

EGEA Phase_Shift Method for Suspension Testing

Die EGEA (European Garage Equipment Association) phase_shift Methode stellt einen bedeutenden Fortschritt in der Fahrzeugprüftechnik dar, der traditionelle EUSAMA-Verfahren durch erweiterte Phasenverschiebungsanalyse ergänzt. [Google](#) [Autopromotec](#) **Die Methode misst sowohl die Kraftamplitude als auch die Phasenbeziehung zwischen der Anregung der Prüfplatte und der resultierenden Kontaktkraft des Reifens, wodurch eine präzisere Dämpferdiagnose ermöglicht wird.** Diese innovative Herangehensweise wurde ursprünglich von der amerikanischen SAE vorgeschlagen und wird seit 2011 erfolgreich im belgischen GOCA-System mit 4,5 Millionen jährlich geprüften Fahrzeugen eingesetzt. [Google](#) [+2](#)

Mathematische Grundlagen der Phase_Shift Berechnung

Grundlegende Phasenverschiebungsformel nach EGEA

Die fundamentale Phasenverschiebungsberechnung für die Fahrwerksprüfung basiert auf der Beziehung zwischen gedämpfter und ungedämpfter Eigenfrequenz:

$$\varphi = \arctan(\omega D / \omega N)$$

Wobei:

- φ = Phasenverschiebungswinkel (Grad oder Radiant)
- ωD = gedämpfte Eigenfrequenz
- ωN = ungedämpfte Eigenfrequenz

Für die Frequenzbereichsanalyse wird die Phasenverschiebung zwischen Anregung und Antwort berechnet:

$$\varphi(\omega) = \arctan(2\zeta\omega/\omega_n / (1 - (\omega/\omega_n)^2))$$

Wobei:

- ζ = Dämpfungsgrad
- ω = Anregungsfrequenz
- ω_n = Eigenfrequenz

Berechnung des minimalen Phasenverschiebungswertes φ_{min}

Der φ_{min} -Wert repräsentiert die minimale Phasenverschiebung zwischen der Schwingplattform-Anregung und der Rad-Kontaktkraft-Antwort bei der Resonanzfrequenz. [Google](#) [Autopromotec](#) Die mathematische Formulierung erfolgt über:

φ_{min} = minimum phase angle zwischen Anregungssignal und Kraftantwortsignal

Bei der Resonanzfrequenz korreliert die Phasenverschiebung direkt mit der Dämpfung: $\tan(\varphi) = 2\zeta \times (\omega/\omega_n) / (1 - (\omega/\omega_n)^2)$

RFAMax Berechnung (Relative Force Amplitude)

Die traditionelle EUSAMA-Formel wird durch die EGEA-Methode erweitert: [lcm](#)

$$\text{EUSAMA rate} = (F_{\min}/F_{\text{static}}) \times 100\%$$

Die erweiterte EGEA-Methode kombiniert EUSAMA mit Phasenverschiebungsanalyse: **RFAMax** = **Maximum relative force amplitude during frequency sweep** $\text{RFA}(\omega) = |F(\omega)|/F_{\text{static}}$

Zusammenhang zwischen Phasenverschiebung und Dämpferqualität

Die Phasenverschiebung zeigt eine **nahezu lineare Beziehung zur Dämpferqualität**, was einen entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen Methoden darstellt. [ResearchGate +3](#) Der Dämpfungsgrad wird mathematisch berechnet als: [Omni Calculator](#)

$$\zeta = C/(2\sqrt{km})$$

Wobei C der Dämpfungskoeffizient ist.

Qualitätsbewertungskriterien:

- Guter Dämpfer: φ_{\min} im spezifizierten Bereich (typisch 20°-45°)
- Schlechter Dämpfer: φ_{\min} außerhalb akzeptabler Grenzen
- Kritische Dämpfung: $\varphi = 90^\circ$ bei Resonanz

Die **lineare Monotonie der phase_shift Methode** bietet vorhersagbarere und konsistentere Ergebnisse im Vergleich zum alleinigen EUSAMA-Koeffizienten. [ResearchGate +2](#)

Verfügbare Python-Implementierungen und Algorithmen

Grundlegende Bibliotheken für Signalverarbeitung

Obwohl keine spezifischen EGEA-Implementierungen öffentlich verfügbar sind, bieten mehrere Python-Bibliotheken die notwendigen Grundlagen:

SciPy Signal Processing für Phasenverschiebungsberechnung:

python

```
from scipy.signal import hilbert, correlate
import numpy as np

def calculate_phase_shift(signal1, signal2, fs):
    correlation = correlate(signal1, signal2, mode='full')
    lags = np.arange(-len(signal2) + 1, len(signal1))
    lag = lags[np.argmax(correlation)]
    phase_shift = 2 * np.pi * lag / fs
    return phase_shift

def phase_analysis(signal):
    analytic_signal = hilbert(signal)
    amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
    instantaneous_phase = np.unwrap(np.angle(analytic_signal))
    return amplitude_envelope, instantaneous_phase
```

FFT-basierte Phasenverschiebungsimplementierung:

python

```
def calculate_phase_difference_fft(signal1, signal2):
    fft1 = fft(signal1)
    fft2 = fft(signal2)

    idx1 = np.argmax(np.abs(fft1))
    idx2 = np.argmax(np.abs(fft2))

    phase_diff = np.angle(fft2[idx2]) - np.angle(fft1[idx1])
    return np.rad2deg(phase_diff)
```

Relevante Fahrwerk-Repositories

Verfügbare Open-Source-Implementierungen:

- **bechrist/suspension_designer**: Fahrwerkskinematik-Simulation (Python 3.11) [GitHub](#)
- **nrsyed/half-car**: Fahrzeug-Halbwagenmodell mit Differentialgleichungslöser [GitHub](#)
- **tarikdzanic/Suspension-Dynamics-Simulator**: Umfassender Fahrwerksdynamik-Simulator

Diese Repositories bieten Grundlagen für die Implementierung von EGEA-Testalgorithmen, erfordern jedoch Anpassungen für spezifische phase_shift-Berechnungen.

Frequenzvariationsfunktion

Die Frequenzvariationsfunktion basiert auf dem **Quarter-Car-Modell** mit einer Transfer-Funktion:

ResearchGate +2

$$H(s) = (cs + k) / (ms^2 + cs + k)(\mu s^2 + cs + k + kt)$$

Wobei:

- m = gefederte Masse
- μ = ungefederte Masse
- c = Dämpfungskoeffizient
- k = Federsteifigkeit
- kt = Reifensteifigkeit

Frequenzantwortfunktion: $|H(j\omega)| = |\text{Numerator}(j\omega)| / |\text{Denominator}(j\omega)|$ $\varphi(\omega) = \arg[H(j\omega)] = \arg[\text{Numerator}(j\omega)] - \arg[\text{Denominator}(j\omega)]$

Die Resonanzfrequenz wird berechnet als: $\omega_r = \omega_n \sqrt{1-2\zeta^2}$ für untergedämpfte Systeme

Praktische Implementierungsdetails für die Signalverarbeitung

Signalerfassung und Vorverarbeitung

Kernsignaltypen:

- Verschiebungssignale von Vibrationsplattformen (Positionsrückmeldung)
- Kraftsignale von Kraftmesszellen/Transducern
- Beschleunigungssignale von Beschleunigungssensoren
- Phasenreferenzsignale für Anregungstiming

Abtastratenanforderungen:

- Minimum: 10x maximale Analysefrequenz (500 Hz für 50 Hz max.)
- Empfohlen: 20-50x Überabtastung für Phasengenauigkeit (1-2,5 kHz)
- Echtzeitsysteme: Bis zu 100 kHz für hochpräzise Phasenmessungen (enDAQ)

Filterungsanforderungen:

- Anti-Aliasing: Butterworth- oder Bessel-Filter mit 60 dB/Oktave
- Grenzfrequenz: 30-60% der Nyquist-Frequenz (enDAQ)
- Phasenlineare Filter bevorzugt zur Erhaltung von Phasenbeziehungen

Hardware-Anforderungen

Kernhardware-Komponenten:

- Mehrkanal-Datenerfassungssysteme (MTS)
- Kraftaufnehmer: Piezoelektrisch oder dehnungsmessstreifenbasiert (0,1% Genauigkeit)
- Wegaufnehmer: LVDT, Seilpotentiometer oder Encoder
- Vibrationsplattformen: Elektromagnetische oder servo-elektrische Aktoren (MTS)
- 24-Bit Sigma-Delta ADCs für hohe Auflösung (Data Acquisition)

Elektromagnetische Testsysteme:

- Lineare elektromagnetische Aktoren (LABA7 EMA-Typ) (LABA7) (eMpulse Test Systems)
- Kraftkapazität: 10-20 kN Spitzendynamik (eMpulse Test Systems)
- Frequenzantwort: DC bis 100 Hz
- Positionsgenauigkeit: $\pm 0,01$ mm (LABA7) (laba7)

Vergleich mit traditionellen EUSAMA-Methoden

Traditionelle EUSAMA-Methode

Kernmethodik:

- Frequenzbereich: Test bei 25Hz mit vorgeschriebener Amplitude von 6mm (ResearchGate)
- Messparameter: EUSAMA-Koeffizient (WE) = (minimale dynamische Belastung / statische Belastung) $\times 100\%$ (Roboterm) (ResearchGate)
- Bewertungskriterien: 0-20% schlecht, 21-40% akzeptabel, >40% gut (ResearchGate +4)

Einschränkungen:

- Begrenzte Diagnosefähigkeiten
- Anfällig für Reifendruckschwankungen
- Hohe Anregungsamplitude entspricht nicht modernen Straßenprofilen
- Falsch-negative Ergebnisse bei leichten Fahrzeugen (ResearchGate +4)

EGEA Phase_Shift Vorteile

Technische Verbesserungen:

- **Verbesserte Diagnosegenauigkeit:** Reduzierte falsch-negative Ergebnisse
- **Bessere Korrelation:** Mit realer Fahrwerksleistung (Google) (Inderscience)
- **Lineare Beziehung:** Phasenwinkel-Methode zeigt nahezu lineare Korrelation mit Dämpfungskoeffizient (ResearchGate +2)
- **Moderne Fahrzeugkompatibilität:** Besser geeignet für zeitgemäße Fahrzeugkonstruktionen

Belgiens Erfolgsimplementierung:

- Betriebsbereit seit 2011 unter GOCA [Autopromotec](#)
- Testet 4,5 Millionen Fahrzeuge jährlich [Autopromotec](#)
- Nachgewiesene Erfolgsbilanz über 13+ Jahre Betrieb [Google](#) [Autopromotec](#)

Ausrüstungsanforderungen im Vergleich

EUSAMA-Ausrüstung:

- Nockenmechanismus mit 6mm Amplitudenfähigkeit
- Präzise 25Hz-Generierung [Roboterm](#)
- Dehnungsmessstreifen-Kraftmesszellen
- Grundlegende Frequenzsteuerung [Roboterm](#)

EGEA Phase_Shift Ausrüstung:

- Erweiterte Vibrationssteuerung: Präzise Amplituden- und Frequenzsteuerung
- Doppelmessung: Kraft- und Phasenwinkel-Detektionssysteme
- Signalverarbeitung: Digitale Signalverarbeitung für Phasenanalyse [Google](#)
- Erweiterte Algorithmen für Zweiparam

Kostentechnischer Vergleich:

- EUSAMA: Niedrigere Anfangsinvestition, etablierte Technologie
- EGEA Phase_Shift: Höhere Anfangsinvestition, aber überlegene Diagnosefähigkeiten und reduzierte Fehlmessungen rechtfertigen zusätzliche Kosten

Praktische Implementierungsempfehlungen

Kalibrierungsverfahren

Kalibrierungsstandards:

- DAkkS/ISO 17025 akkreditierte Kalibrierung erforderlich
- Kalibrierintervalle: 12-24 Monate für kritische Messungen
- Rückverfolgbarkeit zu nationalen Standards (PTB, NIST) [Spektra-labs](#) [Spektra-dresden](#)
- Dynamische Kalibrierung für frequenzabhängige Messungen

Systemintegration

Software-Architektur:

- Modulares Design mit Plugin-basierten Erweiterungen
- Echtzeit-Datenvisualisierung und -analyse

- Automatisierte Testsequenzausführung
- Berichtsgenerierung mit standardisierten Formaten

Datenbankintegration:

- SQL-Datenbanken für Testergebnisspeicherung
- Cloud-basierte Datenanalyseplattformen
- Integration mit Fahrzeugverwaltungssystemen

Die EGEA phase_shift Methode repräsentiert eine bedeutende technologische Weiterentwicklung in der Fahrwerksprüfung. [Google +3](#) **Durch die Kombination traditioneller Kraftmessungen mit fortschrittlicher Phasenverschiebungsanalyse bietet sie erheblich verbesserte Diagnosegenauigkeit und Zuverlässigkeit.** Die erfolgreiche belgische Implementierung mit 4,5 Millionen jährlich geprüften Fahrzeugen demonstriert die praktische Machbarkeit und Überlegenheit gegenüber herkömmlichen EUSAMA-Methoden, [Autopromotec](#) besonders bei modernen Fahrzeugen mit steifen Reifen, die zu irreführenden EUSAMA-Ergebnissen führen können. [Google +2](#)