeugachse

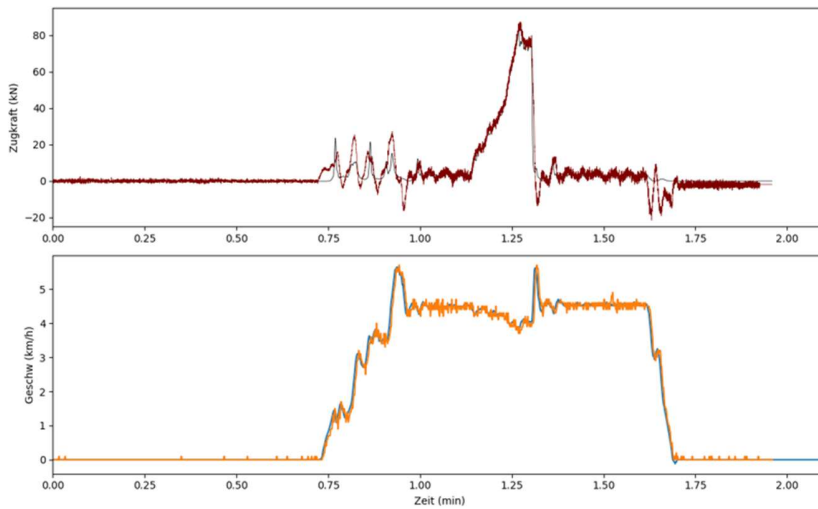


Abb. 5: Verifizierung per Zugkraftmessung. Die schwarze Kurve im oberen Diagramm zeigt die per Kraftmessdose gemessene Zugkraft zu einem angehängten Fahrzeug, welches ab ca. 1,1 s zu bremsen beginnt. Die rote Kurve zeigt die aufsummierte Zugkraft beider Messachsflansche. Im unteren Diagramm die Fahrgeschwindigkeit (aus Bordelektronik und GPS).

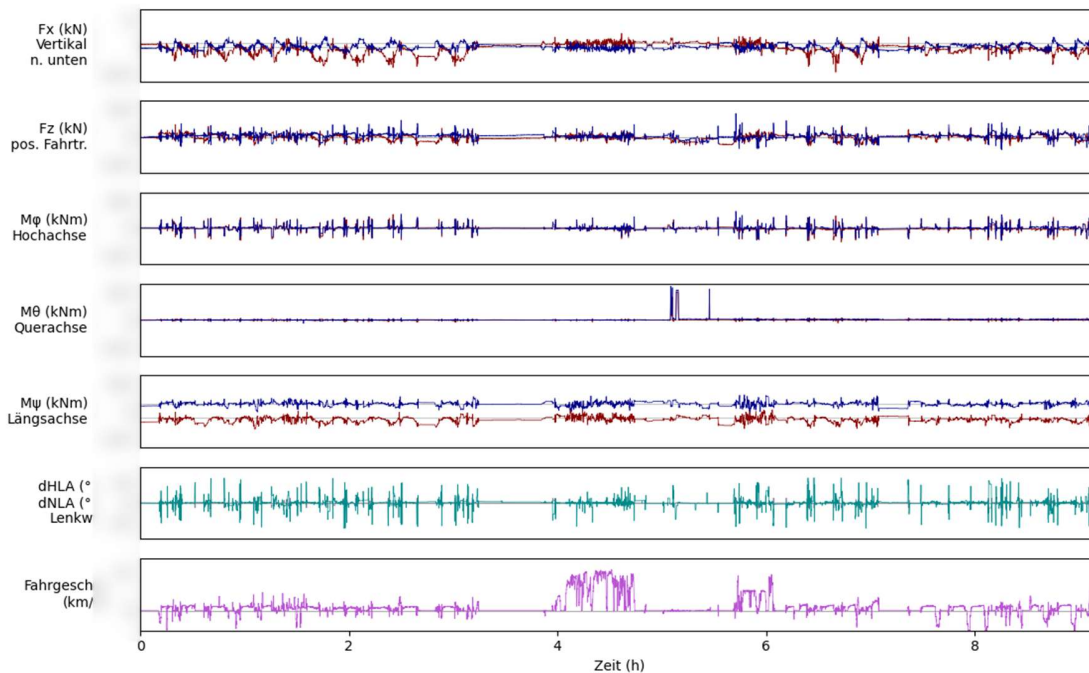


Abb. 6: Vollständiger Messschrieb eines Einsatztages. Im oberen Diagramm lassen sich im ersten und letzten Drittel Füllzyklen des Erntegutbehälters erkennen (Zu- und Abnahme der gesamt-Vertikallast, Schwerpunktverlagerung). Ab ca. 4h erfolgte eine Straßenfahrt zum Einsatzortwechsel, davor eine Pause. Ab ca. 5h sind im dritten Diagramm einzelne Ausschläge im Moment um die Querachse zu erkennen: Hier wurde die Maschine auf einen LKW verladen, dabei werden die Pendelanschläge der Raupe erreicht.

Kalibrierung einer Sechskomponenten-Messapplikation an einer Nutzfahrzeugachse

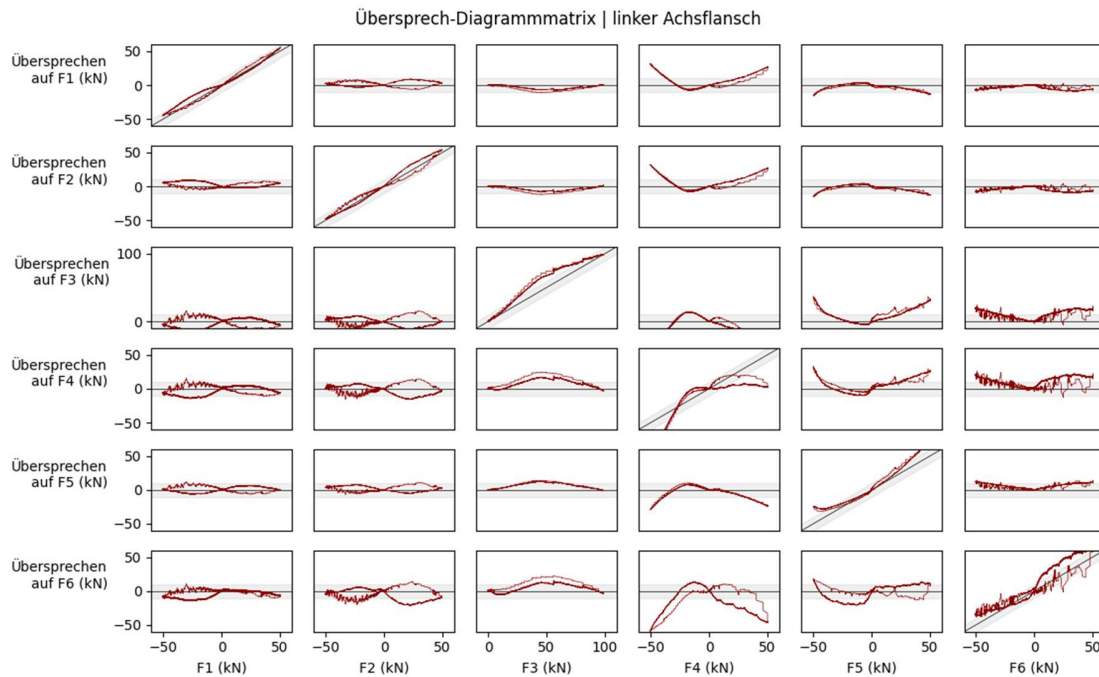


Abb. 7: Übersprechverhalten der Messapplikation bei Signalen mit unzureichendem Informationsgehalt. Im gezeigten Bild wurden nur die sechs Signale nach GRIMME-Konzept (GR_T_01...03, GR_V_01...03) herangezogen. Ein allein auf diesen DMS aufbauendes Messsystem wäre offensichtlich unbrauchbar gewesen.

4. Diskussion

Die abgleichende Zugkraftmessung in Abb. 5 zeigt eine gute Übereinstimmung der Messungen für Kräfte in z (Fahrtrichtung). Aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit (quer zur Rohrabschnittachse) wird daraus angenommen, dass diese Präzision auch für x -Richtung (vertikal) zutrifft.

Die beobachteten unplausiblen Messwerte in y -Kräften werden wie folgt erklärt: Aufgrund der Hebelverhältnisse können schon moderate Kräfte im Aufstandspunkt der Raupe messbare Verformungen im Rohrabschnitt verursachen. Eine *mittig* angreifende Kraft Axialkraft musste diesen Rohrabschnitt von beträchtlichem Querschnitt jedoch maßgeblich stauchen bzw. strecken, um vergleichbare Signale zu erzeugen. Es wird vermutet, dass das Bauteil für solcherlei Verformungen zu steif ist.

Eine plausible Erklärung für das schlechte Übersprechverhalten in Abb. 7 wurde nicht gefunden. Ein möglicher Grund könnten Abweichungen der DMS-Antwort von einer idealen Federkennlinie sein. Es ist zu beachten, dass die Funktionen zwischen Kalibrierkraft und Dehnungsmesssignal tatsächlich keineswegs exakt linear verlaufen; es wurden mehrere nichtlineare Phänomene beobachtet: *Hoffmann* [4] beschreibt Nichtlinearitäten aus der Wheatstone-Schaltung, ungünstig gelegene Gitter können bilinear auf Schubverzerrungen reagieren (Erhöhung des Ohmschen Widerstandes für Verzerrungen mit beiden Vorzeichen), Hystereseeffekte und geometrische Nichtlinearitäten bei größeren Verformungen im Kalibrierstandsaufbau, um nur einige zu nennen.

Zuletzt sei erwähnt, dass Untersuchungen zur Messgüte durch gezielte Auswahl bestimmter DMS-Signale durchgeführt wurden. Dabei wurde beobachtet, dass die alleinige Verwendung der DMS nach Konzept *A* bereits ein nahezu gleich präzises Messergebnis lieferten wie unter Verwendung sämtlicher DMS-Signale. Selbst wenn darüber hinaus die „ α “-Gitter der Applikation (vgl. Tabelle 2, Signale 1, 4, 7, 10) weggelassen wurden, verschlechterte sich die Präzision daraufhin kaum. Eine Erklärung für letzteres liegt auf der Hand: Die „ α “-Gitter sind in Umfangsrichtung des Rohrabschnitts ausgerichtet. Sie würden daher nur auf eine Aufweitung des Rohrdurchmessers

ansprechen. Keine Kraft- oder Momentrichtung rief eine solche Verformung hervor. Grundsätzlich reagierten diese Gitter nur mit schwachem Ausschlag auf die Kalibrierlasten.

5. Schlussfolgerung

Trotz der aufwendigen Kalibrierung darf die vorgestellte Messvorrichtung nicht als Präzisionsinstrument verstanden werden. Die erhobenen Messdaten sind eher als Überschlagswerte aufzufassen. Um bestimmte charakteristische Ereignisse, etwa Hindernisüberfahrten, Wendemanöver oder Pendelanschläge zu statistischen Zwecken auszuzählen, konnte das System jedoch durchaus wertvolle Dienste leisten.

Für eine eventuelle künftige Weiterentwicklung wird empfohlen, das Konzept *B* aufzugreifen. Basierend auf die mit den verschiedenen DMS-Applikationen gewonnenen Erfahrungen konnte den Einzelgittersignalen für die hier beschriebenen Zwecke grundsätzlich eine hervorragende Eignung attestiert werden. Die Anzahl der über den Umfang gleichmäßig verteilten Rosetten kann von vier beliebig erhöht werden. Jedoch wird empfohlen, ihre Ausrichtung zu ändern: Ein Gitter sollte parallel zur Rohrachse liegen; die übrigen beiden symmetrisch dazu um $\pm 45^\circ$ gedreht ausgerichtet.

Danksagung

Ich danke GRIMME Landmaschinenfabrik SE & Co. KG, Damme und CLAAS Industrietechnik GmbH, Paderborn für die freundliche und gelungene Zusammenarbeit

Literatur

- [1] U. Nolten: „*Entwicklung und Charakterisierung dehnungsbasierter Kraft- und Momentensensoren für medizinische Anwendungen*“. Dissertation, RWTH Aachen, 2013
- [2] C. Daniel, E. Woschke: „*Dynamische Radkraftmessung am PKW im Fahrbetrieb mittels DMS Applikation am Felgenkörper*“. Magdeburger Maschinenbautage 2019
- [3] R. Penrose: „*A generalized inverse for matrices*“. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1955;51(3):406-413. doi:10.1017/S0305004100030401
- [4] K. Hoffmann: „*Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*“. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1987.

Hochgenaue Telemetrie-Messsysteme für industrielle Prüfstände

Franz Merold

Melectric Systems GmbH, Endlhauser Straße 7, 82064 Straßlach, Germany

1. Einleitung

Moderne industrielle Prüfstände unterliegen seit mehreren Jahren einem tiefgreifenden Wandel. Getrieben durch steigende Leistungsanforderungen, kürzere Entwicklungszyklen und den zunehmenden Einsatz hochintegrierter Antriebssysteme wachsen sowohl die Komplexität der Prüfstandsauslegung als auch die Anforderungen an die eingesetzte Messtechnik. Dies betrifft Prüfstände aus unterschiedlichsten Anwendungsfeldern, darunter industrielle Entwicklungs- und Dauerlaufprüfstände, sicherheitskritische Anwendungen im Defense-Umfeld sowie hochdynamische Prüfstände im Motorsport. Gemeinsam ist diesen Anwendungen der Bedarf an hochgenauen, reproduzierbaren und zeitlich hochaufgelösten Messdaten unter realen Betriebsbedingungen.

Insbesondere rotierende Prüfstände stellen die Messtechnik vor besondere Herausforderungen. Zentrale Messgrößen wie Drehmoment, Dehnung, Temperatur oder Drehzahl treten direkt an rotierenden Komponenten auf und sind für die Bewertung von Effizienz, Bauteilbelastung und Lebensdauer von entscheidender Bedeutung. Eine indirekte Erfassung dieser Größen, beispielsweise über modellbasierte Rückschlüsse oder stationäre Ersatzmessungen, ist häufig mit zusätzlichen Unsicherheiten verbunden und stößt insbesondere bei transienten Lastfällen oder stark variierenden Randbedingungen an ihre Grenzen. Daher gewinnt die direkte Messung am rotierenden Bauteil zunehmend an Bedeutung.

Klassische Messansätze, etwa schleifringbasierte Systeme oder kabelgebundene Messketten, sind in vielen Prüfstandsanwendungen nach wie vor im Einsatz, weisen jedoch inhärente Einschränkungen auf. Schleifringssysteme unterliegen einem mechanischen Verschleiß, sind wartungsintensiv und zeigen insbesondere bei hohen Drehzahlen oder langen Laufzeiten eine begrenzte Signalstabilität. Kabelgebundene Lösungen schränken die Bewegungsfreiheit rotierender Bauteile ein und erhöhen die Anfälligkeit gegenüber mechanischen und elektromagnetischen Störeinflüssen. Zudem steigt mit zunehmender Kanalanzahl der Integrationsaufwand erheblich. Indirekte Messmethoden wiederum sind stark modellabhängig und liefern unter wechselnden Prüfstandsbedingungen häufig nur eingeschränkt valide Ergebnisse.

Vor diesem Hintergrund haben sich telemetrische Messsysteme als leistungsfähige Alternative etabliert. Durch die berührungslose Energieversorgung und kontaktlose Datenübertragung ermöglichen sie eine verschleißfreie Messung direkt am rotierenden Bauteil. Telemetrische Systeme bieten prinzipiell eine hohe Messdynamik, sind für hohe Drehzahlen geeignet und lassen sich sowohl für Ein- als auch für Mehrkanalanwendungen skalieren. Dadurch eröffnen sie neue Möglichkeiten für die messtechnische Erfassung komplexer Lastzustände in modernen Prüfständen, insbesondere in Anwendungen mit hohen Anforderungen an Lebensdauer, Temperaturbeständigkeit und Datenqualität.

Gleichzeitig sind telemetrische Messsysteme mit eigenen technischen Herausforderungen verbunden. Die Signalaufbereitung und Digitalisierung erfolgt auf dem rotierenden Teil des Systems und ist somit direkt den mechanischen, thermischen und elektromagnetischen Belastungen des Prüfstandsbetriebs ausgesetzt. Hohe Umgebungstemperaturen, starke Beschleunigungen, Vibrationen sowie elektromagnetische Störfelder können die Messsignalqualität und die Langzeitstabilität beeinflussen. Bei Mehrkanalsystemen kommen zusätzliche Anforderungen an die Synchronisation der Messkanäle und die Integrität der übertragenen Daten hinzu. Um unter diesen Randbedingungen valide Messergebnisse zu erzielen, sind robuste Systemarchitekturen sowie geeignete Kalibrier- und Verifikationskonzepte erforderlich.

2. Bedeutung rotierender Messgrößen im Prüfstand

Rotierende Messgrößen nehmen in der experimentellen Analyse moderner Prüfstände eine zentrale Rolle ein. Insbesondere in Antriebs-, Getriebe- und Komponentenprüfständen bestimmen sie maßgeblich die Aussagekraft der Messergebnisse hinsichtlich Belastung, Effizienz und Funktionssicherheit der untersuchten Systeme. Zu den wichtigsten rotierenden Messgrößen zählen das Drehmoment, die mechanische Dehnung, die Temperatur sowie die Drehzahl. Diese Größen stehen in direktem Zusammenhang mit den wirkenden Kräften, der übertragenen Leistung und dem thermomechanischen Verhalten der Prüflinge.

Das Drehmoment stellt dabei eine der zentralen Kenngrößen dar, da es unmittelbar Rückschlüsse auf Leistungsfluss, Wirkungsgrad und Verlustmechanismen erlaubt. Insbesondere bei transienten Betriebszuständen, wie Lastsprüngen oder dynamischen Fahrzyklen, ist eine zeitlich hochaufgelöste Erfassung des Drehmoments erforderlich. Ergänzend dazu liefert die Messung der Dehnung am rotierenden Bauteil Informationen über lokale Spannungszustände und ermöglicht eine detaillierte Bewertung der strukturellen Belastung, beispielsweise im Rahmen von Lebensdauer- oder Ermüdungsuntersuchungen.

Die Temperatur rotierender Komponenten beeinflusst sowohl das mechanische als auch das elektrische Verhalten des Systems. Temperaturgradienten können Materialkennwerte verändern, zu Drift in der Messkette führen und sind insbesondere bei Hochleistungsanwendungen ein begrenzender Faktor. Die Drehzahl schließlich bildet eine grundlegende Bezugsgröße für nahezu alle dynamischen Auswertungen und ist insbesondere für die Synchronisation mehrerer Messkanäle sowie für frequenzbasierte Analysen von Bedeutung.

Type	Measured Quantity	Unit	Typical Sampling Rate
Mechanical	Torque	Nm / kNm	500 Hz - 10 kHz
Mechanical	Rotational Speed	rpm	500 Hz - 5 kHz
Mechanical	Angular Position	°	1 kHz - 10 kHz
Mechanical	Strain	µε	1 kHz - 20 kHz
Mechanical	Force	N / kN	500 Hz - 5 kHz
Thermal	Temperature	°C	1 Hz - 500 Hz
Dynamic	Acceleration	g	1 kHz - 20 kHz
Dynamic	Vibration Velocity	mm/s	1 kHz - 10 kHz
Electrical	Voltage	V	1 kHz - 10 kHz
Electrical	Current	A	1 kHz - 10 kHz
System	Supply Voltage	V	1 Hz - 100 Hz
System	Signal Status / Quality	-	1 Hz - 100 Hz

Abb. 1: Darstellung zentraler Messgrößen innerhalb des rotierenden Systems an einem Prüfstand

Die Relevanz direkter rotierender Messungen steigt insbesondere bei transienten Lastfällen und hochdynamischen Prüfzyklen. In solchen Szenarien ändern sich die Belastungszustände innerhalb kurzer Zeitintervalle, sodass zeitliche Verzögerungen, Filtereffekte oder Modellvereinfachungen einen erheblichen Einfluss auf die Messqualität haben können.

3. Telemetrische Messsysteme – Aufbau und Methodik

Die grundlegende Systemarchitektur einer telemetrischen Messkette besteht aus einer rotierenden Messeinheit, einer stationären Sende- und Empfangseinheit sowie der Schnittstelle zur übergeordneten Datenerfassung. Die Messeinheit ist direkt am rotierenden Bauteil angebracht und integriert die Sensorik, die Signalaufbereitung sowie die Elektronik zur Energieversorgung und Datenübertragung.

Die Energieversorgung der rotierenden Messeinheit erfolgt in der Regel kontaktlos, beispielsweise über induktive Kopplung oder kapazitive Übertragungsprinzipien. Dadurch entfällt der mechanische Verschleiß klassischer Kontaktlösungen, was insbesondere bei hohen Drehzahlen und langen Betriebszeiten einen stabilen Dauerbetrieb ermöglicht. Die Auslegung der Energieübertragung muss dabei sowohl den Leistungsbedarf der Sensorik als auch die thermischen Randbedingungen berücksichtigen, da Verlustleistungen unmittelbar in der rotierenden Elektronik dissipiert werden.

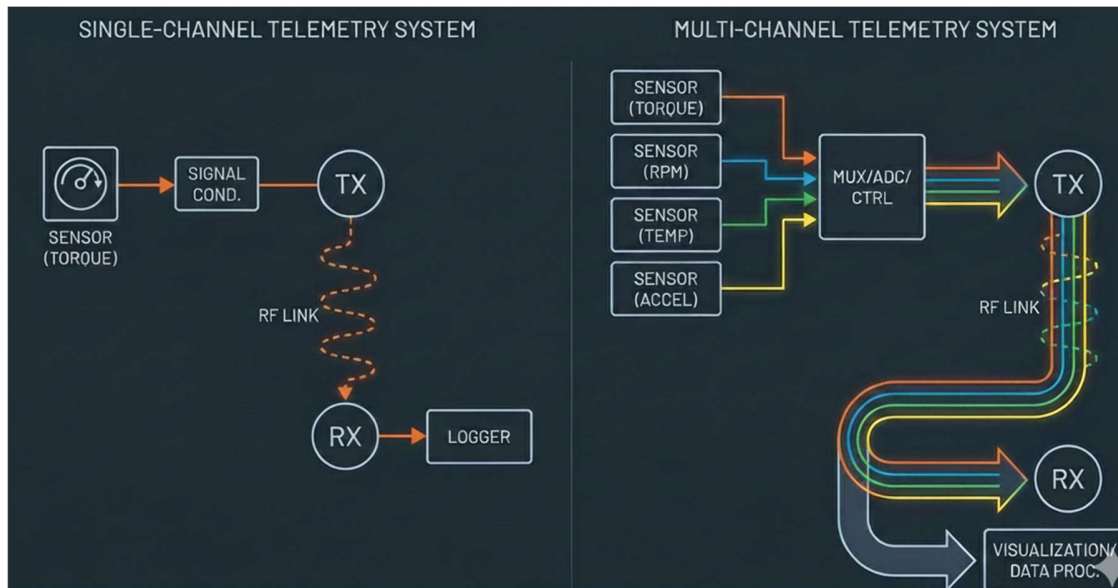


Abb. 2: Topologie von ein und mehrkanaligen Telemetrie Systemen

Ein wesentlicher Bestandteil telemetrischer Messsysteme ist die Signalaufbereitung auf der rotierenden Seite. Die Sensorsignale werden verstärkt, gefiltert und digitalisiert, bevor sie übertragen werden. Dabei ist die Auslegung der Signalaufbereitung entscheidend für die erreichbare Messgenauigkeit, insbesondere im Hinblick auf Rauschverhalten, Bandbreite und Temperaturstabilität. Die Nähe von Sensor, Verstärker und Analog-Digital-Wandler reduziert die Länge der analogen Signalwege und minimiert damit externe Störeinflüsse.

4. Aufbau und Applikation vollständiger Messaufnehmer

Der mechanische Aufbau telemetrischer Messsysteme erfordert eine anwendungsangepasste Integration in Wellen, Flansche oder direkt in den Prüfling. Ziel ist es, die Sensorik möglichst nahe an der Stelle der relevanten Belastung zu platzieren, ohne das mechanische Verhalten des Systems signifikant zu beeinflussen. Eine sorgfältige Auslegung der mechanischen Schnittstellen ist dabei entscheidend, um zusätzliche Steifigkeiten, Unwuchten oder lokale Spannungskonzentrationen zu vermeiden.

Die Kalibrierung telemetrischer Messsysteme erfolgt in der Regel im Rahmen einer Werkskalibrierung unter definierten Randbedingungen. Dabei wird die gesamte Messkette, einschließlich Sensorik, Signalaufbereitung und Telemetrieübertragung, berücksichtigt. Für hochgenaue Anwendungen ist es erforderlich, den Einfluss von Temperatur und Drehzahl auf das Messsignal zu erfassen, da thermische Effekte und drehzahlabhängige Belastungen zu Abweichungen gegenüber statischen Kalibrierbedingungen führen können. Entsprechende Korrekturansätze oder Verifikationsmessungen tragen zur Sicherstellung der Messgenauigkeit im realen Prüfstandsbetrieb bei.



Abb. 3: Messaufbau für einen Prüfstand, Drehmoment und Temperaturmessung integriert in einen Elektromotor

Die Integration in bestehende Prüfstände erfolgt über standardisierte elektrische Schnittstellen zur Anbindung an vorhandene Datenerfassungssysteme. Dabei ist auf eine geeignete Signalpegelanpassung, Synchronisation mit weiteren Messkanälen sowie eine robuste EMV-Auslegung zu achten. Im obigen Beispiel wurde eine Telemetrie zur Temperatur und Drehmomentmessung in eine E-Maschine integriert. Typische Fehlerquellen in der Applikation ergeben sich aus unzureichender mechanischer Zentrierung, thermischer Entkopplung oder unzureichender Berücksichtigung von Umgebungsbedingungen insbesondere der EMV Belastung. Bewährte Vorgehensweisen, wie eine sorgfältige mechanische Ausrichtung, eine klare Definition der Kalibrierkette und eine frühzeitige Validierung im eingebauten Zustand, tragen wesentlich zu stabilen und reproduzierbaren Messergebnissen bei.

5. Anwendungsbeispiele aus industriellen Prüfständen

Zur Bewertung der telemetrischen Messsysteme unter praxisnahen Bedingungen werden regelmäßig Messungen an industriellen Prüfständen durchgeführt. Die betrachteten Prüfstandskonfigurationen stammen aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen und umfassen hochdynamische Antriebsprüfstände, Dauerlaufprüfstände sowie Prüfstände mit erhöhten thermischen Randbedingungen. Um eine hersteller- und anwendungsspezifische Verzerrung zu vermeiden, werden die Prüfstände in abstrahierter und anonymisierter Form beschrieben, wobei die relevanten Randbedingungen und Messaufgaben im Vordergrund stehen.

Die betrachteten Prüfstandskonfigurationen bestehen aus einem rotierenden Prüfling, der über eine Antriebsmaschine beaufschlagt wird, sowie einer lastseitigen Regelungseinheit. Die telemetrische Messeinheit ist direkt am rotierenden Bauteil integriert und erfasst einen oder mehrere Messgrößen simultan, darunter Drehmoment, und Temperatur. Die Messdaten werden berührungslos an eine stationäre Empfangseinheit übertragen und dort in ein übergeordnetes Datenerfassungssystem eingespeist.

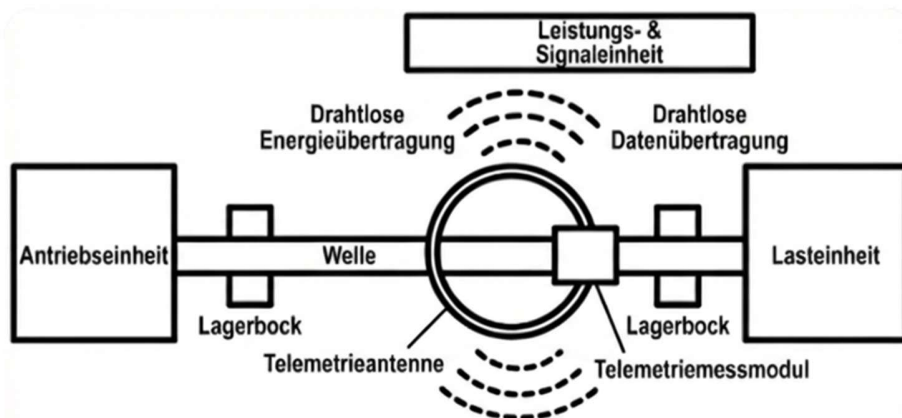


Abb. 4: Abstrahierte Prüfstandskonfiguration mit integrierter telemetrischer Messeinheit

Der dargestellte Prüfaufbau in Abbildung 5 zeigt einen rotierenden Antriebsstrangprüfstand zur Untersuchung mechanischer und messtechnischer Eigenschaften unter definierten Lastbedingungen. Der Antrieb erfolgt über eine elektrische Maschine, die über eine Wellenverbindung mit dem Prüfling gekoppelt ist. Der rotierende Aufbau ist in mehreren Lagerstellen geführt, um eine definierte Ausrichtung und reproduzierbare Randbedingungen sicherzustellen.

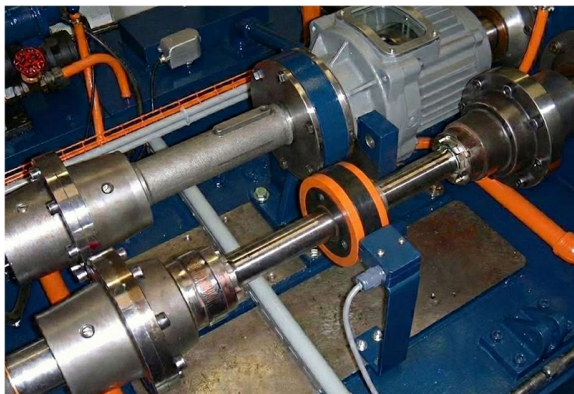


Abb. 5: Antriebsstrangprüfstand mit Telemetrie

Zwischen Antrieb und Lastseite ist ein rotierendes Messsegment integriert, das die direkte Erfassung relevanter Messgrößen am Wellenstrang ermöglicht. Die Messstelle ist so positioniert, dass Einflüsse durch Lagerkräfte und Kupplungselemente minimiert werden. Die mechanische Struktur des Prüfstands ist auf hohe Steifigkeit ausgelegt, um parasitäre Verformungen und Schwingungen zu reduzieren.

Die Prüfaufbauten erlauben sowohl stationäre als auch hochdynamische Betriebszustände und eignet sich damit für Untersuchungen zu Signalqualität, Messgenauigkeit und Langzeitstabilität unter realistischen Prüfstandsbedingungen.

Der in Abbildung 6 dargestellte Prüfaufbau zeigt eine Antriebswelle eines maritimen Prüfstands zur Untersuchung der Drehmomentübertragung unter hohen statischen und dynamischen Lasten.

Hochgenaue Telemetrie-Messsysteme für industrielle Prüfstände

Zur Messdatenerfassung ist ein telemetrischer Mehrkanal-Messaufnehmer direkt in den Wellenstrang integriert. Erfasst werden das Drehmoment als primäre Messgröße sowie ergänzend die Drehzahl, die Temperatur an der Messstelle und zwei Dehnungsmesskanäle, sodass insgesamt fünf Messkanäle simultan erfasst werden. Die Signalaufbereitung und Digitalisierung erfolgen auf der rotierenden Seite mit einer Abtastrate von 2000 Hz pro Kanal und einer Auflösung von 16 Bit, wodurch sowohl stationäre Betriebszustände als auch transiente Lastwechsel abgebildet werden können. Die Mehrkanalmessung erfolgt synchron.

Die Energieversorgung und Datenübertragung erfolgen berührungslos mittels Telemetrie an eine stationäre Empfangseinheit, die die Messdaten an das übergeordnete Datenerfassungssystem weiterleitet. Der Prüfaufbau ist für einen stabilen Dauerbetrieb ausgelegt und zeigt eine hohe Signalqualität und Langzeitstabilität. Durch die direkte Messung am rotierenden Bauteil werden Einflüsse aus Kupplungen oder Lagerstellen weitgehend minimiert, was eine hohe Validität der Messergebnisse ermöglicht.

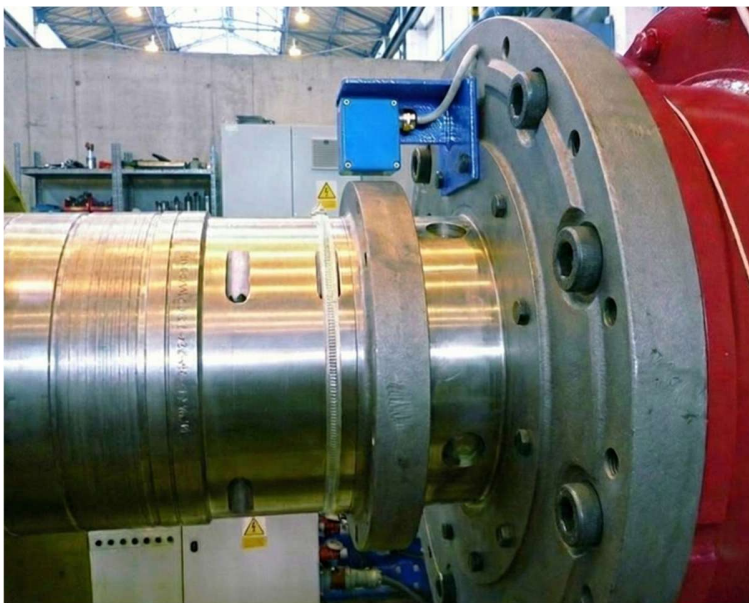


Abb. 6: Antriebsstrangprüfstand Maritime mit Telemetrie

Im Rahmen von Langzeituntersuchungen wurde zudem die Stabilität der Messsignale und das Signalrauschen untersucht. Das Signalrauschen liegt für die hier vorgefundenen Betriebsarten bei ca. 0,005% des Messsignals. Dabei zeigte sich eine hohe Langzeitstabilität der Messsysteme, ohne signifikante Drift oder Signalverschlechterung. Dies ist insbesondere für Dauerlaufprüfstände von Bedeutung, bei denen reproduzierbare Messergebnisse über lange Zeiträume erforderlich sind.

Hochgenaue Telemetrie-Messsysteme für industrielle Prüfstände

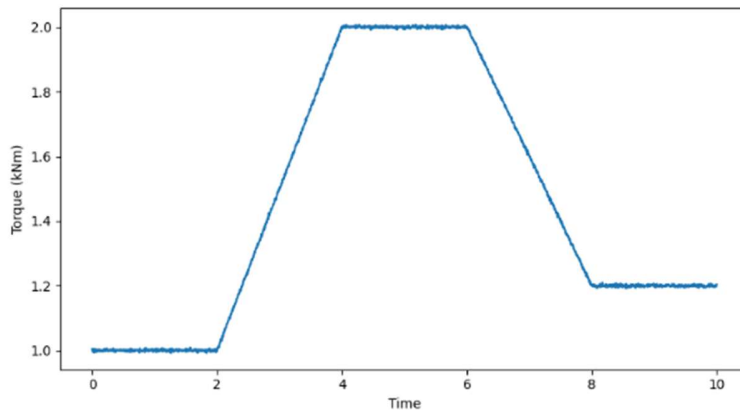


Abb. 7: Beispielhafte Messsignale bei dynamischem Lastprofil

Im Rahmen von Langzeituntersuchungen wurde zudem die Stabilität der Messsignale über mehrere Betriebszyklen analysiert. Dabei zeigte sich eine hohe Langzeitstabilität der telemetrischen Messsysteme, ohne signifikante Drift oder Signalverschlechterung. Dies ist insbesondere für Dauerlaufprüfstände von Bedeutung, bei denen reproduzierbare Messergebnisse über lange Zeiträume erforderlich sind.

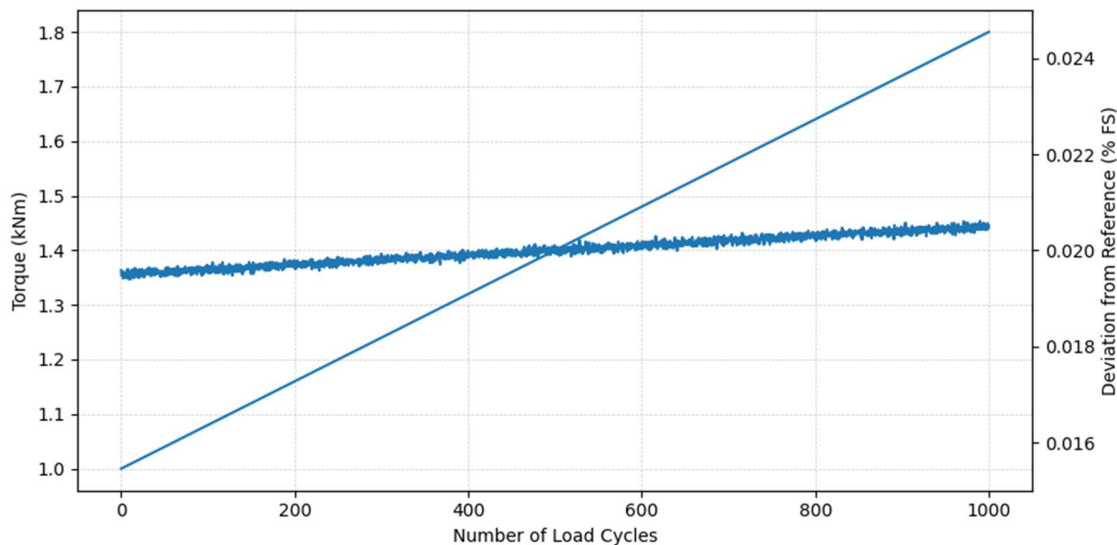


Abb. 8: Langzeitverlauf eines telemetrisch erfassten Drehmomentsignals

6. Diskussion

Die dargestellten Anwendungsbeispiele zeigen, dass telemetrische Messsysteme unter realen Prüfstandsbedingungen eine leistungsfähige Alternative zu klassischen Messansätzen darstellen. Insbesondere bei hochdynamischen Lastfällen, langen Laufzeiten und anspruchsvollen Umgebungsbedingungen konnten stabile und reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt im Folgenden im Vergleich zu etablierten Messlösungen sowie im Hinblick auf die aktuellen Einsatzgrenzen telemetrischer Systeme.

Hochgenaue Telemetrie-Messsysteme für industrielle Prüfstände

Im Vergleich zu schleifringbasierten Messsystemen oder anderen Technologien zeigen telemetrische Lösungen deutliche Vorteile hinsichtlich Signalstabilität und Wartungsaufwand und Flexibilität. Während schleifringbasierte Systeme insbesondere bei hohen Drehzahlen und langen Betriebszeiten zu kontaktbedingtem Rauschen, Signalunterbrechungen oder Drift neigen, bleiben telemetrische Systeme aufgrund der berührungslosen Übertragung verschleißfrei. Dies führt zu einer verbesserten Langzeitstabilität der Messsignale und erhöht die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, insbesondere in Dauerlaufprüfständen. Gleichzeitig entfällt der regelmäßige Wartungsaufwand, der bei schleifringbasierten Systemen notwendig ist, um eine konstante Messqualität sicherzustellen.

Kabelgebundene Messlösungen liefern unter stationären oder quasistatischen Bedingungen teilweise vergleichbare Messgenauigkeiten, zeigen jedoch Einschränkungen in hochdynamischen Prüfzyklen. Die mechanische Beeinflussung durch Kabel, insbesondere bei rotierenden Prüflingen, kann das dynamische Verhalten des Systems verändern und stellt eine zusätzliche Fehlerquelle dar. Darüber hinaus steigt mit zunehmender Kanalanzahl der Integrationsaufwand erheblich. Telemetrische Messsysteme bieten hier durch ihre kompakte Bauweise und die Möglichkeit zur synchronen Mehrkanalmessung Vorteile, insbesondere bei komplexen Prüfstandsaufbauten mit begrenztem Bauraum.

Indirekte Messmethoden zeigen im Vergleich zu direkten telemetrischen Messungen insbesondere bei transienten Lastfällen und wechselnden Randbedingungen Abweichungen. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen bestätigen, dass modellbasierte Ansätze stark von den zugrunde liegenden Annahmen abhängen und ihre Validität bei dynamischen Prüfzyklen eingeschränkt sein kann. Telemetrische Messungen ermöglichen demgegenüber eine direkte Erfassung der relevanten Größen am Ort ihrer Entstehung und reduzieren somit modellbedingte Unsicherheiten.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse auch die aktuellen Einsatzgrenzen telemetrischer Messsysteme auf. Die Integration der Elektronik auf dem rotierenden Bauteil führt zu einer thermischen Belastung, die insbesondere bei Hochtemperaturanwendungen berücksichtigt werden muss. Hohe Umgebungstemperaturen können die Lebensdauer elektronischer Komponenten begrenzen und erfordern angepasste Kühl- oder Schutzkonzepte. Darüber hinaus stellen steigende Kanalzahlen und hohe Abtastraten erhöhte Anforderungen an die verfügbare Übertragungsbandbreite und die Synchronisation der Messkanäle.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Kalibrierung und Rückführbarkeit telemetrischer Messsysteme. Während statische Kalibrierungen unter Laborbedingungen gut beherrschbar sind, können drehzahl- und temperaturabhängige Effekte im realen Prüfstandsbetrieb zu Abweichungen führen. Die Ergebnisse unterstreichen daher die Bedeutung ergänzender Verifikationsmessungen im eingebauten Zustand sowie einer transparenten Dokumentation der Kalibrierkette.

Insgesamt zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass telemetrische Messsysteme insbesondere dort ihre Stärken ausspielen, wo klassische Messansätze an physikalische oder praktische Grenzen stoßen. Gleichzeitig machen sie deutlich, dass der erfolgreiche Einsatz telemetrischer Messtechnik eine sorgfältige Systemauslegung, eine anwendungsspezifische Kalibrierstrategie und eine realistische Bewertung der Einsatzgrenzen voraussetzt.

Pumpen-Management

Berthold Sauer

HELDELE GmbH, Julius-Hölder-Straße 39, 70597 Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Das Pumpen-Management ist zum Steuern, Bedienen und Überwachen der Pumpeneinheiten der Prüfstände.

Nomenklatur

Visualisierung der Prozesswerte und Störmeldungen

1. Einleitung

Die Erläuterung und Vorstellung des Pumpen-Managements. Mit dieser steuert, bedient und überwacht man die Pumpeneinheiten.

2. Pumpen-Management

Flexibles Konzept - das beliebig skalierbar und anpassbar ist. Mit integrierten Not-Halt-Konzept bzw. Sicherheitsabschaltungen. Ein energieoptimierter Betrieb ist optional möglich. Dazu Langzeitarchivierung von allen relevanten Daten und individuell anpassbaren Messkurven sind inklusive. Aufgebaut auf Siemens SIMATIC Standards-Steuerungen. Desweiteren ist eine Anbindung an übergeordnete Systeme und eine Sprachumschaltung möglich.

3. Ergebnisse

Die Messdaten, Auswertungen, Modelle, Diagramme und Tabellen sind in der Visualisierung dargestellt. Dazu Prozessbilder in der Präsentation - Datei: 260114_Instron_Test_Rig_Pumpen-Management_HE.pdf im Anhang.

4. Schlussfolgerung

Die Visualisierung ist ein sehr wichtiger Teil der Prüfstands-Technik. In der Zukunft ist ein weiterer Fortschritt mit Künstlicher Intelligenz (=KI) bzw. Artificial Intelligence (=AI) vorstellbar.

Danksagung

Wir bedanken uns herzlich bei der Firma Instron für das Vertrauen und die Zusammenarbeit, um ein Teil des Produktportfolios sein zu dürfen. Gemeinsam mit der Firma Instron haben wir ein erfolgreiches Produkt entwickeln dürfen.

Funktionsbeschreibung Pumpenmanagement

1. Allgemeines

Das Pumpenmanagement, eine SPS S7-1500 steuert mehrere Aggregate an und ist damit für die Versorgung von Prüfständen mit Hydrauliköl zuständig.

Zu den Aggregaten gehören:

- Hochdruckpumpen

Pumpen-Management

- Spülpumpe
- Konditioniereinheit
- Kühl-Filterpumpe
- Kühlwasser-Magnetventile
- Dekompressions-Magnetventil
- Bereichsventile
- Leckölaggregat

Abhängig von der an den Prüfständen jeweils angemeldeten Menge, fordert das Pumpenmanagement die Hochdruckpumpen an.

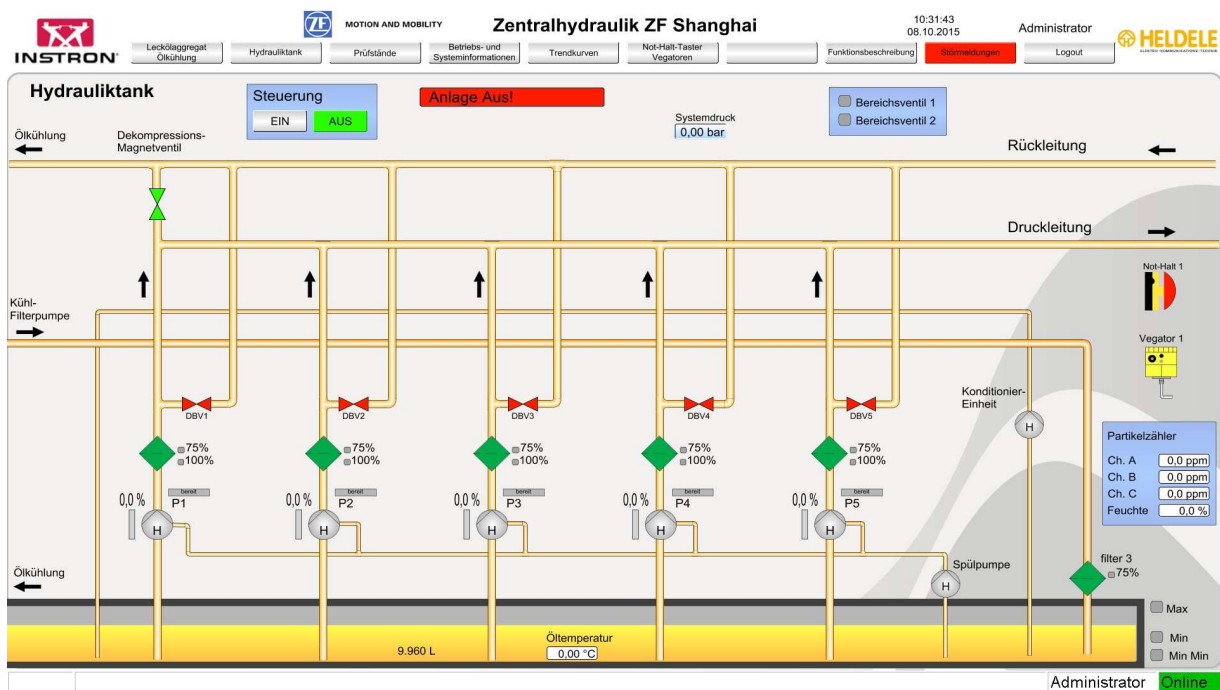


Abb. 1: Ansicht Hydrauliktank

1.1 Einschaltbedingungen

Liegt eines dieser Ereignisse an, schaltet das Pumpenmanagement ab und lässt sich solange auch nicht mehr einschalten:

- Not-Halt ausgelöst
- Ein Not-Halt betätigt
- Eine Vegator Meldung
- Ölfüllstand Hydrauliktank min min

Pumpen-Management

- Ölfüllstand Hydrauliktank max
- Ölfüllstand 1 Leckölaggregat max max
- Ölfüllstand 2 Leckölaggregat max max
- Öltemperattur Hydrauliktank über MAX Sollwert
- Systemdruck über MAX Sollwert
- Systemdruck unter MIN Sollwert
- Drahtbruch Druckschalter
- Drahtbruch Öltemperatur Hydrauliktank

Sind diese Einschaltbedingungen nicht erfüllt, können die Aggregate über das Pumpenmanagement auch nicht im Handbetrieb gefahren werden!

Das Leckölaggregat wird mit dem Einschalten der Anlage eingeschaltet. Es wird überwacht, ob das Leckölaggregat eingeschaltet ist. Schaltet dieses im laufenden Betrieb ab, wird auch das Pumpenmanagement abgeschaltet. Sind die Einschaltbedingungen erfüllt und die Anlage ist eingeschaltet, schalten die Aggregate ein, die ständig laufen müssen. Das sind die Konditioniereinheit, die Spülpumpe und die Regelung der Kühlung.



Sollten die Konditioniereinheit und die Spülpumpe im laufenden Betrieb nicht mehr laufen, werden keine weiteren Hochdruckpumpen angefordert. Die schon laufenden Hochdruckpumpen bleiben in Betrieb.

Wird die erste Hochdruckpumpe angefordert, schließt das Dekompressions-Magnetventil und die Kühl-Filterpumpe schaltet ein.

1.2 Benutzer, Rechte und Sprachen

Es können Benutzer im Prozessleitsystem angelegt werden.



Abb. 2: Anmeldung via Anmeldefenster

1.3 Schutz des SPS Programm

Das SPS Programm ist geschützt. Um das Programm zu sehen, es runter zu laden oder etwas zu ändern bedarf es die Eingabe eines Passworts.

2. Hochdruckpumpen

Die Hochdruckpumpen fördern das Öl vom Hydrauliktank über einen Filter in die Druckleitung. Die Meldungen des Filters 75 % und 100 % verschmutzt werden am Leitsystem angezeigt. Beide Meldungen sind quittierpflichtig, d.h. die Meldung liegt solange an, bis diese nicht mehr anliegt und quittiert wurde.

Die Meldung „75 % verschmutzt“ gilt als Warnung und hat keine weiteren Auswirkungen. Die Meldung „100% verschmutzt“ hingegen, bewirkt, dass die Pumpe ausschaltet und erst dann wieder eingeschaltet werden kann, wenn diese nicht mehr anliegt.

Jede Hochdruckpumpe verfügt über einen Druckbegrenzungsventil (DBV). Dieser begrenzt den Druck an der Druckseite der Pumpe. Sollte der Druck über den Grenzwert des DBV steigen, öffnet das DBV, sodass das Öl direkt in die Rückleitung gelangen kann. Dadurch werden größere Schäden an der Pumpe verhindert.

Links neben der Pumpe wird der Schwenkwinkel über einen senkrechten Balken [0-100%] angezeigt. Der Schwenkwinkel ist proportional zur Fördermenge der Pumpe.

Die Fördermenge in l/min wird auch im Popup-Fenster der Pumpe angezeigt.

Die Meldung „bereit“ rechts neben der Pumpe signalisiert, dass die Pumpe dem Pumpenmanagement zur Verfügung steht und angesteuert werden kann.

Eine Hochdruckpumpe ist bereit wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Keine Sammelstörung
- Pumpe auf Automatik
- Örtlicher Wahlschalter auf Stellung „Zentral“

Steigt die Anfrage nach Hydrauliköl fordert das Pumpenmanagement weitere Hochdruckpumpen an. Die Hochdruckpumpen werden abhängig ihrer Betriebsstunden angefordert.

Die Hochdruckpumpen mit weniger Betriebsstunden werden zuerst angefordert. Das Pumpenmanagement fordert eine Pumpe an und überprüft in dieser Zeit die Betriebsrückmeldung der Pumpe. Sollte eine Hochdruckpumpe angefordert werden und innerhalb 10 Sekunden keine Betriebsrückmeldung bringen, wird dies vom Pumpenmanagement erkannt. Dadurch wird die Pumpe auf Störung „Keine Rückmeldung“ gesetzt und die nächste Pumpe wird angefordert.

Sind genügend Hochdruckpumpen eingeschaltet, erteilt das Pumpenmanagement den Prüfständen die Freigabe.

Sinkt die angemeldete Menge an Hydrauliköl werden Hochdruckpumpen nach Ablauf der Aktualisierungszeit abgeschaltet. Dabei schaltet die laufende Hochdruckpumpe mit den meisten Betriebsstunden ab.

Jede Hochdruckpumpe hat eine eigene SPS. Diese kommunizieren mit dem Pumpenmanagement über Ethernet.

Klickt man auf das Symbol einer Hochdruckpumpe erscheint das ihr zugehörige Popup Fenster.

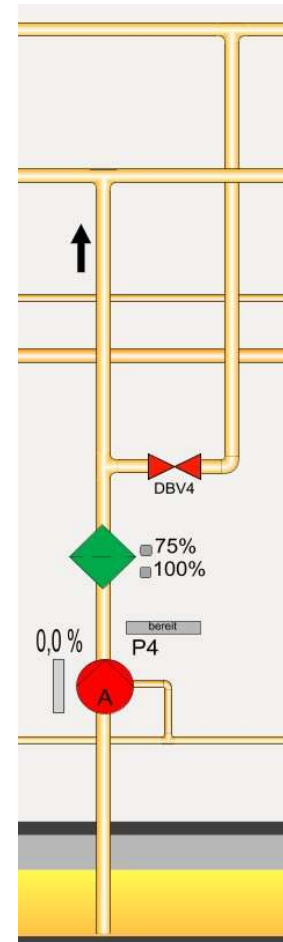


Abb. 3: Hochdruckpumpe

Pumpen-Management

Hier kann man die Betriebsart Hand / Automatik wählen. Ist die Pumpe auf Hand, kann man diese manuell einschalten, wenn die Einschaltbedingungen des Pumpenmanagements erfüllt sind. Zur Startbedingungen gehört beispielsweise, dass kein Not-Halt betätigt ist.

Weiter unten sind auf der linken Seite werden der aktuelle Schwenkwinkel, Durchflussmenge, Druck und Betriebsstunden der Pumpe angezeigt.

Bis auf die Durchflussmenge werden all diese Werte von der SPS Steuerung der Pumpe direkt übertragen. Die Durchflussmenge wird vom Pumpenmanagement über den Schwenkwinkel berechnet.

Auf der rechten Seite Popups Fenster werden alle Meldungen angezeigt. Liegt eine der Störungen an, bedeutet dies, dass die Pumpe nicht bereit ist und wird somit vom Pumpenmanagement solange nicht angefordert. Die Störmeldungen „Keine Rückmeldung“ und

„Kommunikation“ werden vom Pumpenmanagement selbst

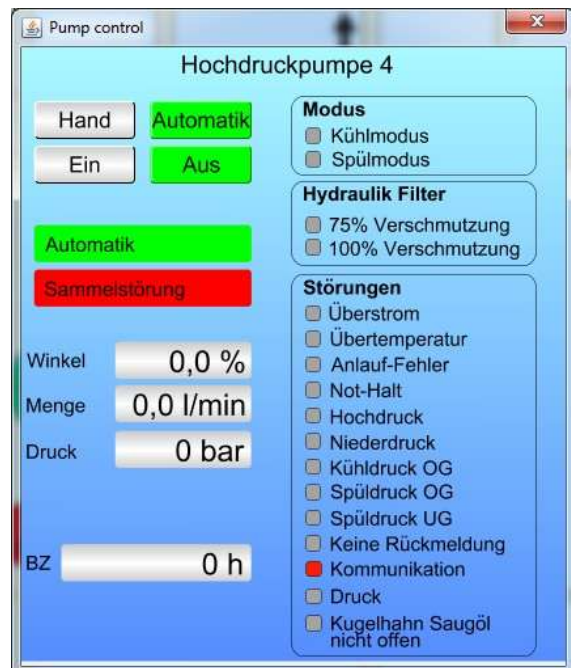


Abb. 4: Pop-Up Pumpenkontrolle erzeugt.

Die Kommunikation zwischen SPS-Management und SPS-Pumpe wird durch einen LifeBit überwacht. Das LifeBit ändert ständig seinen Zustand und signalisiert damit, dass die Kommunikation vorhanden ist. Sollte das LifeBit seinen Zustand 2 Sekunden lang nicht ändern, wird dies als Störmeldung ausgegeben und die Pumpe somit auch nicht mehr angefordert.

3. Das Netzwerk

Das Pumpenmanagement kommuniziert über einen Switch (Siemens Scalance X116) mit den 5 Hochdruckpumpen, dem Leckölaggregat und dem Prozessleitsystem. Außerdem wird eine Fernwartung eingerichtet. Diese erfolgt mit einem Fernwartungsrouter. Dieser verbindet das Maschinen-Netzwerk mit dem ZF-Firmennetzwerk. Über das Internet ist es möglich sich von der Ferne in den Router einzuloggen und von dort aus auf das Maschinen-Netzwerk zu gelangen, sodass von der Ferne aus, das SPS-Programm beobachtet werden kann und wenn notwendig Änderungen vorgenommen werden können.

Die SPS Management kommuniziert mit allen anderen SPSn über das ISO-on-TCP Protokoll. Dabei ist für jede Kommunikation ein Datenbaustein angelegt, in dem ausgetauschten Daten und Datentypen festgelegt sind. Für jede Kommunikation können jeweils 426 Bytes gesendet und empfangen werden.

Das Prozessleitsystem (FlowChief) ist auch in dem Netzwerk eingebunden. Dieses kommuniziert auch mit der SPS Management. Das Prozessleitsystem bekommt von der SPS Management Istwerte, Meldungen, Zählwerte und sendet an die SPS Sollwerte und Befehle. Alle Sollwerte und Messwerte werden in der SPS gespeichert.

Sollte das Prozessleitsystem ausfallen, kann die SPS problemlos und autark weiterarbeiten. Es kommt hierbei nicht zu einem Stillstand der Anlage. Alle Funktionen z.B. Not-Halt bleiben weiterhin bestehen.

Pumpen-Management

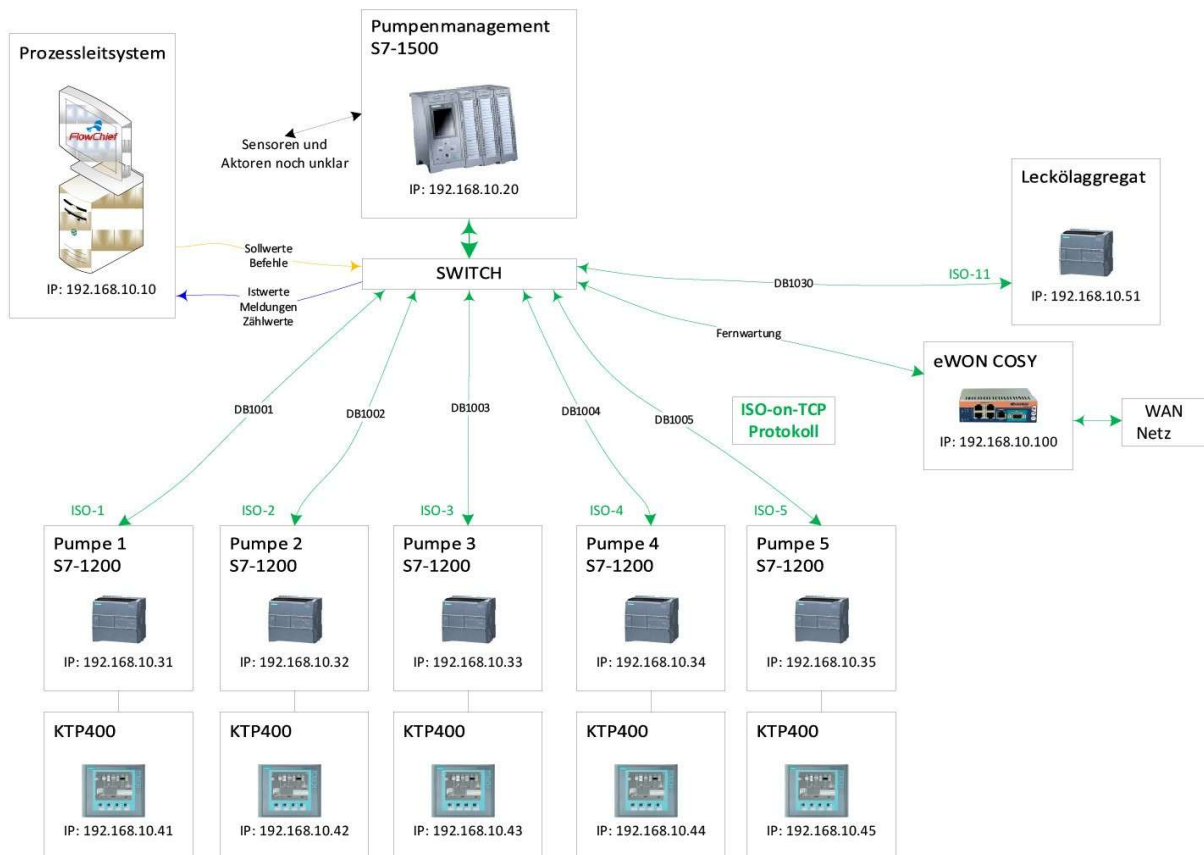


Abb. 5: Funktionszeichnung

4. Leckölaggeragat und Ölkühlung

Bevor das Hydrauliköl über die Rückleitung in den Tank zurückgelangt, wird es vorher gekühlt. Dazu stehen 2 Kühlwasser-Magnetventile bereit, die über einen Regler gesteuert werden. Der Regler steuert die Magnetventile bei steigender Temperatur Auf und versucht somit einen einstellbaren Sollwert z.B. 50°C zu halten.

Steht der Auf-Befehl nicht mehr an, schließen die Magnetventile selbstständig über eine Federrückstellung.

Das dritte Kühlwasser-Magnetventil kühlt das Hydrauliköl, welches von der Kühl-Filterpumpe aus der einen Seite des Hydrauliktanks auf die andere Seite des Tanks befördert wird, damit das Öl im Tank gleichmäßig gekühlt wird.

Das Lecköl von den Hochdruckpumpen und vom Prüffeld fließt in den Tank des Leckölaggeragats. Der Tank hat drei Schaltpunkte: Min, Max und Max Max. Wird der Höhenstand Max erreicht schaltet eine Pumpe ein und fördert das Öl zurück in den Hydrauliktank bis Min erreicht wird. Der Schaltpunkt Max Max ist eine Einschaltbedingung des Pumpenmanagement. Wird Max Max erreicht, schaltet das Pumpenmanagement ab.

Das Leckölaggeragat muss ständig laufen. Es wird beim Einschalten des Pumpenmanagement eingeschaltet. Sollte das Leckölaggeragat keine Betriebsrückmeldung mehr bringen, wird das Pumpenmanagement abgeschaltet.

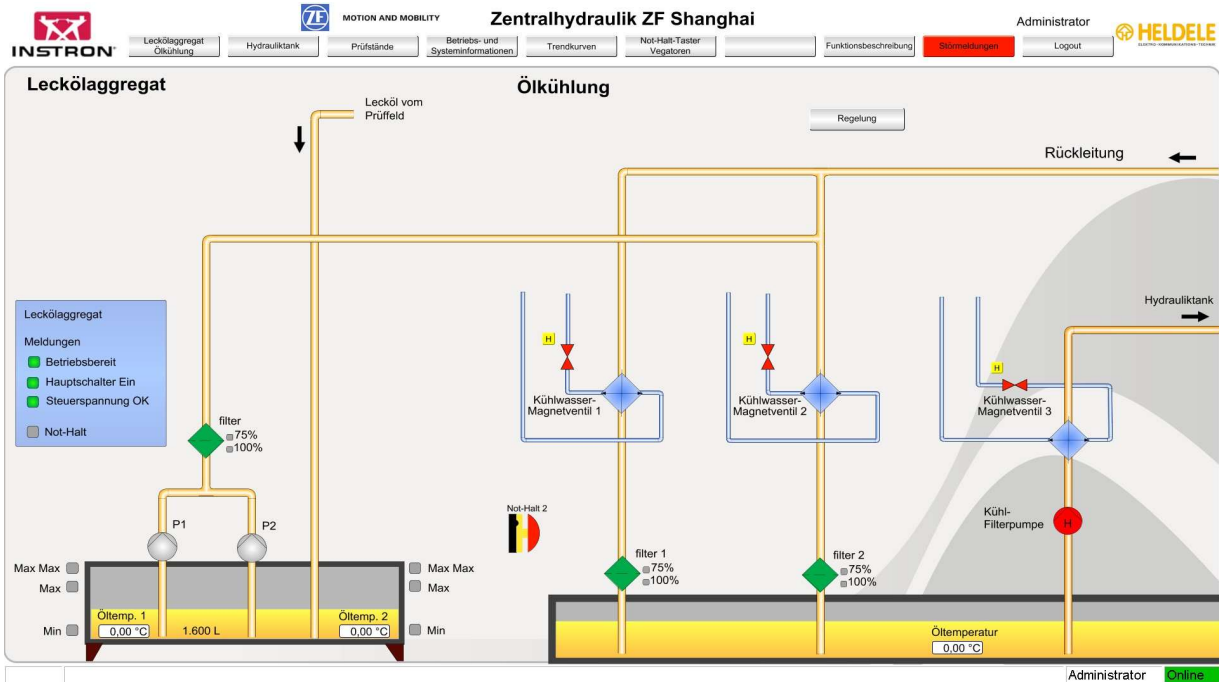


Abb. 6: Lecköltaggregat und Ölkühlung

5. Prüfstände

Im Fenster Prüfstände sind alle Prüfstände angelegt. Die Bezeichnungen können frei vergeben werden. Die Texte werden direkt in der SPS gespeichert. Es besteht die Möglichkeit eine volle Literleistung oder eine reduzierte Literleistung anzugeben. Je nachdem welche Anfrage kommt, also nur K1 oder K1 und K2 wird die Literleistung in die angemeldete Menge mit angerechnet und wenn notwendig eine Hochdruckpumpe dazu geschaltet.

Alternativ kann ein Prüfstand auch auf Testbetrieb gesetzt werden. Dies bedeutet, dass solange der Prüfstand in Testbetrieb ist die volle Literleistung berücksichtigt wird.

Erst wenn genügend Hochdruckpumpen laufen, wird die Freigabe erteilt. Während der Freigabe können die Sollwerte für volle oder reduzierte Literleistung nicht geändert werden.

Die Freigabe für einen Prüfstand erlischt mit dem wegnehmen der Anfrage K1 oder dem Deaktivieren des Testbetriebs.

Nr.	Bezeichnung	volle Literleistung (K1)	reduzierte Literleistung (K2)	K1	K2	K3	Freigabe	Testbetrieb
1	Bez1	150 l/min	100 l/min					
2	Bez2	50 l/min	50 l/min					
3	Bez3	500 l/min	0 l/min					
4	Bez4	500 l/min	0 l/min					
5	Bez5	50 l/min	0 l/min					
6	Bez6	20 l/min	0 l/min					
7		0 l/min	0 l/min					
8		50 l/min	50 l/min					
9		0 l/min	0 l/min					
10		0 l/min	0 l/min					
11		0 l/min	0 l/min					
12		0 l/min	0 l/min					
13		0 l/min	0 l/min					
14		0 l/min	0 l/min					
15		0 l/min	0 l/min					
16		0 l/min	0 l/min					
17		0 l/min	0 l/min					
18		0 l/min	0 l/min					
19		0 l/min	0 l/min					
20		0 l/min	0 l/min					
21		0 l/min	0 l/min					
22		0 l/min	0 l/min					
23		0 l/min	0 l/min					
24		0 l/min	0 l/min					
25		0 l/min	0 l/min					

Abb. 7: Abbildung Prüfstände Darstellung

6. Soll- und Istwerte

The screenshot shows the 'Zentralhydraulik ZF Shanghai' control interface. The top navigation bar includes 'INSTRON', 'Leckölggregat', 'Hydrauliktank', 'Prüfstände', 'Betriebs- und Systeminformationen', 'Trendkurven', 'Not-Halt-Taster', 'Ventilatoren', 'Funktionsbeschreibung', 'Störmeldungen', and 'Logout'. The user is logged in as 'Administrator'. The main content area is divided into two panels: 'Betriebs- und Systeminformationen' and 'Istwerte'.

Betriebs- und Systeminformationen

Sollwerte	
Systemdruck max -> Anlage Aus	180,0 bar
Systemdruck min -> Anlage Aus	10,0 bar
Systemdruck Störung Verzögerungszeit	5 s
Totzeit bei Kommunikations- / Messwertverlust	2 s
Reservemenge	500 l/min
Aktualisierungszeit	250 s
Ölkühlung Temperaturregelung	50 °C
Öltemperatur zu hoch -> Warnung	62 °C
Öltemperatur max -> Anlage Aus	65 °C
Partikelzähler Wert zu hoch -> Warnung	0 ppm
Partikelzähler Wert max. -> Anlage Aus	0 ppm
Partikelzähler Feuchte zu hoch -> Warnung	0 %
Partikelzähler Feuchte max. -> Anlage Aus	0 %

Istwerte

Systemdruck	0,00 bar
Öltemperatur Hydrauliktank	0,00 °C
Öltemperatur 1 Lecköltank	0,00 °C
Öltemperatur 2 Lecköltank	0,00 °C
Sichtrübung 1	0,0 PLA
Sichtrübung 2	0,0 PLA
Partikelzähler Ch. A	0,0 ppm
Partikelzähler Ch. B	0,0 ppm
Partikelzähler Ch. C	0,0 ppm
Partikelzähler Feuchte [rF]	0,0 %
Kapazität	0 l/min
Summe Testbetrieb	650 l/min
Angemeldete Menge	650 l/min
Reservemenge	500 l/min
Sollwert (Gesamtanforderung)	1150 l/min
Aktuelle Menge	0 l/min
Verfügbare Menge	590 l/min
Aktualisierungszeit	0 s

Administrator Online

6.1 Sollwerte

Systemdruck max

- Überschreitet der Systemdruck diesen Grenzwert, wird nach Ablauf der Verzögerungszeit das Pumpenmanagement abgeschaltet.

Systemdruck min

- Unterschreitet der Systemdruck diesen Grenzwert während mindestens eine Hochdruckpumpe in Betrieb ist, wird nach Ablauf der Verzögerungszeit das Pumpenmanagement abgeschaltet.

Reservemenge

- Diese Menge wird immer zur angemeldeten Menge als Reserve addiert.

Aktualisierungszeit

- Sinkt die angemeldete Menge, sodass eine oder mehrere Hochdruckpumpen abschalten können, schalten diese nach Ablauf der Aktualisierungszeit ab.

Ölkühlung Temperaturregelung

- Das Pumpenmanagement regelt die Temperatur des Hydrauliköl mittels Kühlwasser-Magnetventile. Steigt die Temperatur über diesen Sollwert, werden die Magnetventile schneller aufgetaktet.

Öltemperatur zu hoch

- Überschreitet die Öltemperatur diesen Wert, wird eine Störmeldung ausgegeben. Die Anlage bleibt in Betrieb

Pumpen-Management

Öltemperatur max

- Überschreitet die Öltemperatur diesen Wert, wird eine Störmeldung ausgegeben und die Anlage schaltet ab.

Partikelzähler Wert / Feuchte zu hoch

- Überschreitet der Partikelzähler diesen Wert, wird eine Störmeldung ausgegeben. Die Anlage bleibt in Betrieb

Partikelzähler Wert / Feuchte max

- Überschreitet der Partikelzähler diesen Wert, wird eine Störmeldung ausgegeben und die Anlage schaltet ab.

6.2 Istwert

Die Istwerte auf der rechten Seite im oberen Teil des Bildes sind soweit selbsterklärend.

Kapazität

- Summe der Kapazitäten aller auf „bereit“ stehenden Hochdruckpumpen.
- Beispiel: Eine Hochdruckpumpe hat eine Kapazität von 295 l/min. Sind 3 Pumpen bereit, steht da der Wert $3 \times 295 \text{ l/min} = 885 \text{ l/min}$

Summe Testbetrieb

- Summe aller der im Testbetrieb stehenden Prüfstände.

Angemeldete Menge

- Summe der aus allen Prüfständen angemeldeten Menge addiert mit Summe Testbetrieb

Reserve Menge

- Diese Menge wird immer zur angemeldeten Menge als Reserve addiert.

Sollwert (Gesamtanforderung)

- Angemeldete Menge + Reservemenge - Diese Menge soll von den Hochdruckpumpen bereitgestellt werden.

Aktuelle Menge

- Von den laufenden Hochdruckpumpen aus den Schwenkwinkeln berechnete Menge

Verfügbare Menge

- Von den aktuell laufenden Pumpen maximale erreichbare Menge

Die Evolution der Instron-Regelektronik

Bernhard Schmidt, Dipl.-Ing. (FH)

Instron GmbH Landwehrstrasse 65 / 64293 Darmstadt

Zusammenfassung

Der Vortrag beleuchtet die Entwicklung der Regelektronik für servohydraulische Prüfsysteme anhand der Instron/Schenck-Technologien. Beginnend mit der analogen Technik des Typs S31, über die ersten digitalen Regler S56 und S59, bis hin zu den Labtronic-Modellen 8800CL (Classic) und der modularen Labtronic 8800ML (Modulogic). Im Mittelpunkt stehen dabei die jeweiligen technischen Konzepte, deren Stärken und Schwächen sowie die daraus resultierenden Anforderungen an die jeweils nächste Generation von Regelektroniken. Diese neueste Generation Labtronic EVO basiert auf mehr als 100 Jahren Erfahrung in der Prüftechnik und wird den Anforderungen heutiger sowie zukünftiger Systeme gerecht.

Einleitung

100 Jahre Erfahrung in der Prüfstandtechnik.

Nur wer die Vergangenheit kennt, kann die Gegenwart verstehen.

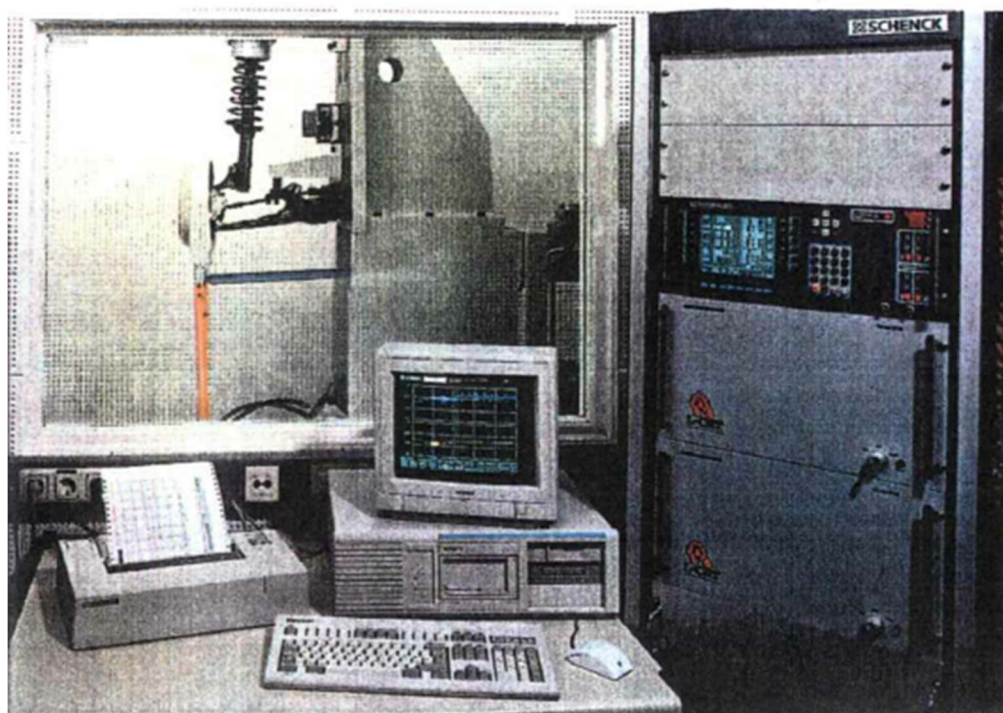
Beschreibung der Konzepte und ihre Weiterentwicklung

In den 1960er bis 1980er Jahren dominierten analoge Regelektroniken und prägten über lange Zeit den technologischen Standard. Diese Systeme zeichneten sich durch robuste Hardware und eine vergleichsweise einfache, aber funktional begrenzte Regelungslogik aus.



Bereits in den frühen 1980er Jahren begann jedoch der Übergang zu digitalen Regelektroniken. Erste Vertreter dieser neuen Generation waren unter anderem die Modelle S56 und S59 der Firma Schenck. Durch den Einsatz digitaler Signalverarbeitung und begleitender Software konnten die Prüf- und Auswertungsmöglichkeiten deutlich erweitert werden. Komplexere Messstrategien, höhere Genauigkeit sowie die Speicherung und Weiterverarbeitung von Daten wurden erstmals realisierbar.

Gleichzeitig stellte die neue Technologie erhöhte Anforderungen an die Anwender. Die Bedienung der frühen digitalen Systeme war oftmals wenig intuitiv und erforderte spezielles Fachwissen, wodurch der praktische Einsatz zunächst als aufwendig empfunden wurde.



Als erste wesentliche Evolutionsstufe in der Entwicklung der Regелеlektroniken kann die Einführung grafischer Benutzeroberflächen, insbesondere auf Basis von „Microsoft Windows“, angesehen werden. Diese Neuerung verbesserte die Bedienbarkeit und Interaktivität der Systeme erheblich und ermöglichte eine intuitivere Benutzerführung. Gleichzeitig erforderte sie jedoch eine tiefgreifende Neugestaltung sowie umfangreiche Anpassungen und Programmierungen der zugrunde liegenden Softwarearchitektur.

Die durch die Hardware begrenzten Möglichkeiten Instron 8800cl (classic), wie beispielsweise geringer Arbeitsspeicher und eingeschränkte Prozessorleistung, führten im nächsten Entwicklungsschritt zur Einführung eines Multiprozessorsystems Instron 8800ml (Modulogic). Die nun skalierbare und nahezu unbegrenzt verfügbare Rechenleistung ermöglichte es, zahlreiche zuvor ausgelagerte Rechenprozesse vom Laborrechner direkt auf die Echtzeitelektronik zu verlagern. Diese funktionale Verlagerung ging jedoch mit einem erheblich steigenden Aufwand in der Softwareentwicklung einher, insbesondere im Hinblick auf Parallelisierung, Synchronisation und Systemstabilität. Der ursprüngliche Ansatz, einen autonomen Zweikanalregler mit sämtlichen erforderlichen Schnittstellen (PCM – Processor Control Module) als Basis für den Aufbau eines Multiprozessorsystems einzusetzen, bot zwar Vorteile, wies jedoch auch Nachteile auf. Zwar konnten durch die hohe Stückzahl die Hardwarekosten begrenzt werden, in der praktischen Umsetzung zeigte sich jedoch ein deutlich erhöhter Verkabelungsaufwand zwischen den einzelnen Einheiten innerhalb des Schaltschranks.



Die Evolution, das Zukunftskonzept der Regелеlektronik

Die zukünftige Evolution der Regелеlektronik wird maßgeblich durch dezentrale Einheiten mit standardisierten Schnittstellen geprägt sein, die über Hybridkabel miteinander kommunizieren und sowohl Energieversorgung als auch Datenübertragung in einer gemeinsamen Infrastruktur vereinen.

Das Konzept der Instron Labtronic EVO®

Der neue Aufbau der Regелеlektronik besteht aus einem dezentralen Konzept beginnend mit:

Labtronic EVO® MAIN Einem halbhohen Schaltschrank für die Aufnahme der Prozessrechner und zentrale Spannungsversorgung .

Die Evolution der Instron-Regелеlektronik

Labtronic EVO® CORE Dem eigentlichen Prozessrechner (Industrie PC)

Vorteil(e): Geringer Platzbedarf, Möglichkeit des Austauschs der Industrie Rechner auf neue Generationen ohne andere Komponenten des Regelung Systems anzupassen.

Labtronic EVO® LINK Das Herzstück des neuen Konzepts besteht in einer Verbindungsbox für Servo-, Shunt-, Multiventile, Sensoren oder auch den CAN-Bus. Montage direkt auf dem Zylinder oder in der Nähe am Rahmen/Aufbau. Die Anbindung der **EVO LINK** erfolgt über ein Hybridkabel.

Vorteil(e): Geringer Verkabelungsaufwand, alle Sensoren und Ventile können mit kurzen Kabeln direkt am Zylinder angeschlossen werden (bessere Signalqualität). Mehrere **EVO LINK** können in Reihe geschaltet werden. Die Anbindung der **EVO LINK** erfolgt über ein Hybridkabel an die Prozessoreinheit. Die aufwändige Verlegung einzelner Kabel für jeden Sensor, Ventil, ... zum Prozessrechner mit teilweise über 50 Metern entfällt.

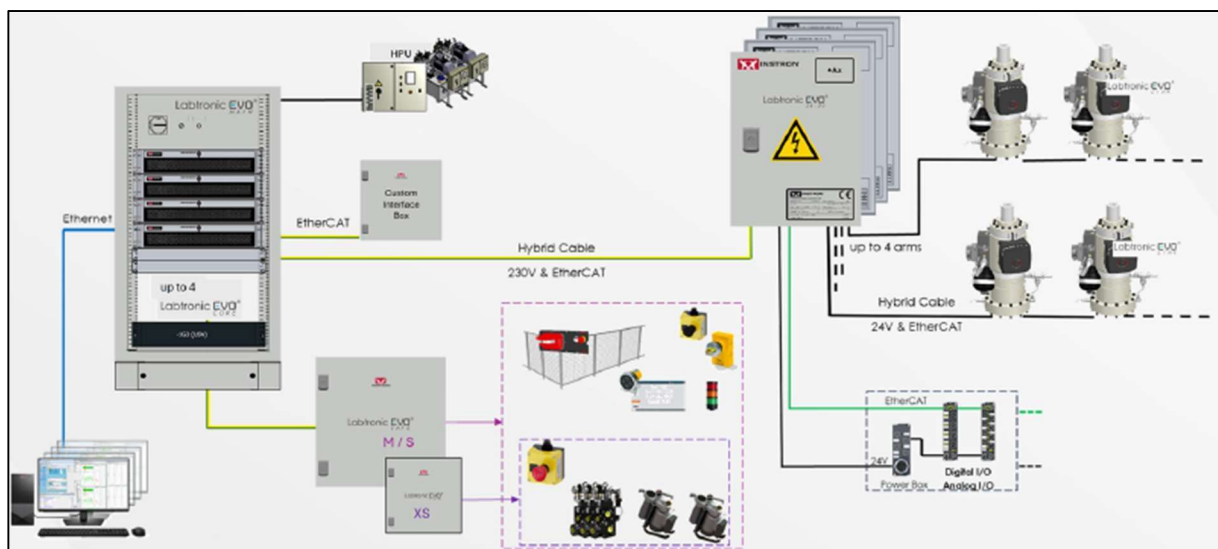


Labtronic EVO® 24-10 Verteilerbox zur Sammelverbindung der **Labtronic EVO® LINK** Kabel und Möglichkeit der Ausgabe einer Spannungsversorgung mit EtherCAT Verbindung zum Aufbau externer Schnittstellen DIG oder ANALOG I/O Module, zum Beispiel Feldmodule der Fa. Beckhoff.

Vorteil(e): Dezentrale Schnittstellen direkt am System, ggf. en all von DAQ Datenerfassungssystemen. Verringerung des Verkabelung Aufwands durch Verknüpfung mehrere **EVO LINK** Kabel auf nur ein Hybridkabel zum Prozessrechner.

Labtronic EVO® SAFE Ein standardisierter Verteilerschrank welcher die Ansteuerung der Lagerölpumpen (LPL), Anschlussventile (HCM Hydraulik Control Modul) sowie der kompletten Sicherheitstechnik Siemens S7 zum Aufbau von Sicherheitstechnik nach Performance Level D im Labor ermöglicht.

Vorteil(e): Standardisierter Schaltkasten mit Möglichkeit der Erweiterung, Modifizierung der Laborsicherheitstechnik zum Beispiel bei geänderten Sicherheitsbedingungen ohne andere Komponenten des Regelungssystems verändern zu müssen.



Software


Ein weiterer zentraler Aspekt ist die inländische Wertschöpfung, die auch bei der Steuerungssoftware RSLabSite® modulogic im Fokus steht. Diese wird ausschließlich am Standort in Darmstadt entwickelt und programmiert, was unser Bekenntnis zur regionalen Expertise und Qualität unterstreicht.

Rückwärts kompatibel mit der Labtronic 8800ml mit Instron RSLabSite® modulogic 2.8 oder später.


Hybridkabel

Die superschnelle Verkabelung für Ihr System. Unsere Hybridkabel-Lösung besteht aus einem robusten Stecker mit Bajonettverschluss. Sie überträgt sowohl die EtherCAT-Kommunikation als auch die Stromversorgung. Der entscheidende Vorteil liegt auf der Hand: schnelle Installation und Inbetriebnahme

Hybrid Cable 230V/EtherCAT	
Outer jacket material	PUR
UV resistance	Yes
oil resistance	in accordance with DIN EN 60811-404
Halogen-free	Yes
FCKW-Free	Yes
Silicon-Free	Yes
RoHS- compliant	Yes
UL	Yes



Hybrid Cable 24V/EtherCAT	
Outer jacket material	PVC V0 gem. UL 94
UV resistance	UV-stabilized
oil resistance	7d/90°C. reference oil IRM 902
flame-resistant	in accordance with UL 758 (cUL-FT1)
FCKW-Free	Yes
Silicon-Free	Yes
RoHS- compliant	Yes
UL	Yes, UL E-file Number: E63216



Die Evolution der Instron-Regelelektronik

Schlussfolgerung

Anforderungen an eine moderne Regelelektronik in einem dynamischen Markt

Eine moderne Regelelektronik muss **wandelbar und offen** sein.

Wie sind die Investitionen geschützt?

Investitionen sind dann geschützt, wenn Systeme **erweiterbar statt ersetzbar** sind.



Glocken – Kulturgut, Musikinstrument und in der Handhabung Maschine

Andreas Rupp, Michael Plitzner - ECC-ProBell® an der Hochschule Kempten

Zusammenfassung

Ein Glockensystem soll mit seinen Komponenten und seinem Aufbau unterschiedliche, zum Teil einander gegenläufige Anforderungen erfüllen. Dabei spielen die Dimensionierung und Formgebung des Klöppels ebenso eine Rolle, wie sämtliche Eigenschaften, die das Läuten einer Glocke im Turm mitbestimmen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Glocken durch das ECC-ProBell der vergangenen Jahre hatten zum Ziel, die physikalischen Zusammenhänge im Hinblick auf Ermüdungsfestigkeit, Schlagverschleiß und Klang ingenieurmäßig zu beschreiben. Hieraus wurden Verfahren und Daten abgeleitet, die es erlauben, eine Glocke mit Klöppel einerseits schonend bei gleichzeitiger hoher musikalischer Qualität zu läuten und andererseits die Anforderungen, die aus dem Bereich baulicher Randbedingungen, Denkmalschutz und Ästhetik kommen, zu erfüllen. Dies führt dazu, dass eine optimale Lösung für jedes Glockensystem speziell erarbeitet werden kann. Mit dem Verfahren des musikalischen Fingerabdrucks wurde ein sehr effizientes Verfahren zur Bewertung des Zustandes einer Glocke und deren Monitoring entwickelt

1. Die Glocke aus ingenieurstechnischer Sicht

Das Musikinstrument Glocke besteht aus verschiedenen Komponenten, die in ihrer Gesamtheit das Glockensystem darstellen. Zum Glockensystem gehören im Wesentlichen der Klangkörper Glocke, das Joch mit allen Anbauteilen, der Klöppel, der Glockenstuhl sowie die Läutemaschine mit ihrer Steuerung.

Das Beanspruchungsgeschehen und die Schadensentstehung an Glocken wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten eingehend untersucht. So konnten die Ursachen und Zusammenhänge für die Entstehung und Ausbreitung von Ermüdungsschäden und Schlagverschleiß an Glocken umfassend geklärt und einer ingenieurmäßigen Betrachtung zugänglich gemacht werden. Die gezielte Beeinflussung der klanglichen Eigenschaften der läutenden Glocke durch die Optimierung der Eigenschaften der einzelnen Komponenten erlaubt die Verbesserung der musikalischen Qualität des Läutens. Die erarbeiteten Daten, die Berechnungs- und Auslegungsverfahren sowie insbesondere die verallgemeinerten Simulationsmodelle erlauben eine Betrachtung der läutenden Glocke unter den verschiedenen Anforderungen, die jeweils durch die spezifische Auslegung einzelner Komponenten erfüllt werden können:

1. **Bauliche Gegebenheiten:** Joch, Position der Drehachse, Lätewinkel, Klöppel
2. **Turmschwingungsdynamik:** Joch, Position der Drehachse, Lätewinkel, Klöppel
3. **Denkmalschutz:** Joch, Glockenstuhl, Klöppelform, Lätewinkel
4. **ästhetische Anforderungen:** Joch, Klöppelform
5. **Schlagzahl:** Joch, Position der Drehachse, Lätewinkel, Klöppel
6. **Montage:** Ausrichtung und Antrieb für Glocke und Joch
7. **Lautstärke:** Klöppeldimensionierung, Lätewinkel
8. **Lebendigkeit der Schallausbreitung:** Lätewinkel, Klöppeldimensionierung
9. **Klang durch Intonation des Klöppels:** Klöppeldimensionierung
10. **Schlagverschleiß:** Klöppel mit Aufhängung, Lätewinkel
11. **Ermüdungsfestigkeit:** Klöppeldimensionierung, Lätewinkel
12. **Läutebetrieb:** Antrieb, Steuerung und Automatisierung für Glocke und Klöppel

Glocke, Turm und Läutekultur können weitgehend als gegeben betrachtet werden. Betrachtet man dann diese unterschiedlichen Anforderungen und dazu die Komponenten des Systems, die gezielt ausgelegt werden müssen, um die Anforderungen sicher zu erfüllen, so fällt auf, dass der Klöppel bei allen Anforderungen direkt oder mittelbar eine Rolle spielt.

2. Grundlegende Zusammenhänge

Das Material des Klöppels wird so gewählt, dass der Klöppel sich nicht in die Glocke eingräbt sondern sich im Bereich des Anschlags anpasst und einen etwa münz-großen Anschlagbereich ausbildet. Dieser darf nicht so groß sein, dass sich klatschende Geräusche ausbilden. Abb. 1 zeigt, dass es bei höherfestem Material zu hohen Beanspruchungen in der Glocke kommt.

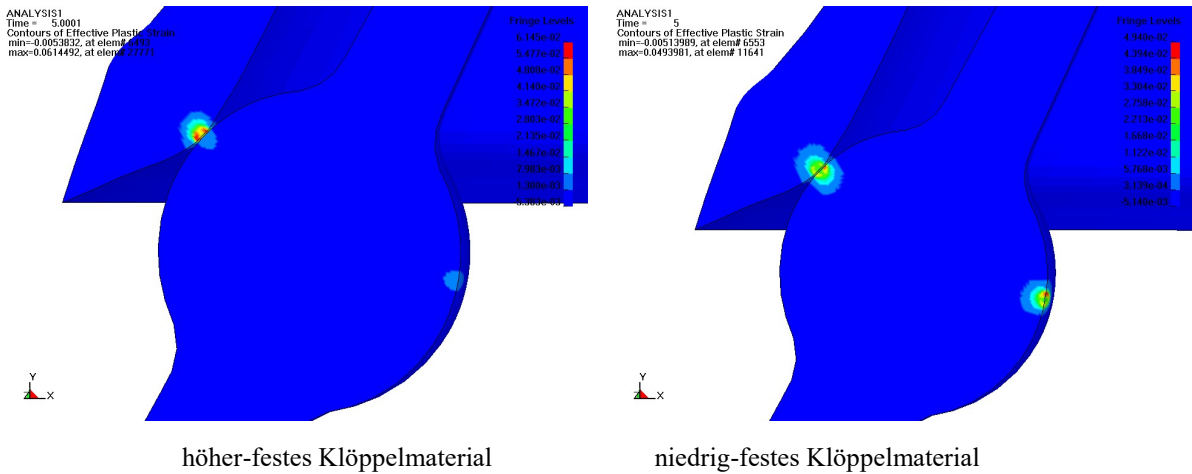


Abb. 1: Einfluss des Klöppelmaterials, plastische Verformung an den Kontaktflächen nach dem 10. Anschlag

Die Länge des Klöppels in Verbindung mit der genauen Form im Bereich der Anschlagstelle sollte derart ausgeführt sein, dass die Flugrichtung des Balls zusammenfällt mit der Normalen der Berührfläche, um während des Kontakts Scherbeanspruchungen möglichst zu minimieren, die zu einem erhöhten Schlagverschleiß führen können. (Abb. 2)

Dazu sind die Position der Klöppelaufhängung und deren Ausführung sowie die Ballenform und die Anschlaghöhe aufeinander abzustimmen. Der Anschlagpunkt liegt knapp oberhalb des Übergangs von der Schärfe zur Flanke und in Richtung des größten Querschnitts, um die Glocke ausgewogen anzuregen und gleichzeitig nicht zu hoch zu beanspruchen. (Abb. 2)

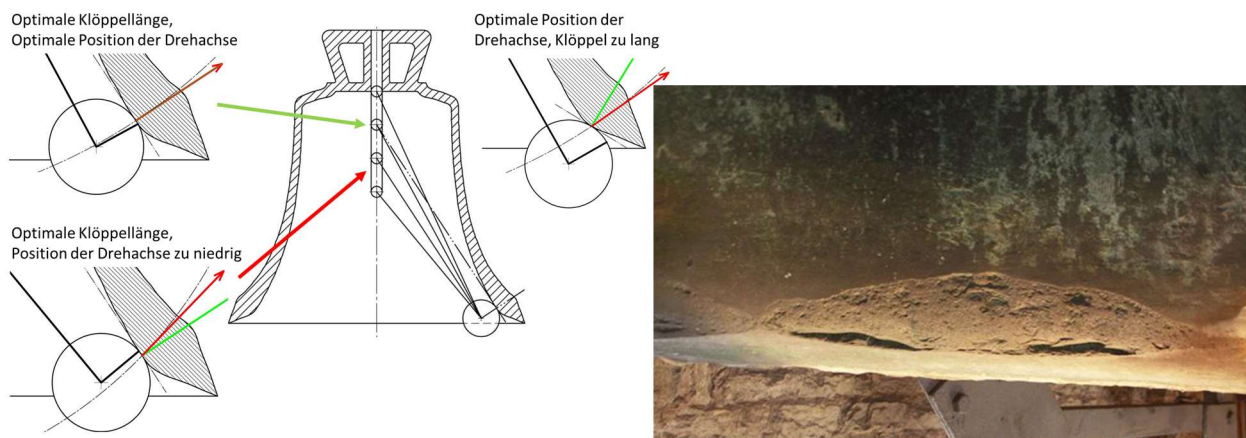


Abb. 2: Richtung des Anschlags und Kontaktflächennormale

Mithilfe der Ausführung der Klöppelaufhängung kann die Beanspruchung der Glocke im Bereich der Anschlagstellen beeinflusst werden. Von besonderer Bedeutung ist, dass die Aufhängung den Klöppel gut in seiner Schwingrichtung führt, um möglichst einen festen Anschlagpunkt zu gewährleisten. Dauernd wechselnde Anschlagbereiche führen zu einer verstärkten elasto-plastischen Beanspruchung der Glocke im Anschlagbereich, die zu erhöhtem Verschleiß führt.

Mit einer sogenannten Doppelgelenkaufhängung, wie sie vor allem in der Schweiz eingesetzt wird, kann der Klöppel im oberen Schaftbereich durch die quasi momentenfreie Aufhängung des Klöppels durch geringe Beanspruchungen entlastet werden. Zudem kann durch die kugelgelagerte Aufhängung die Dämpfung des Klöppelpendels verringert werden, was den notwendigen Lätewinkel und damit die Anschlagintensität beeinflusst.

Die Masse des Klöppels und hier insbesondere die Masse des Ballens bestimmen im Zusammenwirken mit der Anfluggeschwindigkeit im Moment des Anschlags die Anschlagintensität. Diese bestimmt die Lautstärke, den Schlagverschleiß in Verbindung mit Scherbeanspruchungen im Kontakt sowie die Ermüdungsbeanspruchung der Glocke. Der eingestellte Lätewinkel erlaubt ein mehr oder weniger starkes Anschlagen. Abb. 3 zeigt die Auswirkungen von Klöppelgewicht und Lätewinkel auf die rechnerische Ermüdungsschädigung eines 2min-Läutens.

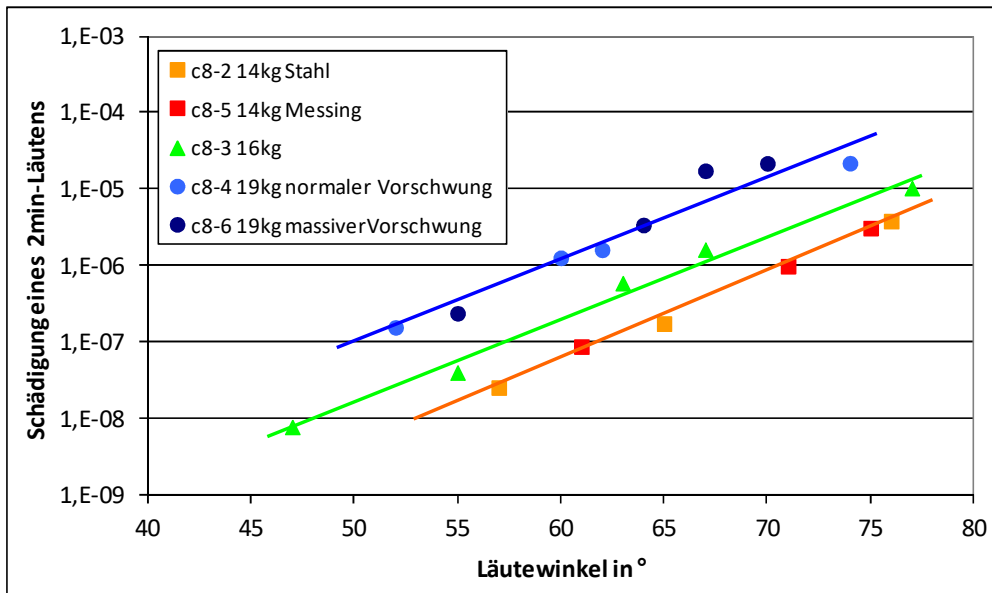


Abb. 3: Rechnerische Schädigung in Abhängigkeit der Klöppelmasse und des Lätewinkels

Das Klöppelgewicht, die Anschlagfläche sowie die Anfluggeschwindigkeit und -richtung bestimmen in Verbindung mit der Steifigkeit des Schlagrings die Dauer des Anschlags und seinen zeitlichen Ablauf. Die Dauer des Kontaktes liegt meist deutlich unter einer Millisekunde. Bei leichten Klöppeln ist sie kürzer als bei schweren Klöppeln.

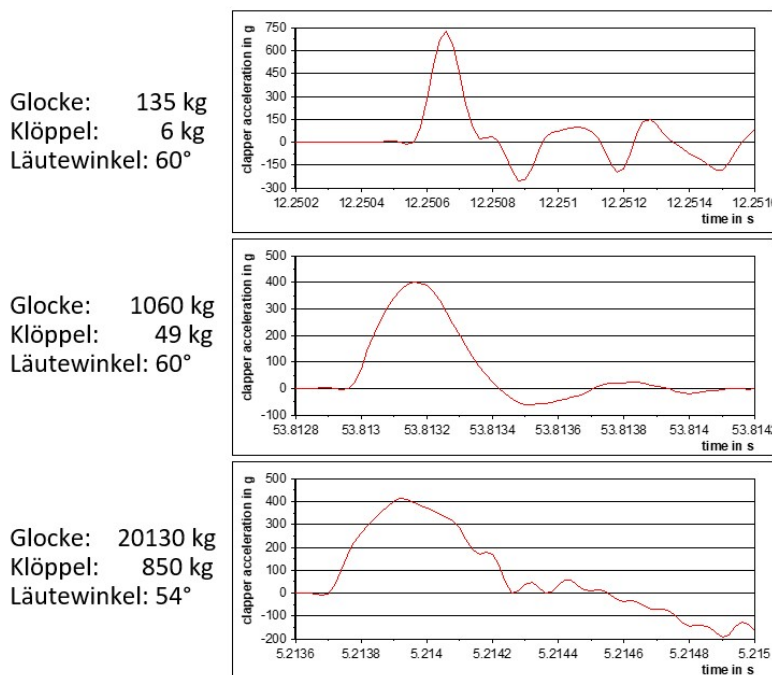


Abb. 4: Dauer und Verlauf des Anschlags für unterschiedlich schwere Klöppel

In Abb. 4 sind beispielhaft die Zeitfolgen der Klöppelbeschleunigungen eines typischen Anschlags eines leichten, mittleren und schweren Klöppels jeweils an geeigneten Glocken gezeigt. Eine kurze Anschlagdauer regt

hohe Teiltöne und eine lange niederere Teiltöne verstärkt an. Die Parameter Anfluggeschwindigkeit, Klöppelmasse, Ballen-Durchmesser, Schaftdicke und Vorschwingform erlauben eine gezielte Beeinflussung von Lebensdauer und Klang. Insbesondere ein Klöppel mit gedrunenem Vorschwing erweist sich als vorteilhaft hinsichtlich hoher Lebensdauer und grundtönigem Klang. Mit Computersimulationen wurden systematische Analysen der Anregung einer Glocke mit unterschiedlichen Klöppeln untersucht und im Hinblick auf Glockenbeanspruchung, Anschlagintensität und die Anschlagdauer als Maß für die Anregung hoher und niedriger Teiltöne gezeigt.

Tabelle 1: Einfluss der Klöppelausführung auf Beanspruchung, Anschlagintensität und Klang

Erhöhung von	Beanspruchung	Anschlagsintensität	Anschlagdauer
Anfluggeschwindigkeit	↑	↑	↓
Klöppelmasse	↑	↓	↑
Kugeldurchmesser	↑	↑	↓
Schaftdicke	▬	▬	▬
Vorschwing	↓	▬	↑

Auch die Installation der Glocke am Joch sowie des Klöppels in der Glocke haben Einfluss auf das Läuteverhalten, die Beanspruchung und die Klangentfaltung der Glocke. Eine Schiefelage der Glocke erfordert beispielsweise einen höheren Lätewinkel, um gleichmäßige Anschlagbedingungen zu erreichen, was zu einer höheren Schädigung führt. Ein außermittig in der Glocke installierter Klöppel führt einseitig zu höheren Beanspruchungen, die damit auch ein erhöhtes Risiko für Ermüdungsschäden bedeuten.

3. Bestimmung der Parameter und Simulation

Für eine derart sensible Auswirkung von Form, Gewicht, Material, Ballenausführung, Länge und Aufhängung sind ausgefeilte und zuverlässige Methoden in Verbindung mit belastbaren Daten erforderlich, um die jeweiligen Auswirkungen einer Parameterfestlegung auf das Läuten vorhersagen, bestimmen und gezielt einstellen zu können. Hierzu dienen einerseits CAD-Modelle, in denen das Glockensystem detailliert mit allen Komponenten modelliert wird. (Abb. 5) Diese Modelle erlauben die Bestimmung aller physikalischen Größen des schwingenden Systems und insbesondere die Auslegung für gewünschte Lätewinkel und Anschlagintensitäten. Mithilfe geeigneter experimenteller Methoden können diese Parameter verifiziert werden.

Mit den zuverlässig bestimmten Parametern des Glockensystems lassen sich Computersimulationen durchführen, die zur Optimierung der Parameter und der Läutebedingungen beitragen. (Abb. 5)

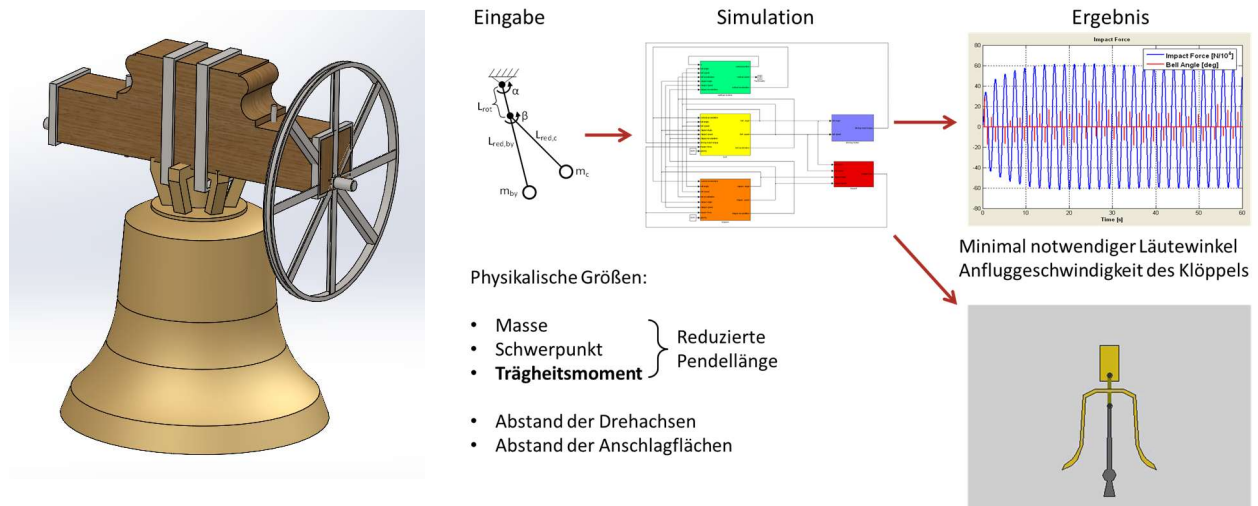


Abb. 5: Simulation des Läutens – detaillierte CAD und FEM sowie dynamische Modelle

4. Bewertung

Zur Bewertung eines Glockensystems werden Messungen wesentlicher Größen beim Läuten vorgenommen: der Lätewinkel als Maß für die eingestellten Läutebedingungen, die Beschleunigung am Klöppelballen als Maß für die Belastung der Glocke und die örtlichen Dehnungen gegenüber den Anschlagpunkten als Maß für die Beanspruchungen der Glocke zur Bewertung des Risikos für deren Schädigung. Außerdem nehmen Mikrofone den Klang auf.

Anhand der gemessenen Dehnungen lässt sich das Risiko für Schäden an der Glocke bewerten sowie überprüfen, ob die Beanspruchungen einseitig unverhältnismäßig höher liegen aufgrund asymmetrischer Anschlagbedingungen. Dabei wird angenommen, dass die Materialqualität im Bereich der hohen Beanspruchungen an den Anschlagstellen übliche Festigkeitswerte aufweist. Hier muss angenommen werden, dass dort auch typische Fehlstellen (wie leichte Gaseinschlüsse oder kleinere Fremdkörpereinschlüsse) vorhanden sind, wie sie in jeder Glocke vorkommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese am unteren Bereich des Streubandes der Festigkeit liegen, da kein Verfahren bekannt ist, mit dem die örtliche Festigkeit der gegossenen Bronze genauer bestimmt werden kann. Auftretende Schäden an Glocken bestätigen diese Annahme.

Bei einigen Schweißverfahren, die zur Reparatur gerissener Glocken verwendet werden, insbesondere das autogene Schweißverfahren, ist davon auszugehen, dass die Schweißnaht nicht mehr die Festigkeitswerte aufweist, wie das gegossene Material, da in der Vergangenheit Schweißnähte oft mit Fehlstellen oder Porosität ausgeführt waren. Dies kann klanglich kaum festgestellt werden, da die örtlichen elastischen Eigenschaften die Schäden korrigieren und wegen der sehr lokalen Einflüsse keine signifikanten Auswirkungen auf den Klang feststellbar sind. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Festigkeit in diesem Bereich nicht deutlich herabgesetzt ist, was an wiederholten Schäden reparierter Glocken beobachtet werden kann. Hier bietet sich an, die Erkenntnisse zu nutzen, dass die Beanspruchung an den Anschlagbereichen erheblich höher sind als in den Bereichen zwischen 20° und 40° der Glocke. Schäden in einem sehr frühen Stadium oder reparierte Schäden können daher durch Drehen der Glocke in diese Winkelbereiche verschoben werden. Diese Bereiche sind dann deutlich niedriger beansprucht und Schäden treten kaum mehr auf. (Abb. 10)

- Höchste Beanspruchungen im Bereich der Klöppelanschlagstellen
- Hohe Beanspruchungen zwischen 60° und 90° zu den Anschlagstellen
- Niedrigste Beanspruchungen zwischen 20° und 40° zu den Anschlagstellen

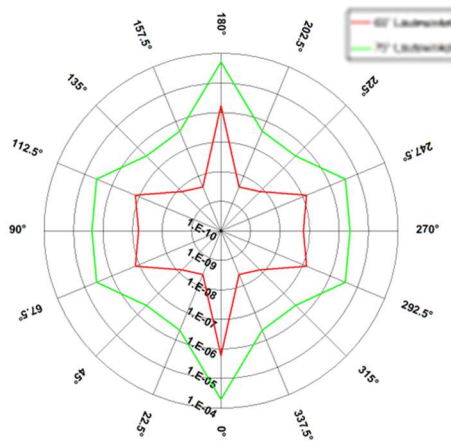


Abb. 6: Einfluss des Drehens von Glocken

- ➔ Richtiges Drehen von Glocken ist sinnvoll
- ➔ Fehlstellen, Schweißnähte, Ausbrüche, ca. 20° - 40° zum Anschlag positionieren

5. Anforderungen an die Gestaltung von Klöppeln

In Abb. 7 sind unterschiedliche Klöppel gezeigt, die für verschiedene Glocken durch das ECC-ProBell konstruiert und ausgelegt wurden. Gewicht und Massenverteilung wurden jeweils so gewählt, dass sich für die jeweilige Glocke beim angestrebten Lätewinkel ein schonendes Läuten erreichen ließ. Dabei wurden die baulichen Anforderungen von Glockenstuhl und -stube berücksichtigt. Die Formgebung selbst richtete sich sowohl nach denkmalpflegerischen als auch nach den klanglichen Anforderungen.

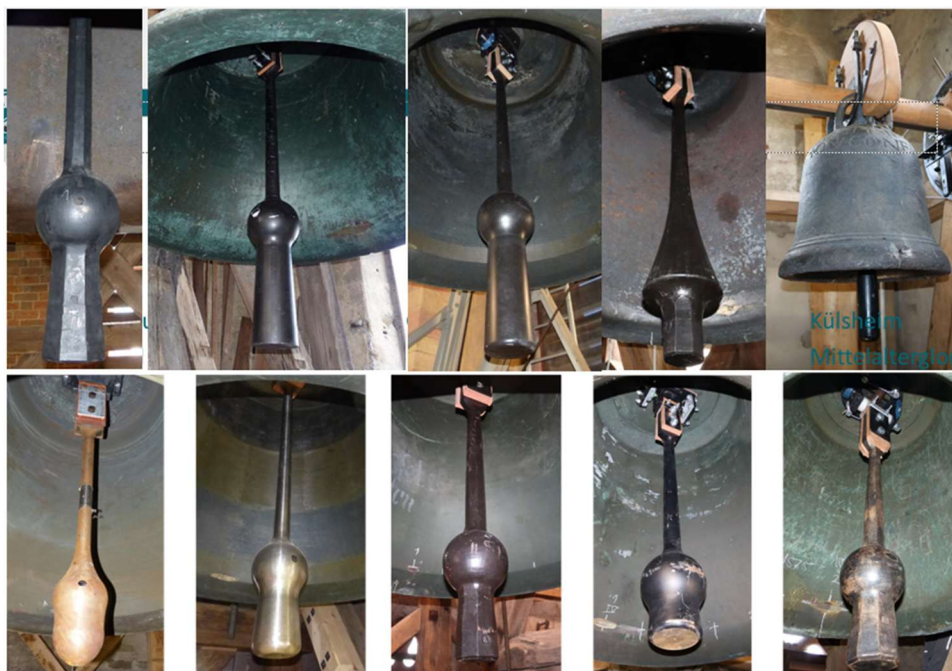


Abb.7: ECC-ProBell Klöppel

Gemeinsam ist diesen sehr unterschiedlich anmutenden Klöppeln, dass sie alle gezielt konstruiert und ausgelegt wurden, um aus verschiedenen Gesichtspunkten vorgegebene, zum Teil sich widersprechende Anforderungen zu erfüllen. Diese unterschiedlichen Anforderungen wurden dabei nicht durch das ECC-ProBell vorgegeben, sondern stammen von den zuständigen Glockensachverständigen, Fachfirmen, Gemeinden und dem Denkmalschutz. Das ECC-ProBell trägt mit seinem Know-how, den Ingenieurswerkzeugen und Daten dazu bei, diese sehr unterschiedlichen Anforderungen in bestmöglicher Form zu erfüllen und einen geeigneten Kompromiss zu gestalten. Hierzu dient das in Abb. 12 (im Ausschnitt) gezeigte Dokument, das zu Beginn eines Projektes erstellt wird, in dem die unterschiedlichen Anforderungen zunächst benannt werden, um auf diese bewusste Entscheidung aufmerksam zu machen.

6. Der musikalische Fingerabdruck

Der musikalische Fingerabdruck von Glocken ist eine bewährte Methode, um den Zustand von Glocken zu untersuchen und das Vorhandensein von Fehlstellen, fortgeschrittenem Verschleiß und insbesondere Rissen mithilfe von Klanganalysen zu ermitteln. Das Verfahren wurde mittlerweile an mehr als 500 Glocken angewendet, von denen etwa 5% schadensbehaftet waren.

Dazu macht sich die Methode die Zwillingsstonbildung zunutze, die allen rotationssymmetrischen Körpern zu eigen ist. Auf Basis von Versuchen, Simulationen sowie empirischen Erkenntnissen konnte nachgewiesen werden, dass Risse mit zunehmender Ausdehnung eine zunehmende Spaltung von Teiltönen nach sich ziehen. Welche Teiltöne dabei konkret betroffen sind, hängt von der Rissposition und Risslage ab.

Tonspaltungen an rotationssymmetrischen Körpern werden dadurch hervorgerufen, dass die Homogenität der Form oder der Materialeigenschaften über den Umfang eines solchen Körpers gestört ist.

In Bezug auf die Form können dies Fertigungsfehler sein, die sich aus dem Formprozess oder dem Gießprozess inklusive der Abkühlung ergeben, wie beispielsweise Beulen, Deformationen, lokale Fertigungsungängen, aber auch Lunker und größere Gaseinschlüsse. Verschiedene Arten von Ausbrüchen stellen ebenfalls Formfehler dar, insbesondere zählt dazu der Schlagverschleiß des Klöppels oder des Stundenschlaghammers, der vor allem bei historischen Glocken bekanntermaßen zu deutlichen Formveränderungen im Bereich des Schlagrings führen kann. Abweichungen von der Form stellen schließlich auch Inschriften, Ornamente und damit jegliche Art von Glockenzier dar, die sich nicht über den gesamten Umfang der Glocke erstrecken. Alle diese Beispiele haben gemeinsam, dass sie eine gewisse flächige Ausdehnung in horizontaler Richtung besitzen. Aus diesem Grunde bewirken solche Inhomogenitäten Tonspaltungen nur bei Teiltönen, deren Eigenformen großflächige Schwingungsbäuche und damit eine geringe Anzahl von Knotenmeridianen besitzen. Dies sind vor allem Unterton und Prime mit jeweils zwei Maxima und Minima und insgesamt vier Knotenmeridianen. Terz und Quinte, die jeweils drei Maxima und Minima und insgesamt sechs Knotenmeridiane besitzen, reagieren bereits nur noch schwach auf horizontal-flächige Formabweichungen. (Abb. 8)

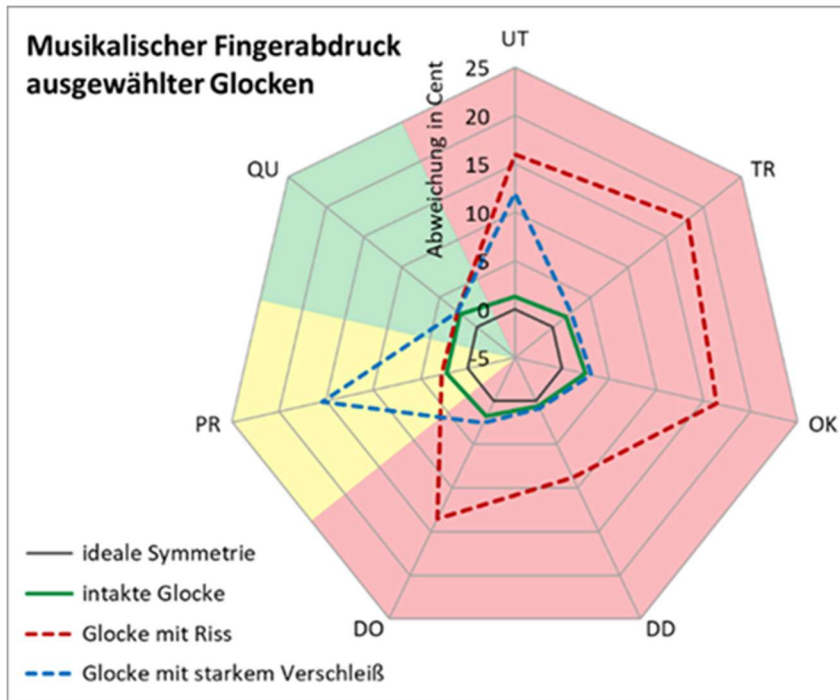


Abb. 8: Tonspaltungen an Glocken im Idealzustand bzw. mit typischen Schäden

Das Verfahren macht sich die Eigenschaft rotationssymmetrischer Körper zunutze, dass deren Schwingeeigenformen jeweils paarweise auftreten und bei perfekter Rotationssymmetrie identische Eigenfrequenzen besitzen. Für die Glocke bedeutet das, dass jeder Teilton der Glocke in Wirklichkeit als Teiltonpaar vorhanden ist, das im Idealzustand zwei identische Eigenfrequenzen besitzt. Da in der Realität eine perfekte Rotationssymmetrie und eine perfekte Homogenität der Materialeigenschaften nicht erreicht wird, können für jeden Teilton der Glocke zwei Eigenfrequenzen ermittelt werden. Solche Abweichungen von der Rotationssymmetrie sind fertigungsbedingt (Lunker, Fremdkörpereinschlüsse, Gaseinschlüsse oder Formfehler), materialbedingt (Inhomogenität der Legierung) oder werden durch Inschriften oder Ornamente hervorgerufen und sind somit als glockenimmanente Tonspaltungen zu klassifizieren, die unveränderlich zum Klangbild einer Glocke gehören.

Aus dem Läutebetrieb einer Glocke resultieren jedoch auch Abweichungen von der Rotationssymmetrie, die jedoch das Klangbild entweder sehr langsam (Verschleiß an den Klöppel- oder Uhrenhammer-Anschlagstellen) oder verhältnismäßig rasch (Ermüdungsrisse) verändern. Die Herausforderung bei der Auswertung des musikalischen Fingerabdrucks ist folglich, die glockenimmanenten (unveränderlichen) Tonspaltungen von den veränderlichen Tonspaltungen zu unterscheiden, um den Zustand einer Glocke bewerten zu können.

Auf Basis empirischer Untersuchungen hat sich herauskristallisiert, dass die glockenimmanenten Tonspaltungen im Allgemeinen nur eine sehr geringe Eigenfrequenzdifferenz von weniger als 5 Cent besitzen. Ausnahmen gibt es nur bei Glocken, die durch besondere Merkmale auffallen, wie Ausbrüche, sichtbare Formfehler, großflächige und schwere Ornamente. Auch die nach einer Schweißreparatur sich einstellenden Teiltendifferenzen sind als glockenimmanent zu betrachten. Aus diesem Grund ist bei der Klangaufnahme immer auch der äußere, sichtbare Zustand der Glocke in Wort und Bild zu dokumentieren, um gegebenenfalls signifikante Tonspaltungen eindeutig zuordnen zu können.

Da die Hauptbeanspruchung an der Glocke beim Läuten in Umfangsrichtung erfolgt und sich Ermüdungsrisse quer zur Hauptbeanspruchungsrichtung ausbreiten, verlaufen Risse in Glocken üblicherweise in vertikaler Richtung. Schweißnähte infolge von Rissreparaturen besitzen daher ebenfalls eine weitgehend vertikale Ausrichtung. Diese vertikale Lage der Inhomogenität bewirkt Tonspaltungen bei all jenen Teiltönen, deren Schwingungsmaxima sich im Bereich des Risses befinden, unabhängig von der Anzahl und Ausdehnung der Schwingungsmaxima, und ist damit ein wichtiges Merkmal zur Identifikation von Rissen. Da sich Risse in den meisten Fällen vom Schlagring aus ausbreiten, sind daher die Teiltöne Unterton, Terz, Oktave, Duodezime und Doppeloktave von signifikanten Tonspaltungen betroffen. (Abb. 8)

7. Beispiele untersuchter Glocken mit charakteristischen Klangeigenschaften

7.1 Glocke mit Ausbruch an der Schärfe

Die Osanna ist die größte Glocke des Geläutes des Münsters in Überlingen und wurde im Jahr 1444 gegossen. Die Glocke besitzt einen markanten Ausbruch, der sich an der Schärfe über ca. 30° des Glockenumfangs erstreckt. Der Ausbruch befindet sich im Bereich der ursprünglichen Anschlagstelle. Derzeit ist die Glocke um ca. 60° gedreht aufgehängt. (Abb. 9)

Aufgrund des großflächigen Ausbruchs am Rand der Glocke wurden bei fast allen Teiltönen der roten Kategorie (UT, TR, OK, DD) sowie bei der Prime signifikante Tonspaltungen ermittelt. Die Doppeloktave besitzt hingegen keine signifikante Tonspaltung, da beide Partialeigenformen vom Ausbruch gleichermaßen beeinflusst werden und damit beide Eigenfrequenzen nahezu identisch ausfallen. Es ist davon auszugehen, dass die ermittelten Tonspaltungen keinen Hinweis auf einen Ermüdungsriss darstellen.

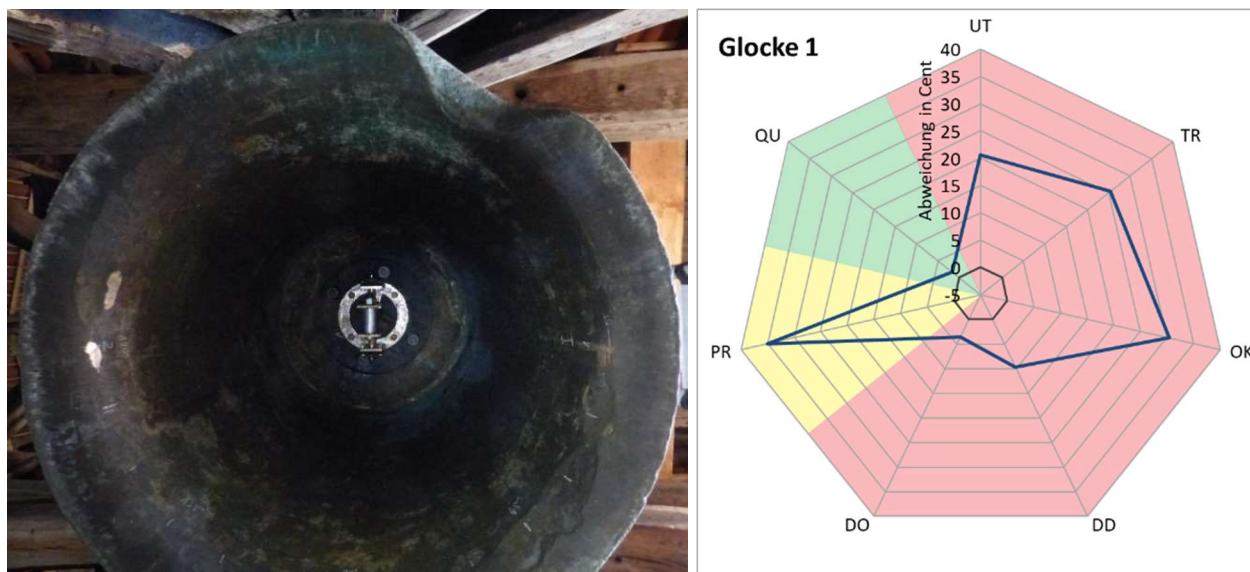


Abb. 9: Osanna des Überlinger Münsters (links), Position des Ausbruchs an der Schärfe (rechts)

Eine zuverlässige Bestimmung des Zustands der Osanna und ein sicheres Ausschließen eines Risses ist jedoch nur möglich, wenn eine erneute Analyse des musikalischen Fingerabdrucks nach ca. 1-2 Jahren erfolgt ist.

7.2 Glocke mit starkem Verschleiß

Glocke 2 der reformierten Kirche in Thierrens stammt vermutlich aus dem 15. Jahrhundert. Der Klöppel ist noch nach klassischem Prinzip in die eingegossene Klöppelöse über eine Lederschleife eingebunden, und die Glocke wird noch von Hand geläutet. Die Anschlagbedingungen des Klöppels sind sehr mangelhaft, was zu einem starken Verschleiß am Schlagring der Glocke (Materialabtrag mehr als 15% der Schlagringdicke) geführt hat. (Abb. 10)

Die Glocke besitzt signifikante Tonspaltungen bei allen untersuchten Teiltönen außer bei Terz und Quinte. Die stärksten Tonspaltungen sind bei Unterton und Prime vorzufinden, die üblicherweise durch Verschleiß und Verformungen am Schlagring hervorgerufen werden. (Tab. 3) Die Eigenformen von Oktave, Duodezime und Doppeloktave werden normalerweise nicht vom Verschleiß beeinflusst. Im vorliegenden Fall fällt jedoch der Materialabtrag an den gegenüberliegenden Anschlagstellen nicht in gleichem Umfang aus, so dass keine symmetrische Abweichung vorliegt, was eine Aufspaltung dieser Teiltöne begünstigt.

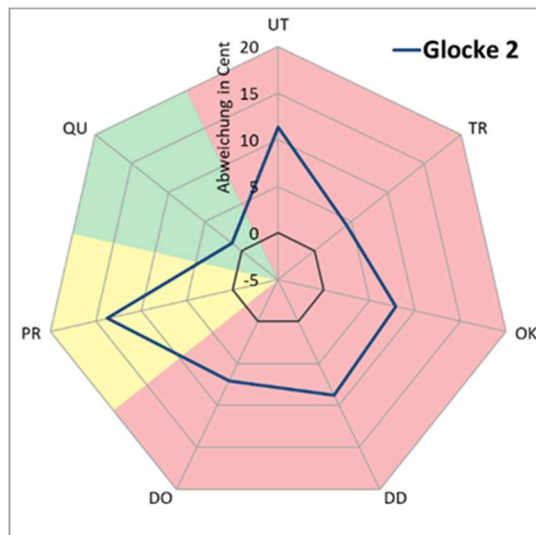


Abb. 10: Glocke 2 von Thierrens mit starkem Verschleiß am Schlagring

Mithilfe einer messtechnischen Dokumentation der Verschleißstellen und einer intensiven äußeren Begutachtung der Glocke kann hier ein Ermüdungsrisse mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Aufgrund der historischen Bedeutung dieser Glocke wird jedoch auch hier eine regelmäßige Überprüfung ihres Zustands mit dem musikalischen Fingerabdruck empfohlen, verbunden mit der Empfehlung, die Läutebedingungen so anzupassen, dass der Schlagverschleiß minimiert wird.

7.3 Glocke 7 des Breisacher Münsters

Glocke 7 des Breisacher Münsters wurde im Jahre 1583 gegossen. Im Zuge der Sanierungsarbeiten an den Türmen und am Geläute des Breisacher Münsters wurde die Glocke im März 2015 erstmals untersucht. Erst bei der Nachmessung im Juli 2021 wurde festgestellt, dass die Glocke im Bereich der Flanke Risse besitzt.

Die an der Innenoberfläche der Glocke erkennbaren Risse weisen eine deutliche Oxidation auf. Die Rissausbreitung des größeren Risses ist sternförmig ausgeprägt, was darauf hinweist, dass dieser durch einen Stoß hervorgerufen sein könnte.

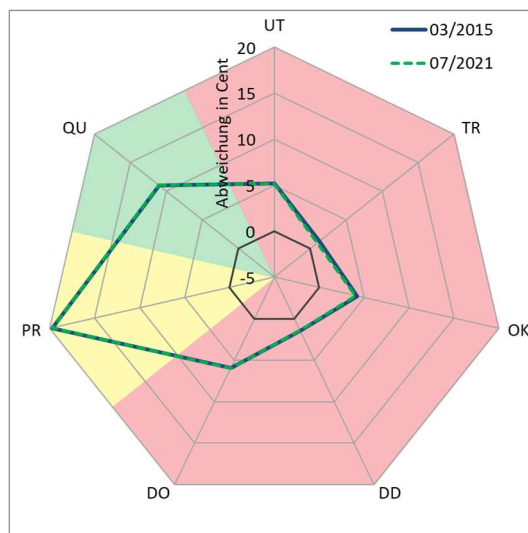


Abb. 11: Glocke 7 (links) mit Flankenrissen (rechts)

Im Klang der Glocke wurden signifikante Tonspaltungen bei Prime, Quinte und Doppeloktave festgestellt. Die prägnante Tonspaltung der Prime ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Materialabtrag am Schlagring zurückzuführen, die Spaltung der Quinte wird durch die ermittelten Risse in der Flanke verursacht und die Spal-

tung der Doppeloktave geht vermutlich auf lokale Fehlstellen wie einen Lunker oder Materialinsuffizienzen zurück. Zwischen 2015 und 2021 wurden insbesondere bei der Quinte keine wesentlichen Veränderungen im Schwingverhalten der Glocke festgestellt.

Im Zuge der Sanierungsarbeiten wurde die Glocke mit einem angepassten Klöppel ausgestattet, um die Beanspruchungen beim Läuten und damit das Risiko für ein Wachstum der Flankenrisse zu verringern. Dennoch wird auch für diese Glocke empfohlen, den Zustand regelmäßig (bspw. im Rahmen der Wartungsarbeiten) zu überwachen, um frühzeitig Veränderungen im Klangbild der Glocke feststellen zu können, die auf ein Risswachstum hinweisen.

8. Begleitung der Petersglocke im Kölner Dom

Am 05.01.2011, dem Vorabend des Dreikönigsfestes, brach der Klöppel der Petersglocke beim Läuten und stürzte in das Geländer, das sich rund um die Petersglocke befindet.

Die Ursache des Klöppelabsturzes war ein Bruch im Klöppelblatt (Abb. 12) im Bereich der unteren Verschraubungen, der durch eine Verkettung von Konstruktionsdetails, Reparaturmaßnahmen und Montagefehler entstand. Am Bruchbild ist erkennbar, dass die Risse an zwei Stellen an den Bohrungen entstanden, einem Bereich in dem beim Läuten hohe Biegebbeanspruchungen auftreten und der durch Konstruktion und Montage in seiner Festigkeit stark reduziert war.



Abb. 12: Klöppelseitige Bruchfläche mit Kerben in Bohrungen

Um die Glocke mit einem neuen Klöppel auszustatten, war nach der Schadensanalyse der Zustand der Glocke zu untersuchen, die bekanntermaßen einen Riss aufweist. Dieser war bereits 1951 durch Schweißung repariert worden und anschließend wurde die Glocke so gedreht, dass der reparierte Riss im Bereich vergleichsweise niedriger Beanspruchungen zu liegen kam.

Die erprobten Berechnungs- und Simulationsmethoden wurden zur Analyse des Läutens mit dem alten, gebrochenen Klöppel herangezogen, um den Beanspruchungsintensität bzw. das Risiko für das Entstehen eines Ermüdungsrisse in der Petersglocke für die 54 Jahre Läutedauer mit diesem Klöppel unter dem bis dahin eingestellten Läutewinkel von 50° abzuschätzen. Diese Berechnungen ergaben eine sehr hohe Anschlagsintensität des Klöppels ermittelt, die einem sehr hohen Risiko für Ermüdungsschäden entspricht. Als Ursache für diese hohe Anschlagsintensität wurden die zu hohe Klöppelmasse sowie der zu groß dimensionierte Klöppelballen ausgemacht. So betrug die Klöppelmasse 859kg, was etwa 4% der Glockenmasse entspricht, und der Ballendurchmesser 400mm, was etwa dem 1,8-fachen der Schlagringstärke entspricht. Eine solche Klöppelauslegung ist für Glocken bis etwa 1000kg geeignet, für große Glocken jedoch überdimensioniert und deutlich zu schwer.

Ein Weiterläuten der Glocke mit diesem Klöppel hätte mit großer Wahrscheinlichkeit innerhalb weniger Jahren zu Rissen in der Glocke geführt.

Um den Zustand der Glocke zu charakterisieren, wurde einerseits die Innenseite der Glocke mit dem Farbeindringverfahren auf Riss untersucht. (Abb. 13)

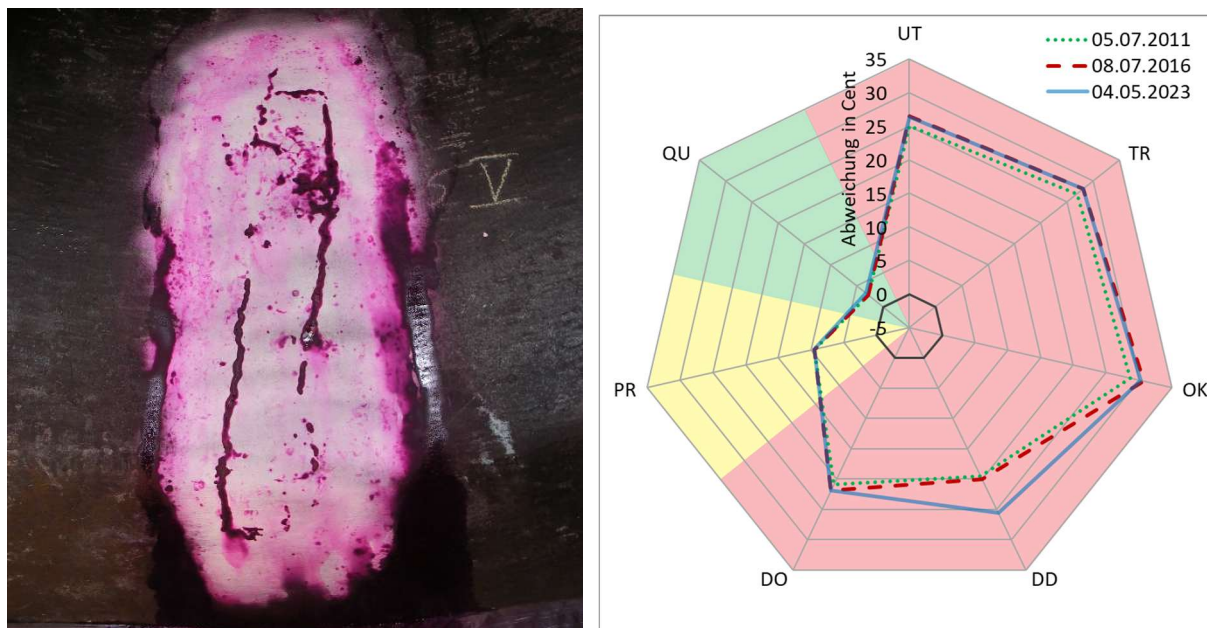


Abb. 13: Schweißnaht auf der Außenseite (links) und auf der Innenseite (rechts)

Im Jahre 1951 wurde an der Glocke im Bereich der Klöppelanschlagstelle ein Riss festgestellt, der 1956 im Turm des Kölner Doms im Autogen-Schweißverfahren repariert wurde. Die Glocke wurde daraufhin um ca. 40° gedreht und mit einem neuen, leichteren Klöppel ausgestattet.

Die Schweißnaht geht durch die Wanddicke über eine Länge von ca. 750mm und eine Breite von bis zu 150mm. Die Schweißnaht ist stark zerfurcht, und Risse, Gasblasen und Lunker sind erkennbar., insbesondere am Übergang zwischen Schweißgut zum Originalmaterial. Diese Risse deuten darauf hin, dass sich das Schweißgut nicht oder nur ungenügend mit dem Originalmaterial verbunden hat. (Abb. 4) Auf der Innenseite sind zudem zahlreiche kleinere und größere Ausbrüche erkennbar, die vermuten lassen, dass eine nicht ausreichende Verbindung zwischen den einzelnen Schweißlagen vorhanden ist.

Darüber hinaus wurde der musikalische Fingerabdruck ermittelt, wobei die Glocke mit der vorhandenen 600kg schweren Kugen rundherum angeschlagen wurde-Abb. 14.

Die in Abb. 12 festgestellten Tonspaltungen resultieren aus den Rissen im Übergangsbereich von Originalmaterial und Schweißgut und vermutlich auch aus den Eigenschaften des Schweißgutes im Vergleich zum Grundmaterial. Es ist möglich, dass sich in der Schweißnaht bereits neue Risse gebildet haben. Die tatsächlichen Gegebenheiten im Inneren der Schweißnaht können nicht ermittelt werden. Es ist davon auszugehen, dass trotz des Drehens der Glocke um 40°, die Anschlagintensität des alten Klöppels beim Läuten derart hoch war, dass die Beanspruchungen die Festigkeit der Schweißnaht überstiegen hat. In Bezug auf den Zustand der Glocke zum Zeitpunkt des Klöppelbruchs kann somit konstatiert werden, dass der Klöppel die Glocke beim Läuten im hohen Maße geschädigt hat. Es ist davon auszugehen, dass durch das Läuten mit diesem Klöppel ein Risswachstum in der Schweißstelle hervorgerufen wurde, das zu den ermittelten Tonspaltungen geführt hat.



Abb. 14: Klangmessungen am 05.07.2011 mit der Kugel der Kaiserglocke

Um die Glocke wieder in Betrieb nehmen zu können, wurden folgende Überlegungen angestellt:

- Auf eine neuerliche Reparatur sollte verzichtet werden, das der Riss im Bereich von 40° zur Anschlagstelle im Schwingungsknoten sich kaum im Höreindruck bemerkbar macht.
- Ein neuer Klöppel sollte so ausgelegt werden, dass die beobachteten Risse sich nicht mehr weiter ausbreiten und dass die Anschlagintensität derart reduziert wird, dass das Risiko für neue Schäden deutlich verringert wird.
- Der neue Klöppel sollte so gestaltet werden dass die bekannte Klangqualität des dicken Pitter kaum beeinträchtigt wird.

Zur Schonung der Glocke wurde die Klöppelmasse verringert, ohne dabei zu große Klangeinbußen hinnehmen zu müssen. Der Ballendurchmesser wurde auf 370mm verkleinert, was einer Massenreduktion von 20% entspricht. Die Klöppelgesamtmasse sank um 25% auf insgesamt 641kg. Da sich zu große Anschlagflächen ungünstig auf die Klangentfaltung einer Glocke auswirken können, wurde der Durchmesser der Bronzepuffer von 120mm auf 80mm verkleinert. Zudem wurde die Position der Puffer um 8° gegenüber dem Ballenäquator nach oben geneigt, um einen zentralen Stoß des Klöppels auf die Glockenoberfläche zu ermöglichen- Abb. 15.

Im Oktober 2011 wurde der Klöppel nach den Vorgaben des ECC-ProBell durch Fa. Edelstahl Rosswag hergestellt, ehe er Anfang Dezember 2011 in der Petersglocke installiert wurde. Am 07.-08.12.2011 erfolgte das Probeläuten und die Intonation der Glocke.



Abb. 15: CAD-Modelle des alten (oben) und neuen Klöppels (unten)

Der musikalische Fingerabdruck der Petersglocke, aufgenommen in 2011, zeigt signifikante Tonspaltungen ($\Delta f > 5\text{Cent}$) bei allen untersuchten Teiltönen mit Ausnahme der Quinte. Dabei sind die Tonspaltungen von Unterton, Terz, Oktave, Duodezime und Doppeloktave so stark ausgeprägt, wie bei einer Glocke mit einem ca. 50cm langen Riss, der sich bereits über ca. 75% der Glockenwandung ausgedehnt hat. Die Spaltung der Prime ist

vergleichbar wie bei Glocken mit Deformationen oder geringem bis mittlerem Schlagverschleiß an den Anschlagstellen. Die geringfügige Spaltung der Quinte ergibt sich aus den üblichen Fertigungsungenauigkeiten sowie den Einflüssen der Glockenzier und ist als unbedenklich zu bewerten. (Abb. 12)

Nach 2011 wurde der musikalische Fingerabdruck in 2017 und 2023 erneut aufgenommen, um die Auslegung und die Einstellungen des Läutens zu überprüfen. In den ca. 4,5 Jahre bis 2017 wurde die Glocke nach der damaligen Läuteordnung mit ca. 12h-15h Läutedauer pro Jahr betrieben. Nach 2018 wurde dann die Läuteordnung überarbeitet und die jährliche Läutedauer der Petersglocke auf etwa 6,5h reduziert.

Für den Zeitraum von 2011 bis 2016 ist erkennbar, dass bei den Teiltönen Unterton, Terz, Oktave, Duodezime und Doppeloktave die Tonspaltungen geringfügig zwischen 0,5 Cent und 2 Cent zunahm, während die Tonspaltungen von Prime und Quinte im gleichen Zeitraum konstant blieben. Im Zeitraum von 2016 bis 2023 blieben hingegen die Tonspaltungen konstant mit Ausnahme der Duodezime, deren Spaltung um 5,5 Cent zunahm.

Diese Ergebnisse zeigen, dass es von 2011 bis 2016 vermutlich zu einem geringen Risswachstum kam, was möglicherweise durch eine ungünstige Klöppelinstallation und einer daraus folgenden erhöhten Anschlagsintensität des Klöppels verursacht wurde.

Die Zunahme der Tonspaltung der Duodezime um 5,5 Cent weist auf eine Veränderung im Klangkörper der Glocke hin, die jedoch nicht einem Risswachstum zuzuordnen ist, da dies zwingend auch zu wachsenden Tonspaltungen der anderen betroffenen Teiltöne führen würde. Die Ursache dieser Tonspaltungszunahme ist noch nicht abschließend geklärt.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass es seit 2016 keine systematische Veränderung im Schwingverhalten der Petersglocke gegeben hat und daher derzeit von einer stabilisierten Situation auszugehen ist. Ermöglicht wurde diese stabilisierte Situation durch die Reduktion der Anschlagsintensität mit dem im Jahr 2011 neu installierten Klöppel. Aufgrund der Vorschädigungen der Petersglocke und des schmalen Grads zwischen Schädigung und guter Klangentfaltung ist jedoch eine weitere Überwachung der Petersglocke mit dem musikalischen Fingerabdruck dringend erforderlich.

9. Fazit

Glocken sind Kulturgut, Musikinstrument und mechanische Komponente einer Maschine zugleich. Schäden an Glocken entstehen aufgrund von Material-Ermüdung und Schlagverschleiß, Um die Risiken von Schäden unter Betriebsbedingungen des Läutens zu bestimmen, lassen sich die einschlägigen Ingenieurswerkzeuge der Betriebsfestigkeit, die vornehmlich im Bereich des Maschinen, Flugzeug und Fahrzeugbereichs entwickelt und weit verbreitet sind – Messungen, Simulation und Schädigungsparameter. Das Verfahren des musikalischen Fingerabdrucks macht sich die besondere Eigenschaft eines rotations-symmetrischen Klangkörpers zu Nutze, um jede feine Veränderung im Klangkörper zu detektieren – ein effizientes Werkzeug für eine Schadensfrüherkennung in einem Monitoring.

Hierzu wurde auf der Webseite ECC-Probell (www.ecc-probell.de) der Glockenatlas erarbeitet, in dem alle erfassten musikalischen Fingerabdrücke untersuchter Glocken dokumentiert sind, so dass zukünftige Klangaufnahmen ausgewertet mit diesen Verfahren direkt zum Vergleich herangezogen und für eine Schadensfrüherkennung genutzt werden können.

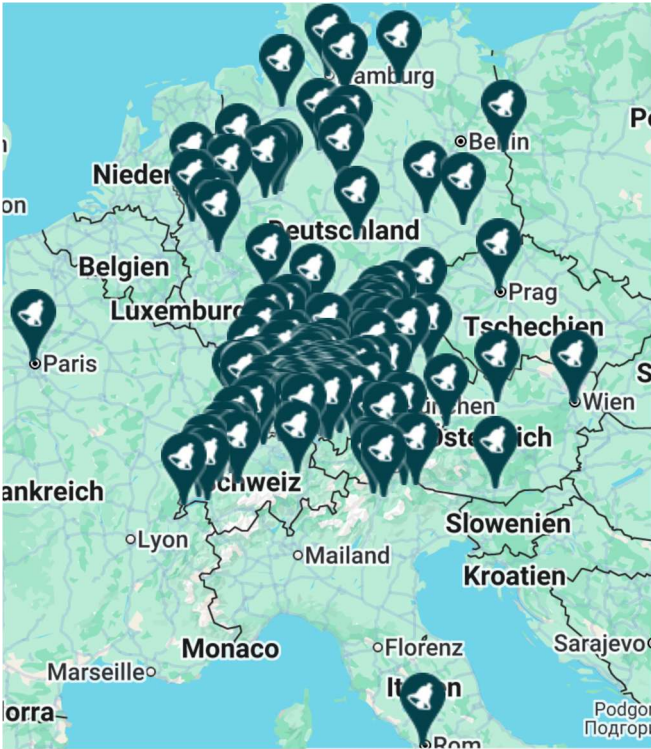


Abb. 16: Glockenatlas des ECC Probell (www.ecc-probell.de)