

Durch gehende Personen hervorgerufene Schwingungen. Stand der Technik und Lehren für die Praxis

Glauco Feltrin, Mitglied der Arbeitsgruppe "Nationaler Anhang zur Norm EN-1990-1" (Normkommission SIA 260)

Abstract

Mit der Einführung der zweiten Generation der Eurocodes, steht erstmals für die Praxis ein kohärentes Verfahren zur dynamischen Bemessung von Fussgängerbrücken zur Verfügung, das unabhängig von den eingesetzten Baumaterialien anwendbar ist [1,2]. Das Verfahren umfasst Bemessungssituationen, dynamische Lastmodelle (Fussgängergruppen, Fussgängerströme, Joggergruppen), ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Bemessungswerte der Schwingungsamplitude und Komfortkriterien zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit.

Das Bemessungsverfahren basiert weitgehend auf Forschungsarbeiten und Bemessungsvorschläge, die vor rund 20 Jahren erstellt wurden. Dieser Beitrag versucht, anhand der neueren Forschungsergebnisse und eigenen Analysen die Frage zu klären, wie aktuell das Verfahren ist und gibt einige Hinweise für seine Anwendung in der Praxis. Aus Zeitgründen beschränkt sich der Beitrag auf Bemessungssituationen mit gehenden Personen (Fussgängergruppen, Fussgängerströme) und vertikalen Einwirkungen.

Beim Gehen wirken aufgrund der Gravitation und der Körperbewegung zeitlich variierende Kräfte auf die Unterlage (Bodenkontaktkräfte). Diese Kräfte wirken in senkrechter, lateraler und longitudinaler Richtung und bilden bei gleichmässiger Fortbewegung eine näherungsweise periodische Einwirkung. Zahlreiche Messungen zeigen, dass die Form und Amplitude der Bodenkontaktkräfte mit der Schrittfrequenz variieren. Zudem unterscheiden sie sich erheblich zwischen Personen (interpersonale Variation). Sie variieren aber auch zwischen den Schritten derselben Person (intrapersonale Variation, zufällige Variation aber auch strukturelle Variation zwischen linkem und rechtem Fuss). Darüber hinaus ist die Schrittfrequenz einer Person nicht konstant. Diese Variationen haben einen bedeutenden Einfluss auf die personeninduzierten Einwirkungen einer Fussgängerbrücke und erschweren deren Quantifizierung für die Anwendung in Bemessungsverfahren. Es überrascht daher nicht, dass bisher Dutzende, sich widersprechende Vorschläge ausgearbeitet wurden [3].

Aufgrund der nahezu periodischen Form der personeninduzierten Einwirkungen werden diese oft durch Fourier-Koeffizienten charakterisiert. Dieser Beitrag analysiert den Einfluss der einzelnen Variationen auf die Fourier-Koeffizienten und zeigt, dass die intrapersonale Variation nur einen kleinen Einfluss hat. Deutlich wichtiger sind der Einfluss der interpersonalen Variation und der Variation der Schrittfrequenz.

Anschliessend werden die Variationen der Bodenkontaktkräfte an zwei Fussgängerbrücken untersucht. Die Untersuchung erfolgt mit synthetischen Bodenkontaktkräften, die mit den Fourier-Koeffizienten der Norm ISO 10137 kalibriert wurden. Daraus wurden durch intra- und interpersonale Variation der Bodenkontaktkräfte synthetische Fussgänger erstellt. Die Fussgängerbrücken wurden als Einmassenschwinger modelliert. Für jede Bemessungssituation wurden mit den synthetischen Fussgängern personeninduzierte Einwirkungen generiert und durch numerische Integration der Bewegungsgleichungen deren Auswirkungen (max. Beschleunigung) berechnet. Aus der empirischen Verteilungsfunktion der Auswirkungen wurde schliesslich der Bemessungswert ermittelt.

Die Untersuchung zeigt:

- die gemäss ISO 10137 kalibrierten Bodenkontaktkräfte liefern zu den Messungen vergleichbare Ergebnisse,
- die oben erwähnten Variationen rufen eine grosse Streuung der Auswirkungen hervor,
- das Niveau der Fourier-Koeffizienten und die interpersonale Variation sind relevant,
- die Variation der Schrittfrequenz ist nur bei exakter Anregung mit der Eigenfrequenz relevant,
- die intrapersonale Variation ist unbedeutend,
- periodische, personeninduzierte Einwirkungen, die mit dem 1. Fourier-Koeffizient der Bodenkontaktkräfte generiert werden, liefern ähnliche Ergebnisse wie die vollständigen Bodenkontaktkräfte.

Der Vergleich der Bemessungswerte der Simulationen mit den Bemessungswerten gemäss dem Verfahren des Eurocodes zeigt:

- die Auswirkungen der Bemessungssituationen mit (ortsfesten) Personengruppen liefern sehr konservative Ergebnisse,
- die Auswirkungen der Bemessungssituationen mit Personenströme bis 0.5 Person/m² liefern zufriedenstellende Ergebnisse,
- die Auswirkungen der Bemessungssituationen mit Personenströme ab 1 Person/m² liefern sehr konservative Ergebnisse.

Daraus ergeben sich folgende Hinweise für die Praxis:

- Die Anwendung des Verfahrens gemäss des Eurocodes ist grundsätzlich empfehlenswert.
- Sind Bemessungssituationen mit Personengruppen (oder Joggergruppen) massgebend, sollte die Berechnung nach Eurocode immer mit sich bewegenden Personengruppen (konstante Geschwindigkeit) durchgeführt werden.
- Bei schwingungsempfindlichen Fussgängerbrücken oder sehr dichten Personenströmen lohnt es sich, eine dynamische Analyse mit den vollständigen Bodenkontaktkräften durchzuführen, da die Bemessungssituationen hinsichtlich z.B. Schrittfrequenzen, Fortbewegungsgeschwindigkeit und Aufkommen der Fussgänger spezifischer untersucht werden können.
- Aufgrund der genannten Variationen der Bodenkontaktkräfte sind bei Messungen an Fussgängerbrücken immer eine genügend grosse Zahl von Personen einzusetzen, um ein zuverlässiges Mass für die Streuung der Auswirkungen ermitteln zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Norm EN1990, Eurocode - Grundlagen der Planung von Tragwerken und geotechnischen Bauwerken (FprEN 1990:2022 D), Anhang G: Schwingungsnachweise für Fussgängerbrücken bei Fussgängeranregung. CEN, Brüssel.
- [2] Norm EN1991-2, Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Anhang G: Dynamische Lastmodelle für Fussgängerbrücken (FprEN 1991-2:2023 D). CEN, Brüssel.
- [3] Peters, A. E., Racic, V., Živanović, S., & Orr, J. (2022). Fourier series approximation of vertical walking force-time history through frequentist and Bayesian inference. *Vibration*, 5(4), 883-913.

Durch gehende Personen hervorgerufene Schwingungen

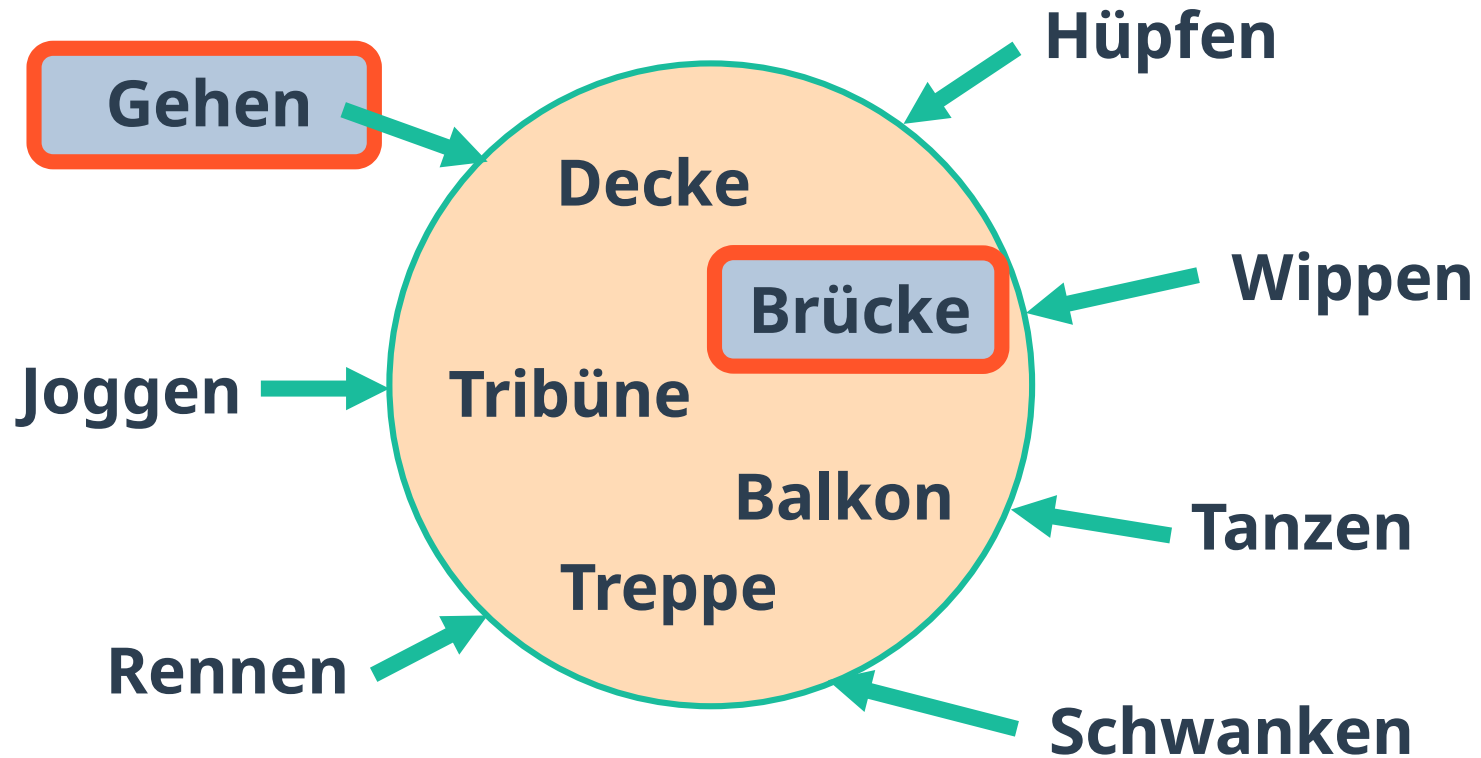
Stand der Technik und Lehren für die Praxis

Glauco Feltrin

Motivation

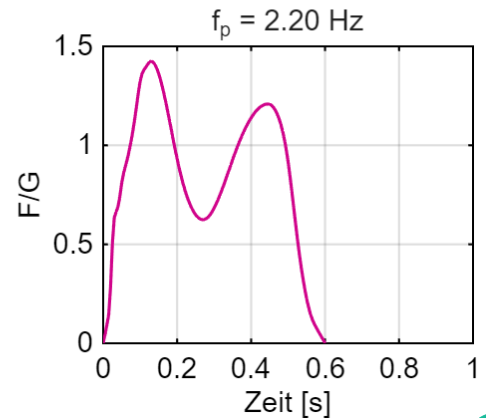
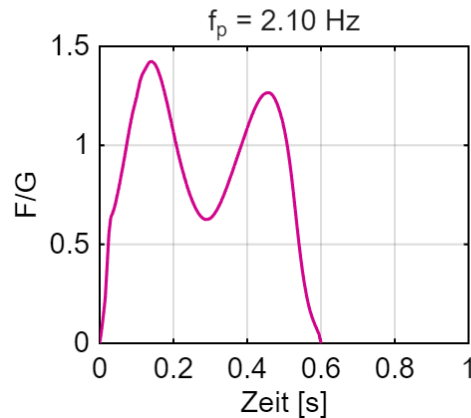
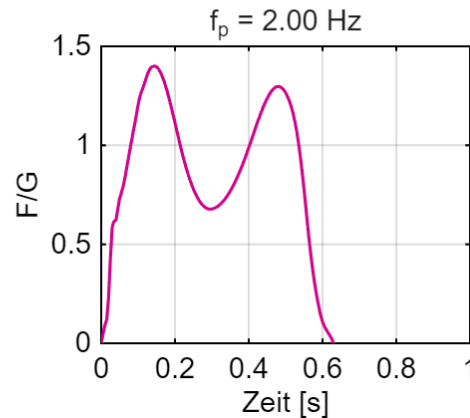
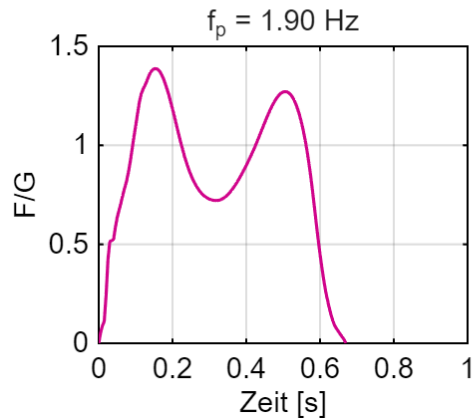
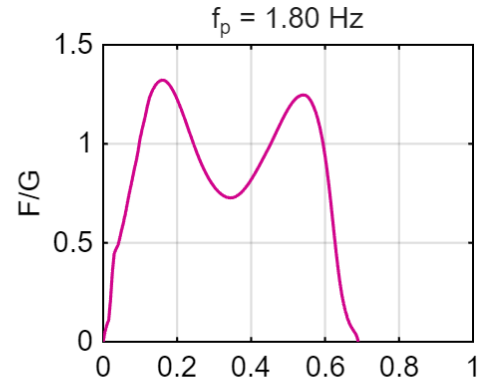
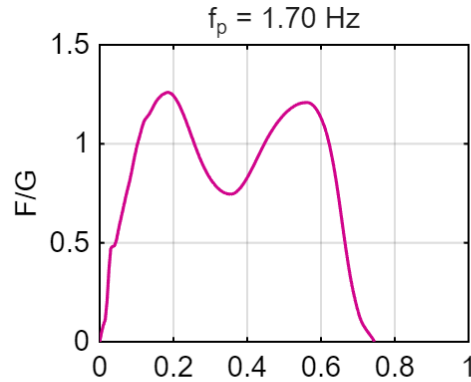
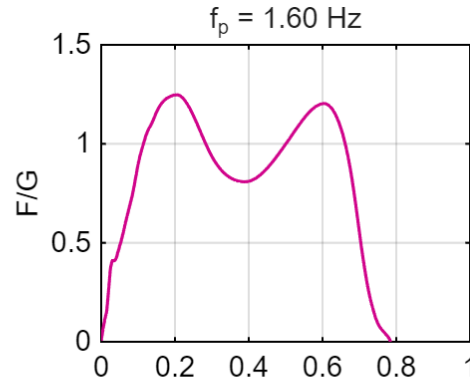
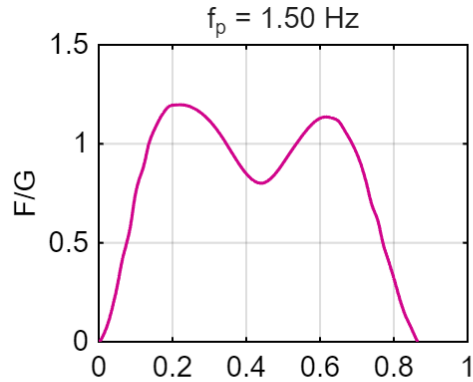
- **Einführung der 2. Generation der Eurocodes in der CH**
- **Regelungen zur Dynamik von Decken und Fussgängerbrücken**
 - EN 1990-1 Grundlagen der Tragwerksplanung
 - EN 1990-1 Anhang H: Schwingungsnachweise für Fussgängerbrücken bei Fussgängeranregung
 - EN 1991-1 Anhang G: Dynamische Lastmodelle für Fussgängerbrücken
 - EN 1995 Kap. 9 und Anhang E: Schwingungen von Holzdecken
- **Ausarbeitung des Nationalen Anhangs, der spezifische Regelungen für die CH enthalten wird**
 - Regelungen zur dynamischen Bemessung von Decken in Gebäuden und Fussgängerbrücken

Personeninduzierte Einwirkungen

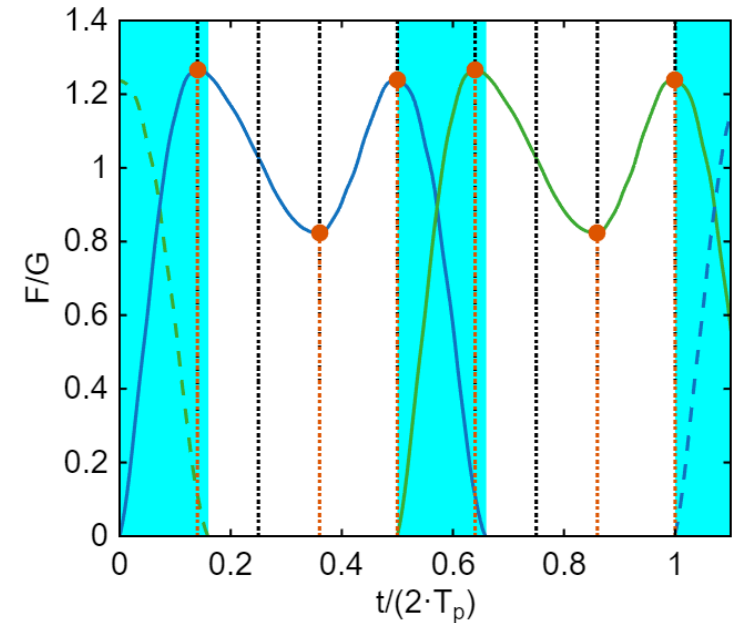
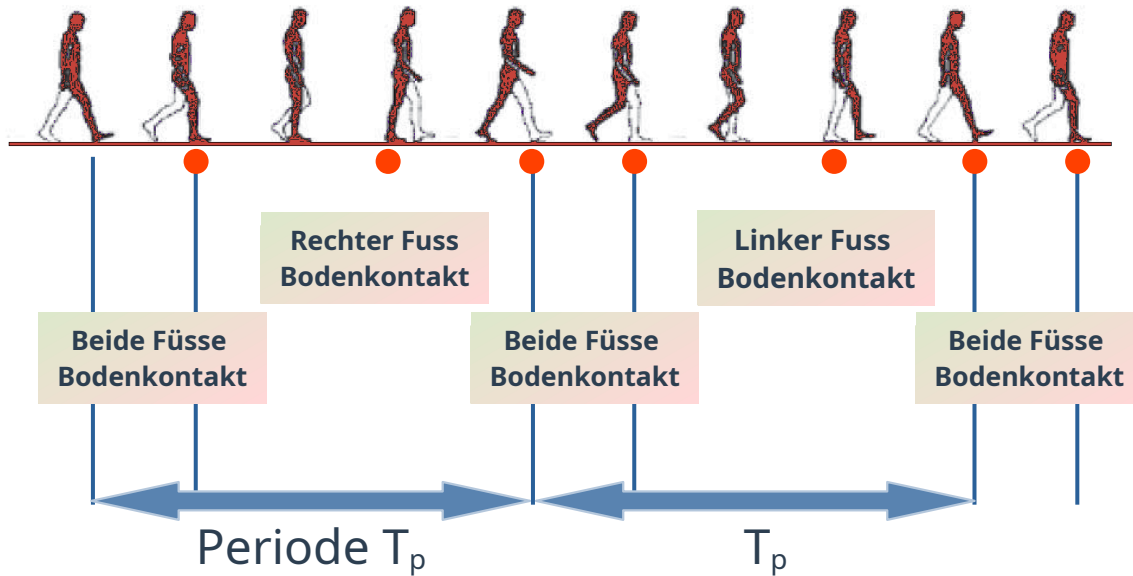


Bodenkontaktkraft (BKK) beim Gehen (ein Schritt)

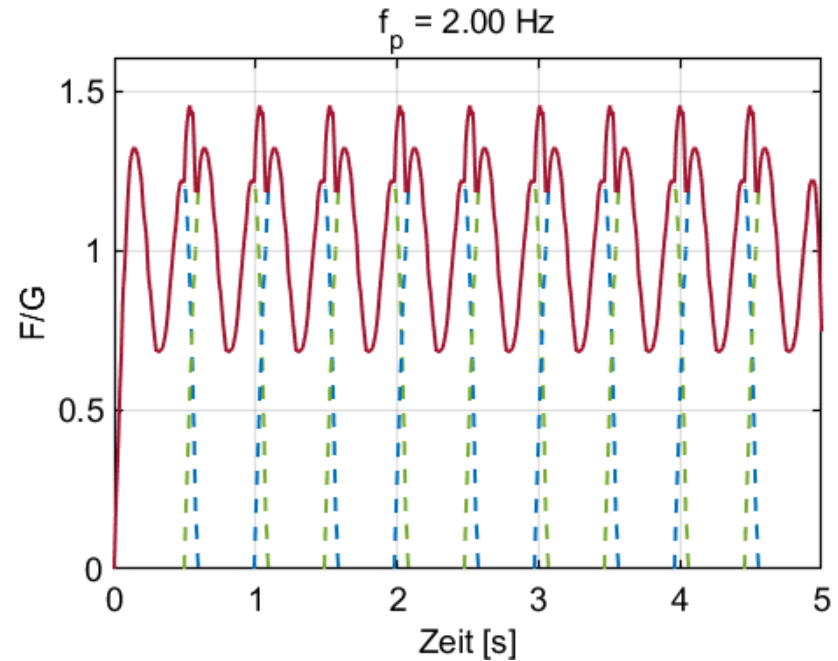
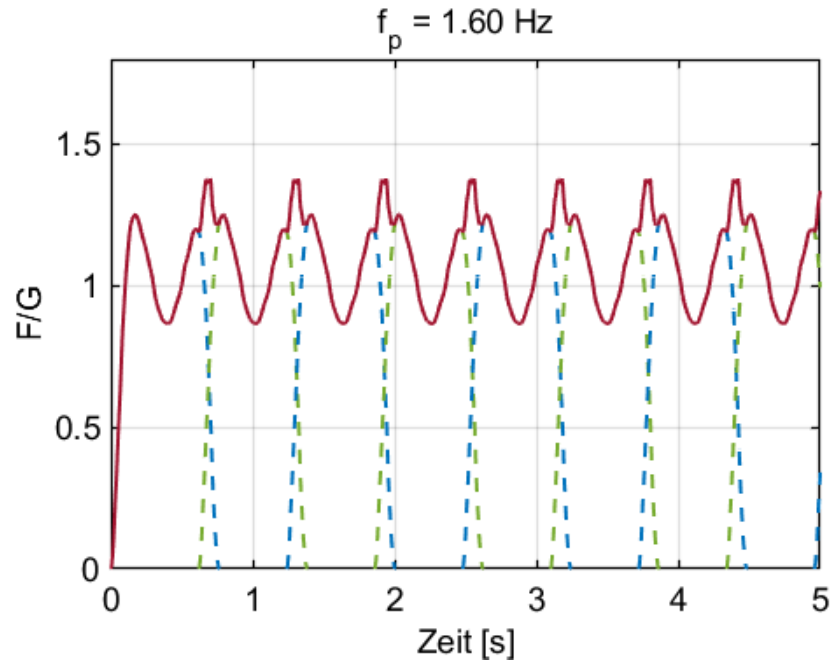
Variation mit Schrittfrequenz f_p



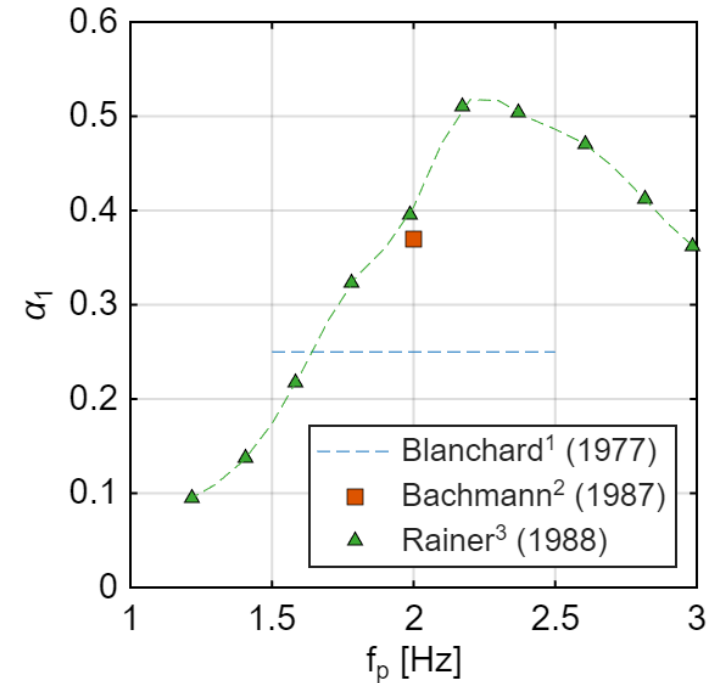
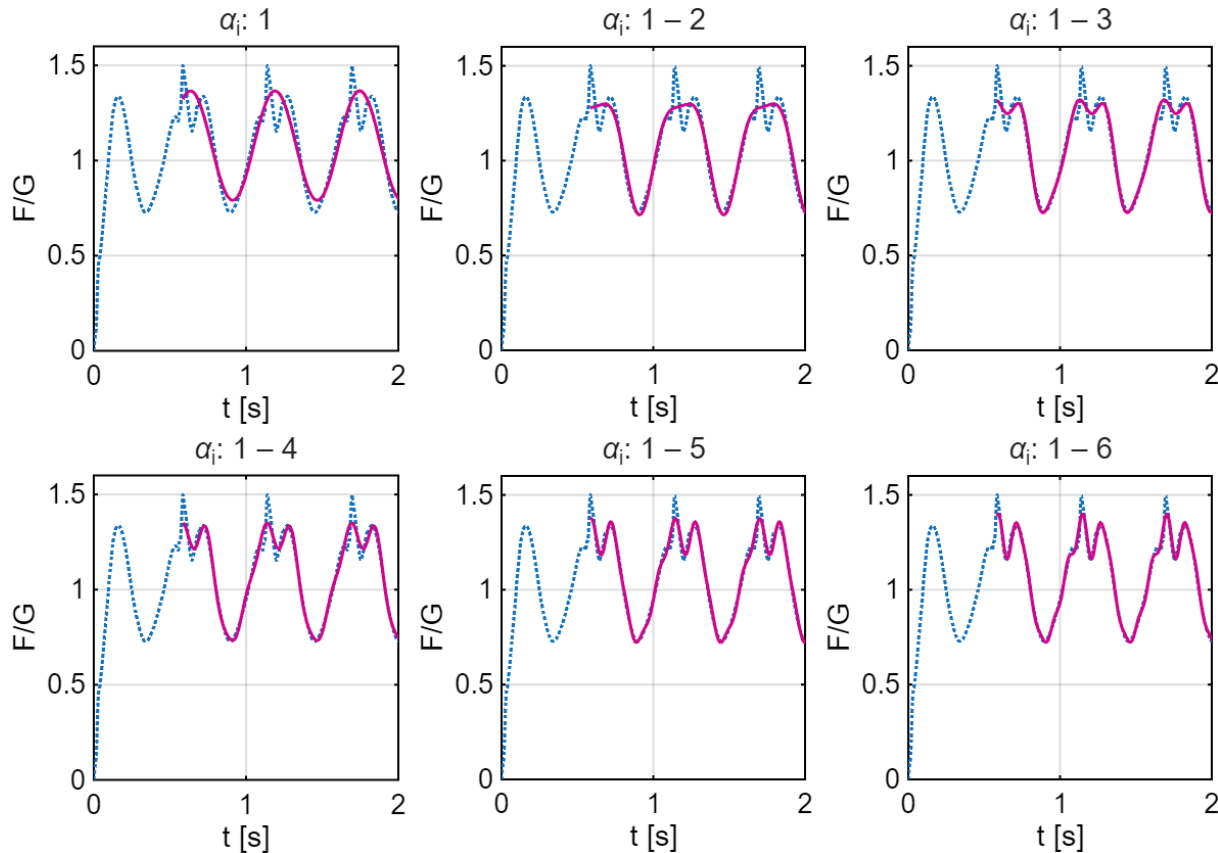
Besonderheit BKK beim Gehen



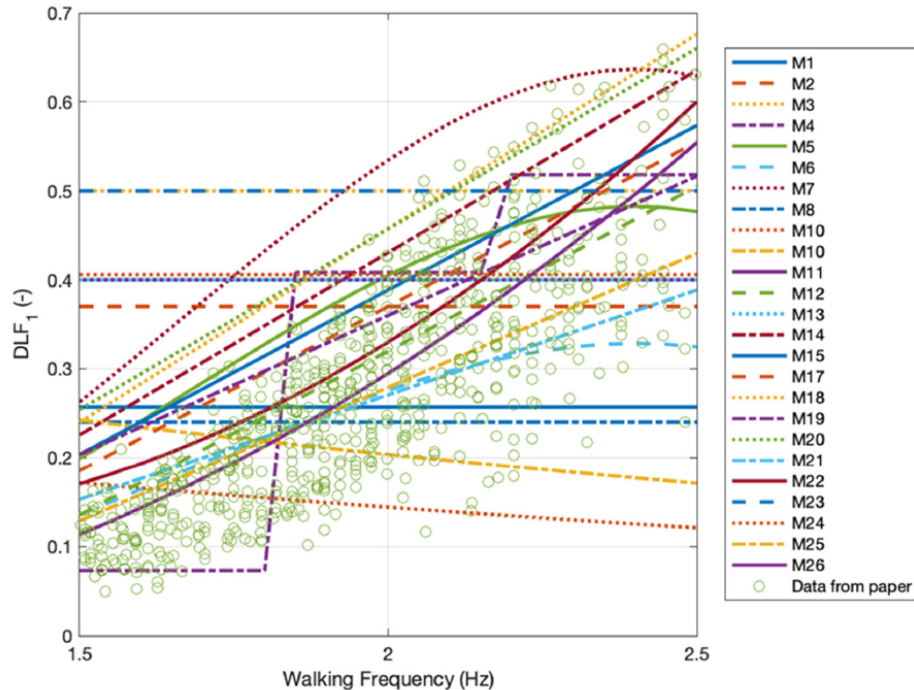
Schrittfolge: Periodische BKK



Fourier-Analyse der periodischen BKK

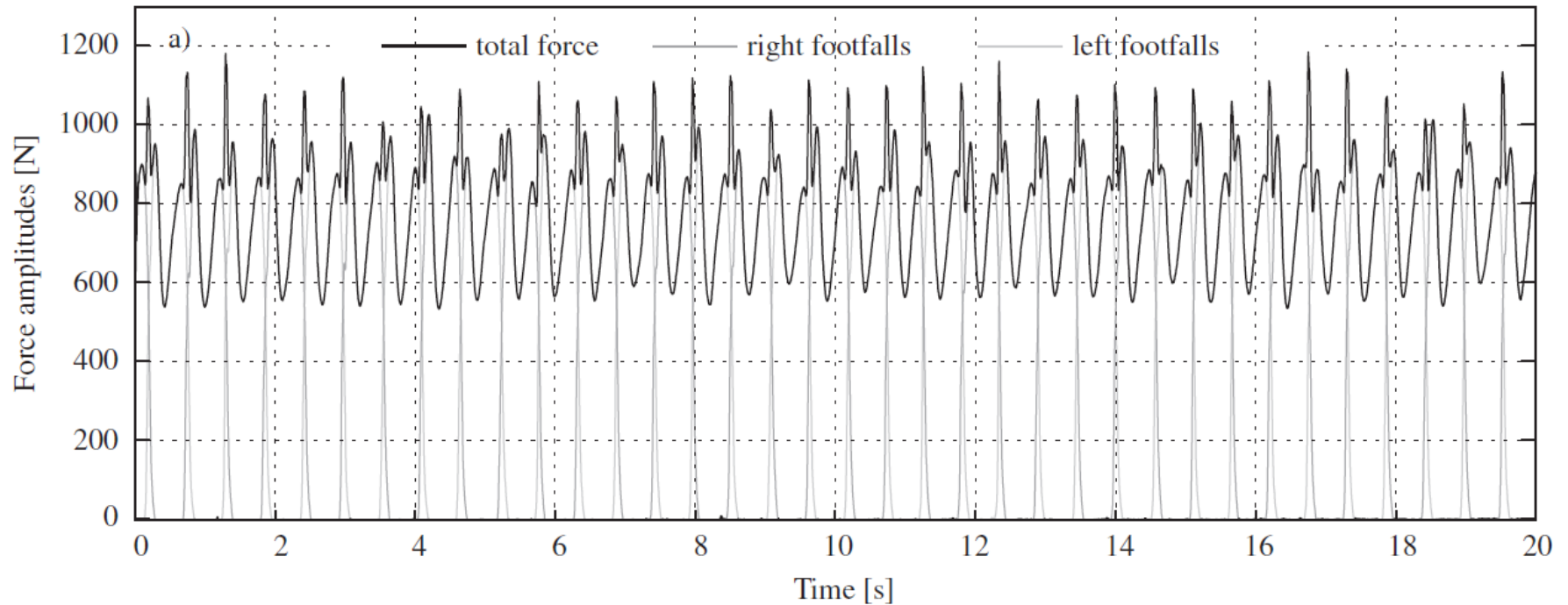


Fourierkoeffizient der 1. Harmonischen der BKK

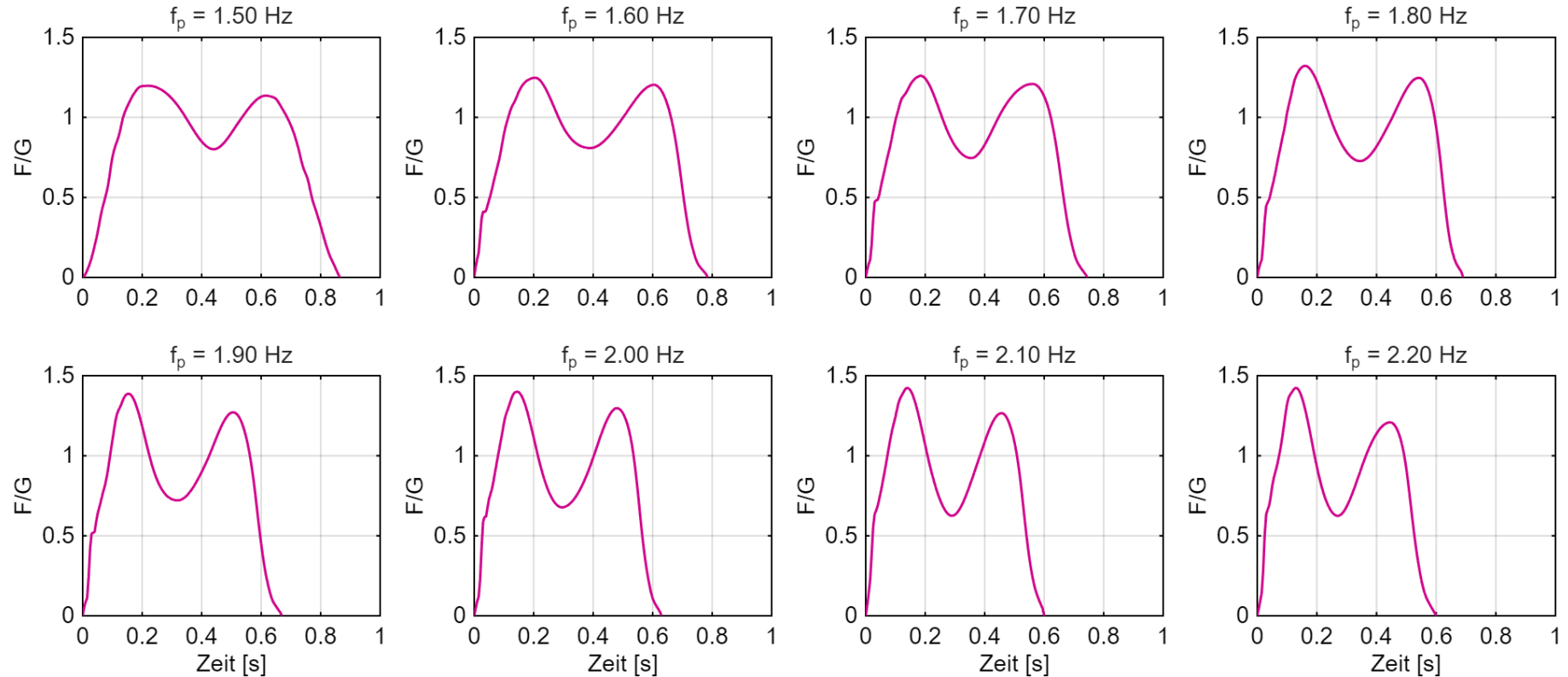


- **Wildwuchs an Koeffizienten⁴**
- **Einflussfaktoren:**
 - Variation der BKK zwischen Personen (interpersonal)
 - Variation der BKK bei einer Person (intrapersonal)
 - Variation BKK linker/rechter Fuss
 - Variation Schrittfrequenz f_p
 - Messverfahren und Auswertung

Gemessene BKK (Laufband)¹⁰

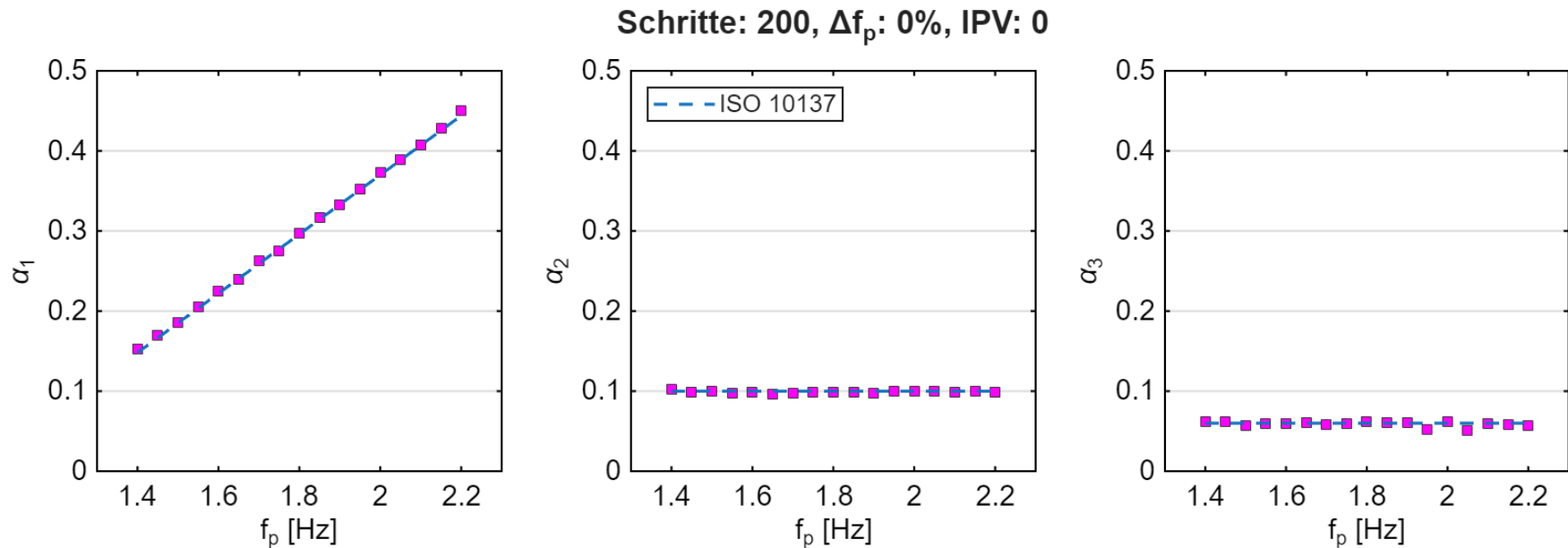


Synthetische BKK nach ISO 10137

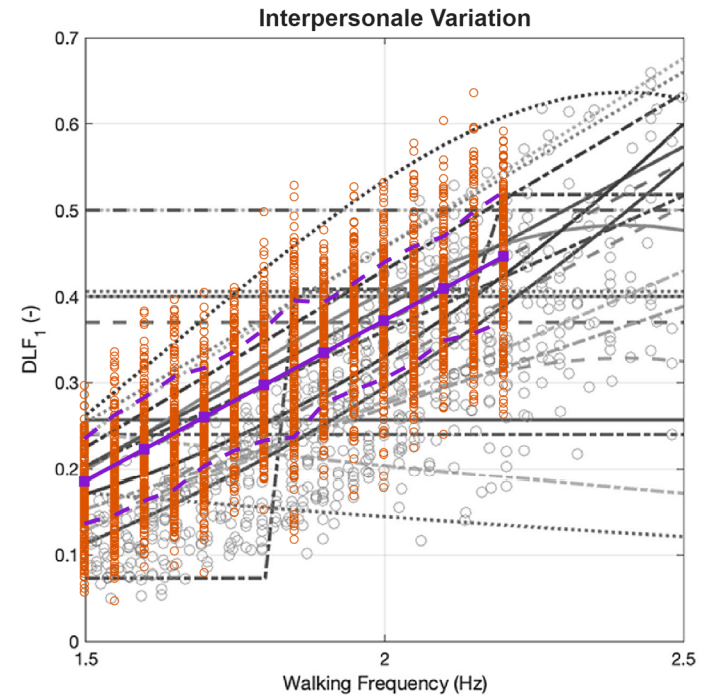
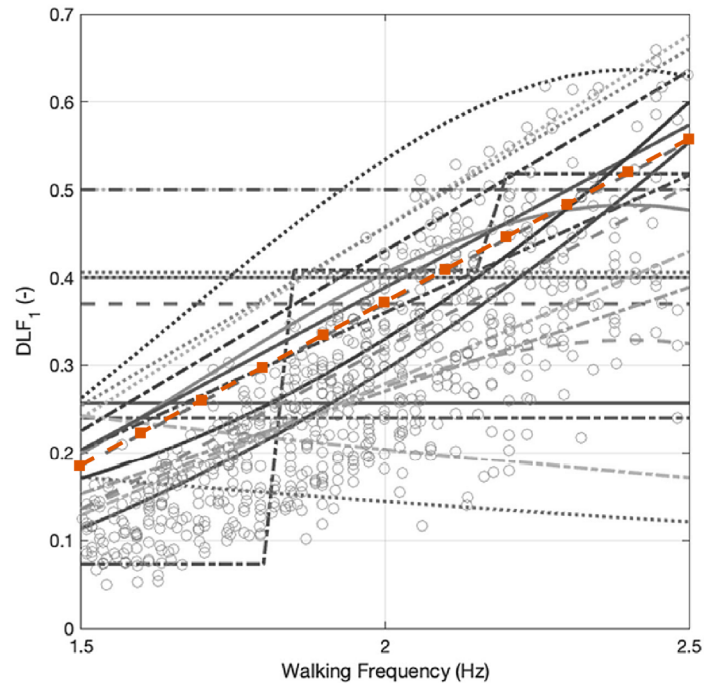


Perfekt periodisch - Fourierkoeffizienten α_1 bis α_3

- Mittelwert stimmt mit Zielwert ISO 10137 gut überein
- Bei höheren Harmonischen ($i > 3$) nehmen Abweichungen zu



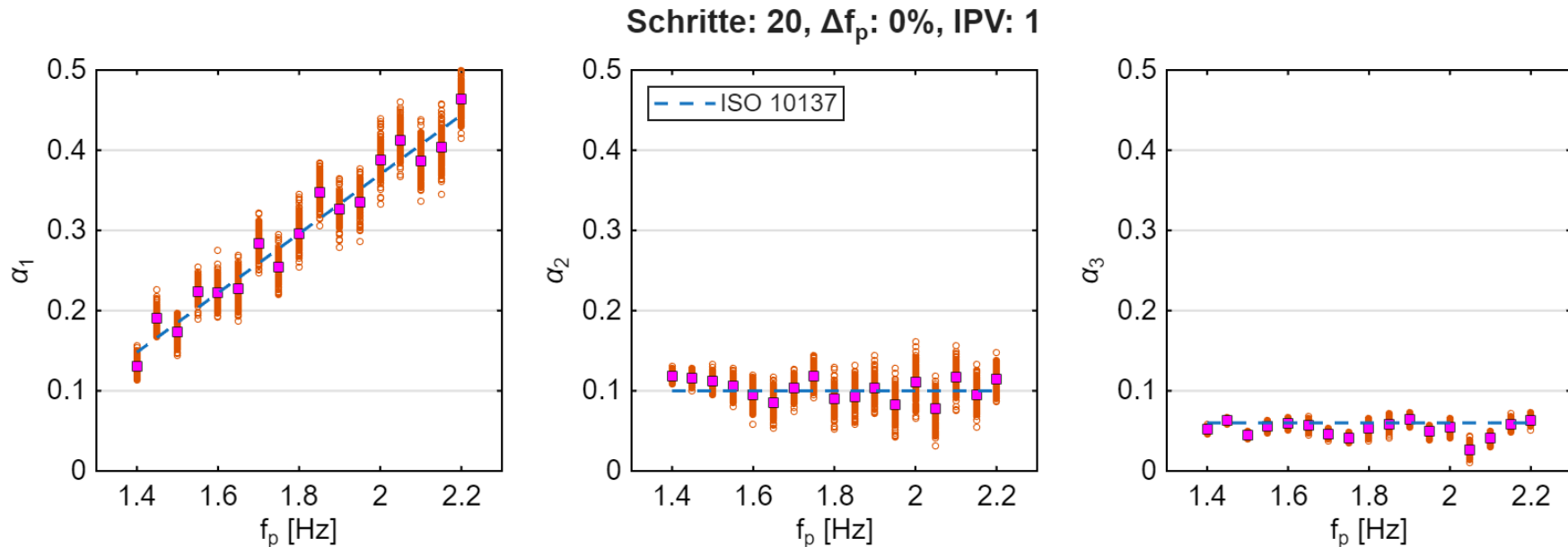
Fourierkoeffizient 1. Harmonische BKK ISO 10137



Perfekt periodisch & intrapersonale Variation

Fourierkoeffizienten α_1 bis α_3

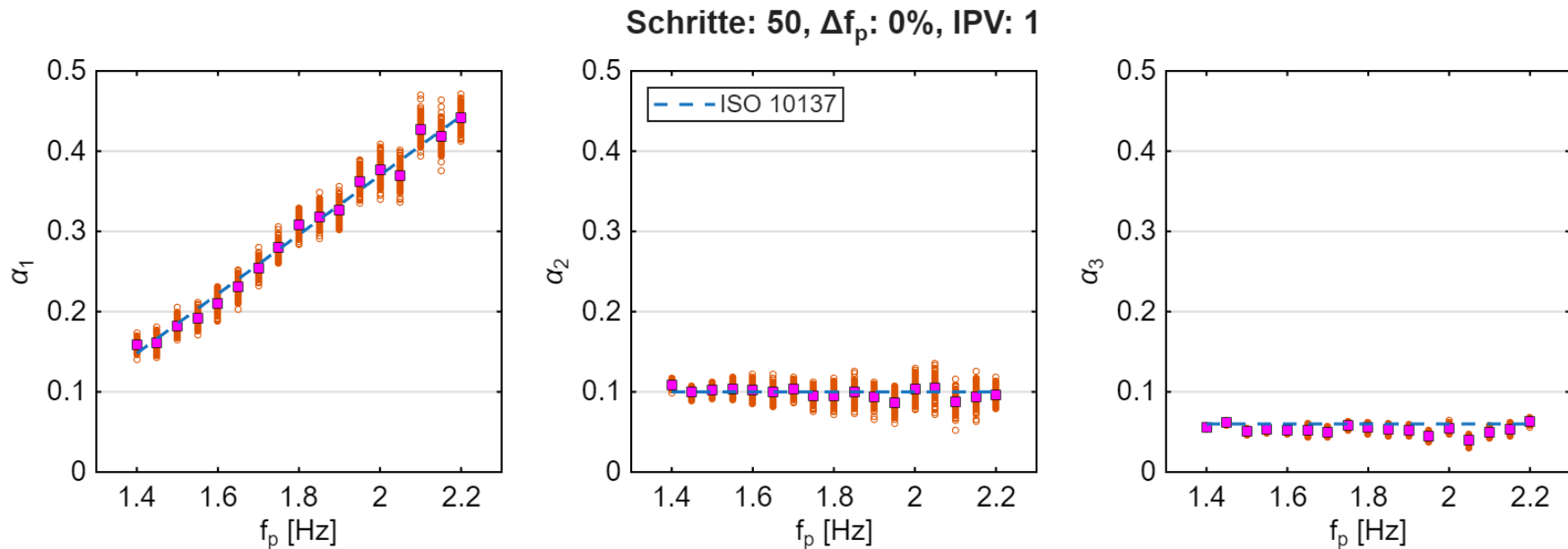
- Mittelwert konvergiert gegen Zielwert mit zunehmender Anzahl Schritte
- Streuung um Mittelwert nimmt ab mit zunehmender Anzahl Schritte



Perfekt periodisch & intrapersonale Variation

Fourierkoeffizienten α_1 bis α_3

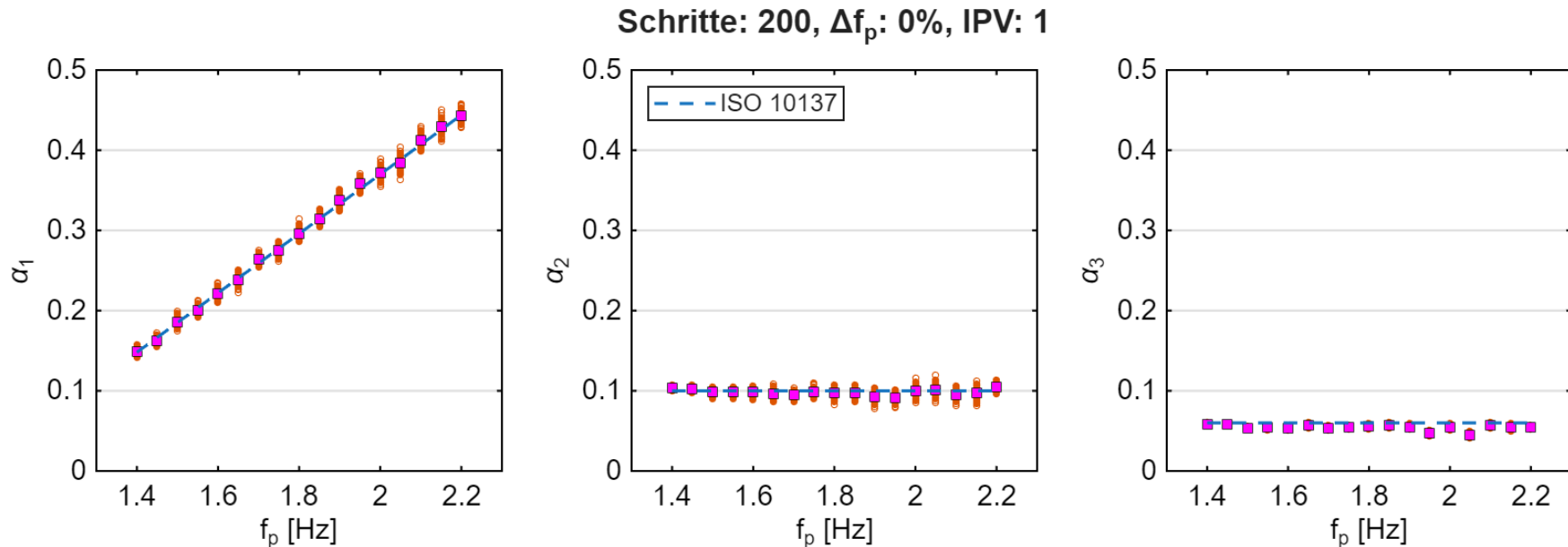
- Mittelwert konvergiert gegen Zielwert mit zunehmender Anzahl Schritte
- Streuung um Mittelwert nimmt ab mit zunehmender Anzahl Schritte



Perfekt periodisch & intrapersonale Variation

Fourierkoeffizienten α_1 bis α_3

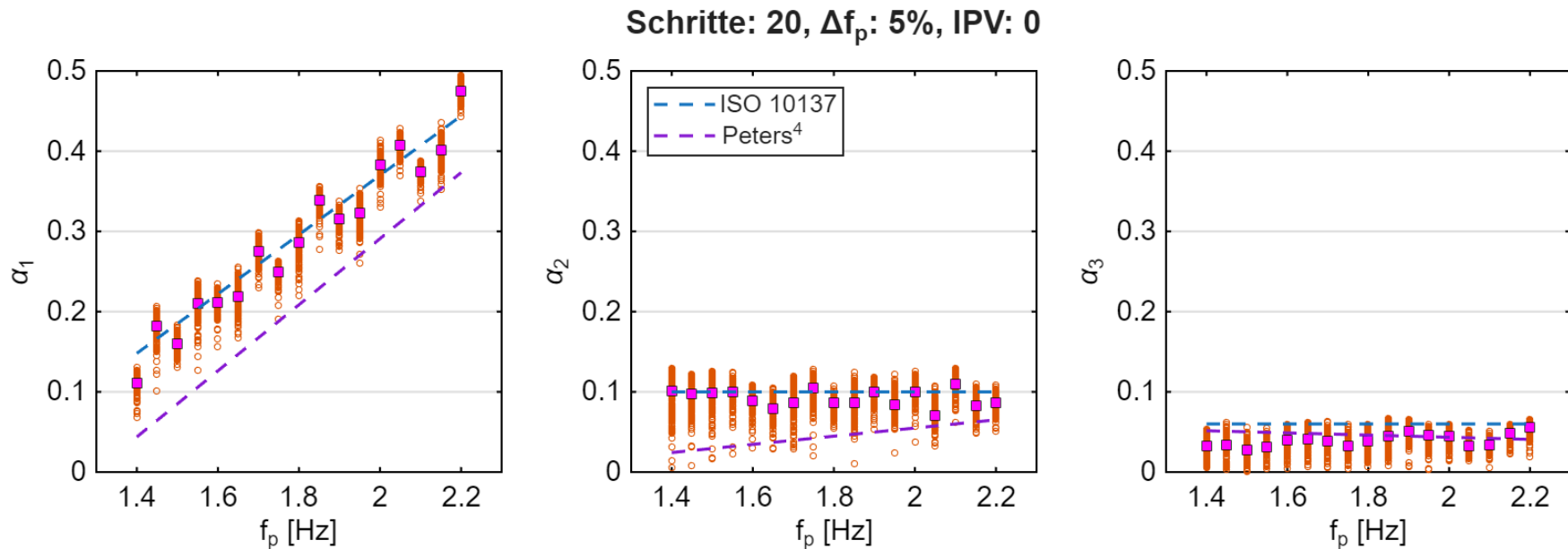
- Mittelwert konvergiert gegen Zielwert mit zunehmender Anzahl Schritte
- Streuung um Mittelwert nimmt ab mit zunehmender Anzahl Schritte



Imperfekt periodisch (Δf_p ist 5% von f_p)

Fourierkoeffizienten α_1 bis α_3

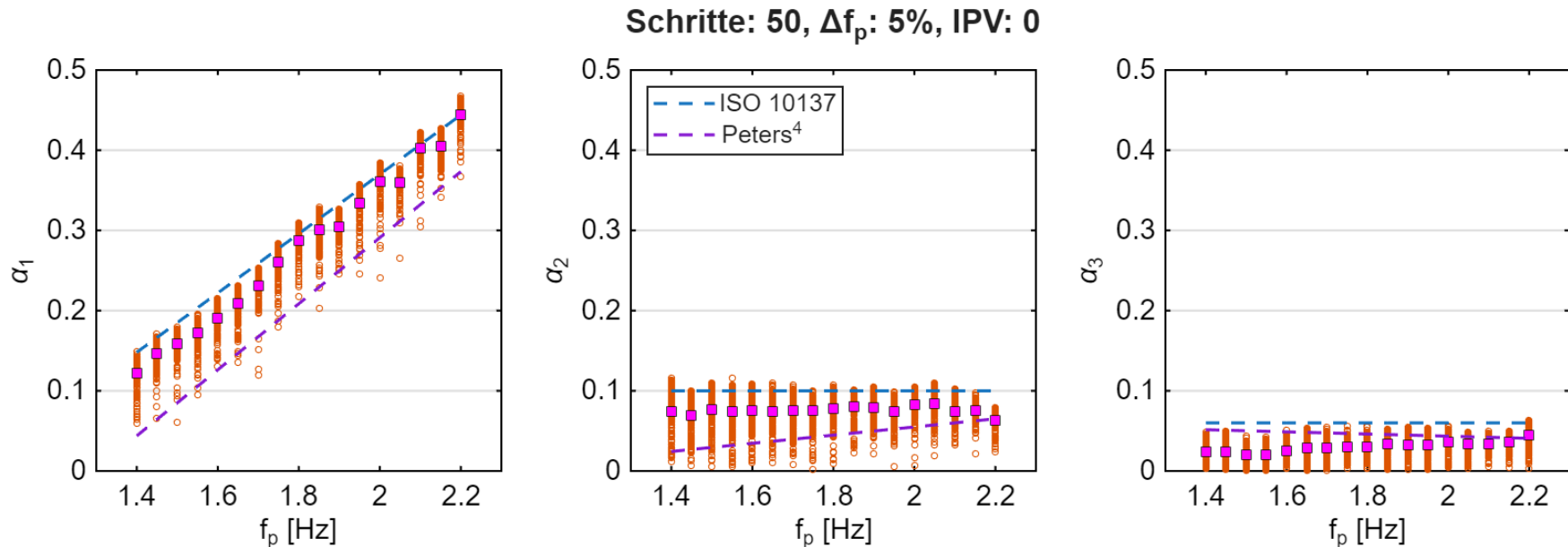
- Mittelwert nimmt ab mit zunehmender Anzahl Schritte
- Streuung nimmt zu mit zunehmender Anzahl Schritte



Imperfekt periodisch (Δf_p ist 5% von f_p)

Fourierkoeffizienten α_1 bis α_3

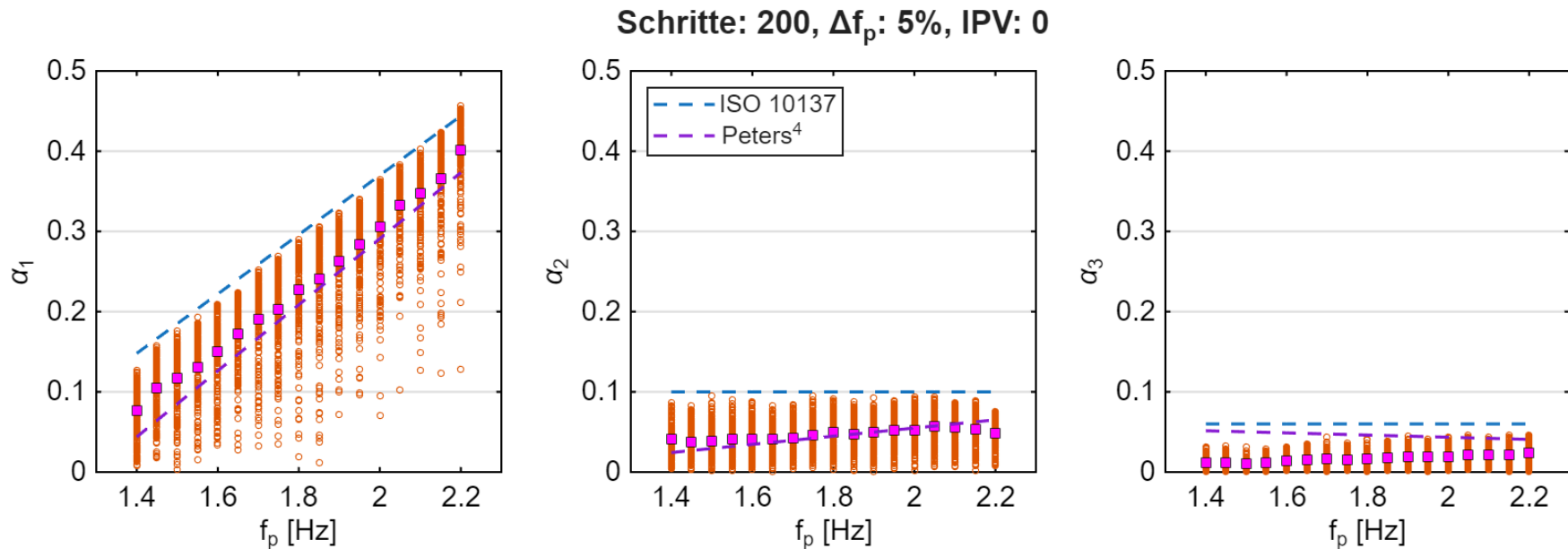
- Mittelwert nimmt ab mit zunehmender Anzahl Schritte
- Streuung nimmt zu mit zunehmender Anzahl Schritte



Imperfekt periodisch (Δf_p ist 5% von f_p)

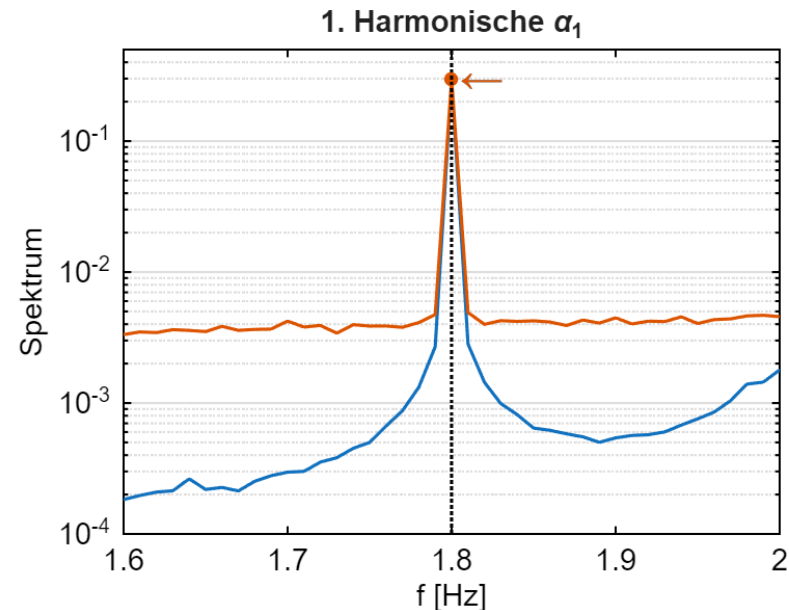
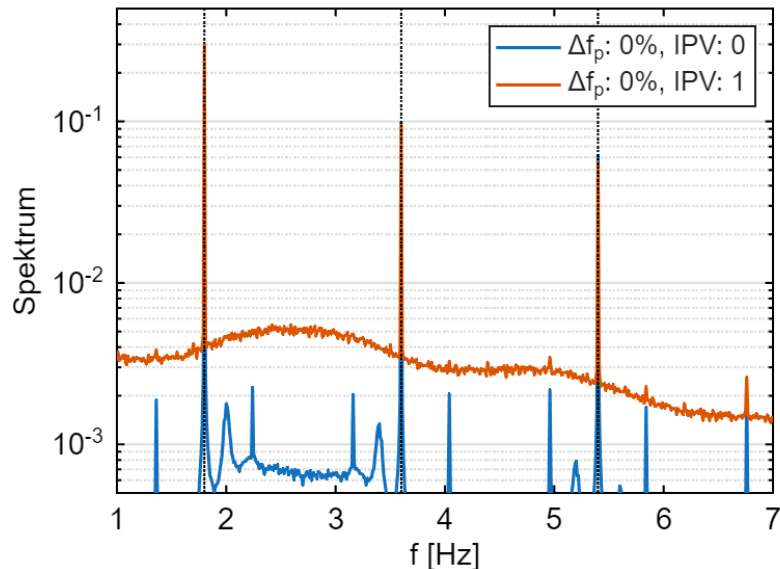
Fourierkoeffizienten α_1 bis α_3

- Mittelwert nimmt ab mit zunehmender Anzahl Schritte
- Streuung nimmt zu mit zunehmender Anzahl Schritte



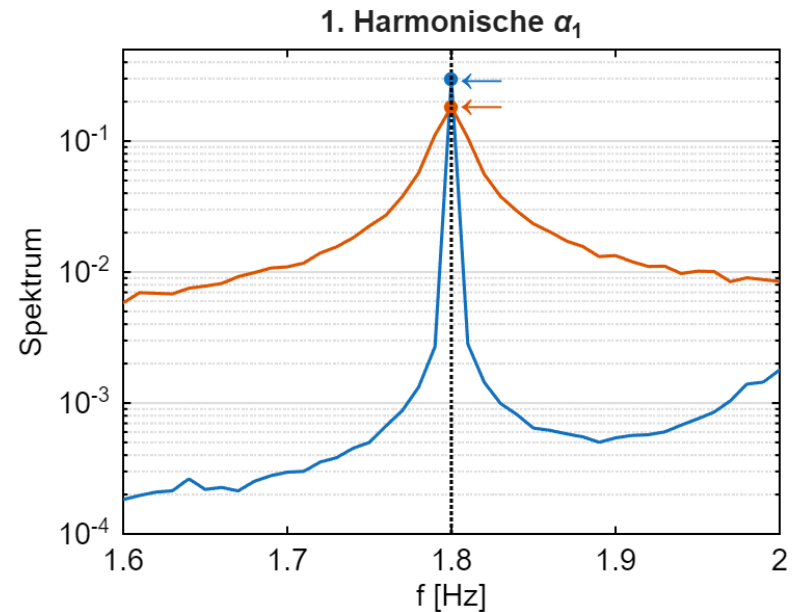
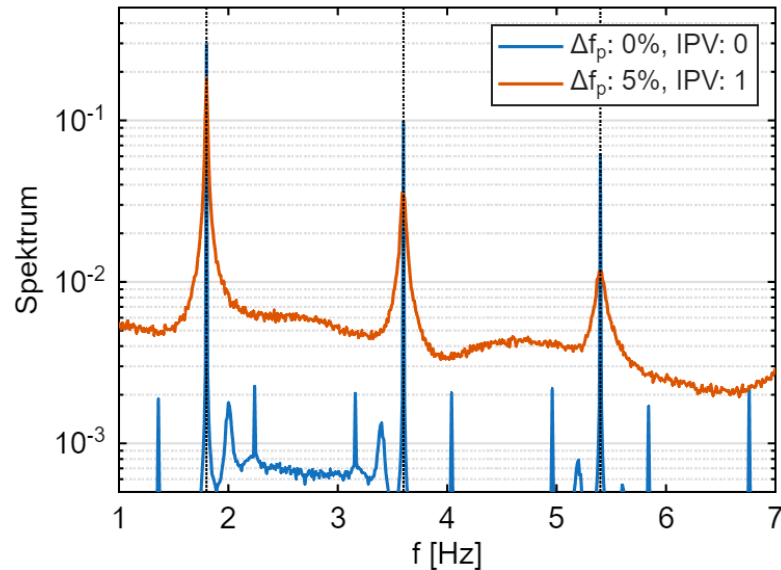
Mittelwert Frequenzspektrum ($f_p = 1.8 \text{ Hz}$)

- Perfekt periodisch: Spektrum praktisch nur an den Harmonischen der Schrittfrequenz ungleich null
- Intrapersonale Variation erhöht «Rauschpegel» zwischen den Harmonischen

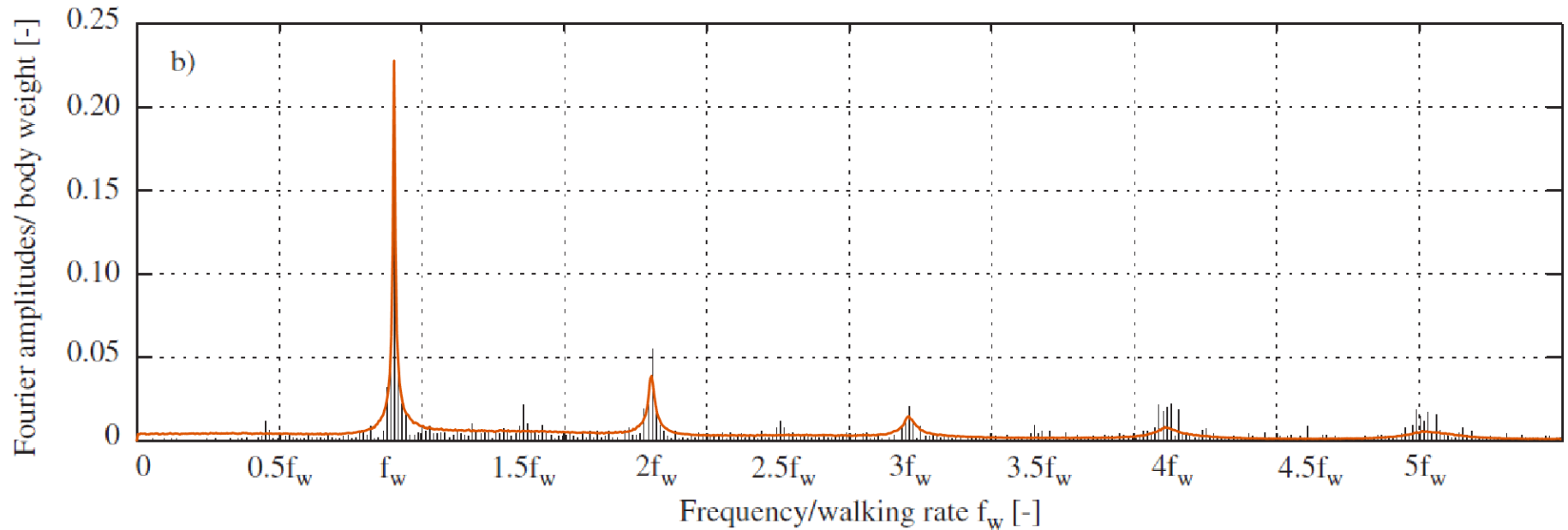


Mittelwert Frequenzspektrum ($f_p = 1.8 \text{ Hz}$)

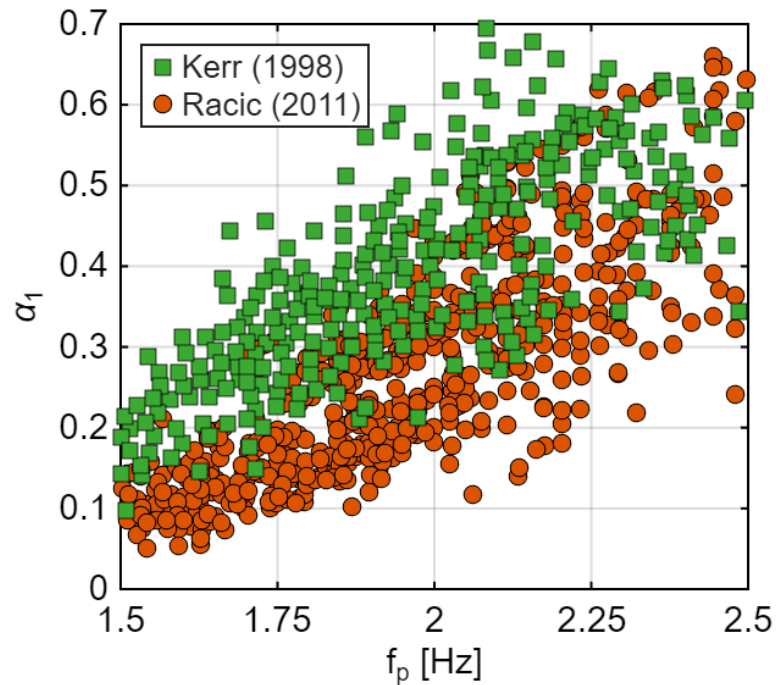
- Imperfekt periodisch: Variation Schrittfrequenz verbreitert Spektrum und reduziert Spitze der Harmonischen



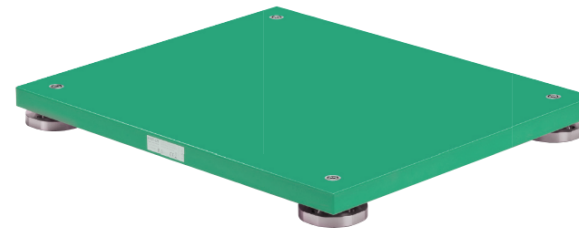
Vergleich Spektrum gemessene BKK¹⁰



Konsequenz für Messverfahren



Kraftmessplatte



Instrumentierter
Laufband



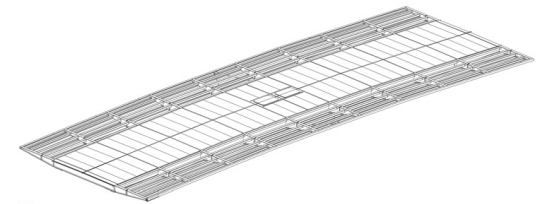
Auswirkungen auf Antwort Fussgängerbrücke

- **Brücke Charleroi⁵**

- Spannweite: 38.25 m
- Eigenfrequenz (1. Biege-Mode): 1.66 Hz
- Modale Masse: 130 t
- Modale Dämpfung: 0.41%
- Versuche:
 - 1 Fussgänger
 - Gruppe mit 8 Fussgängern
 - Gruppe mit 18 Fussgängern
 - jeweils mit Schrittfrequenz = Eigenfrequenz und mit freier Schrittfrequenz



(a)



(b)

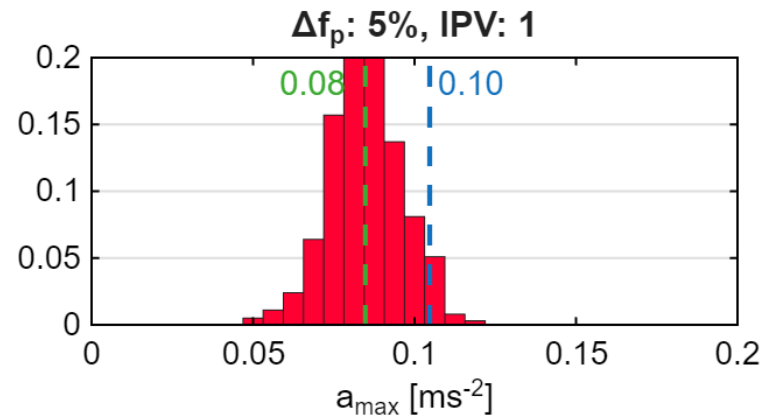
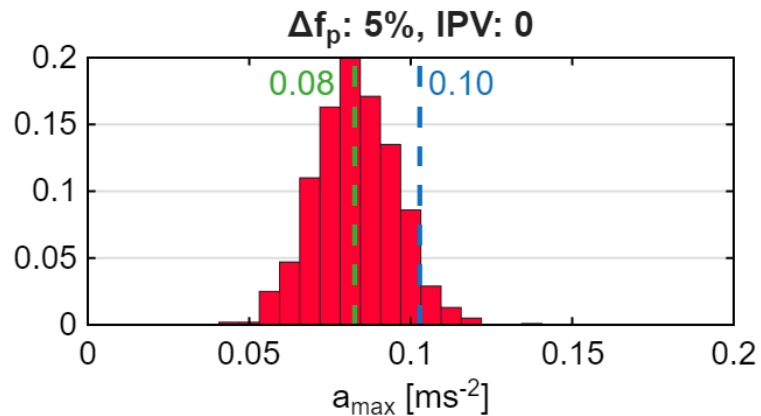
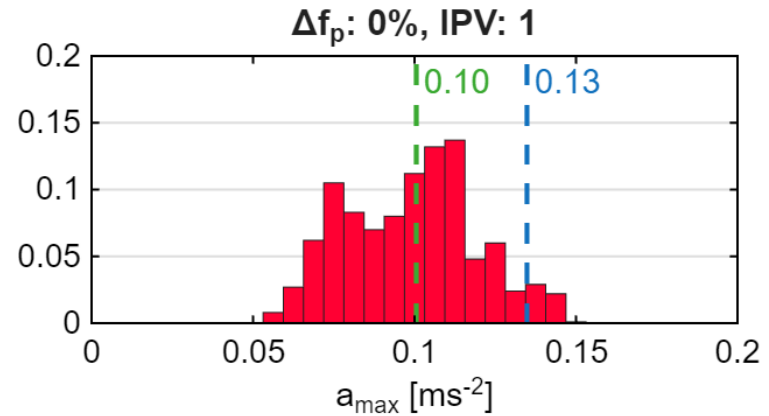
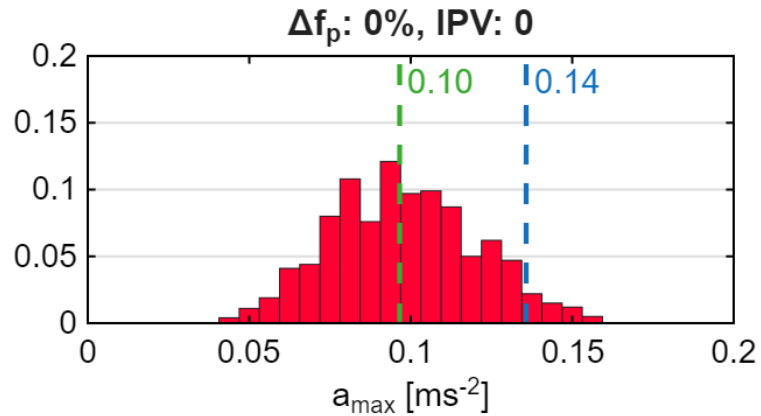


(c)

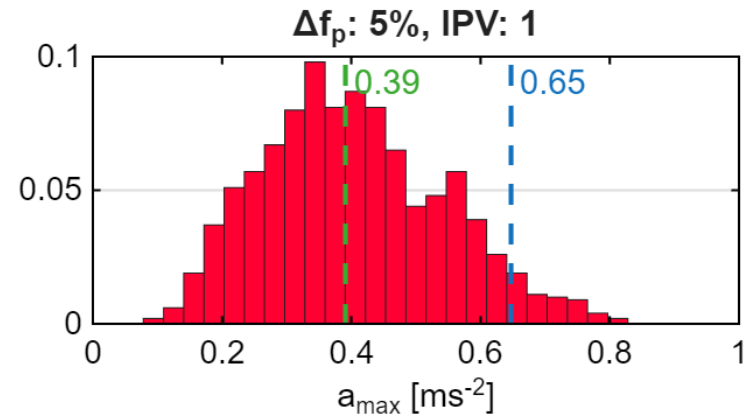
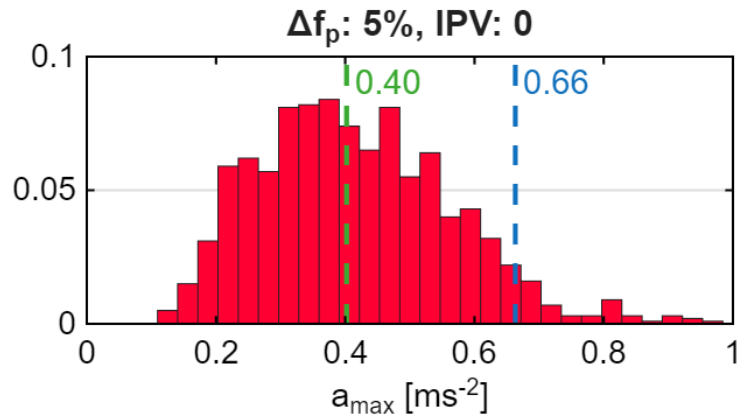
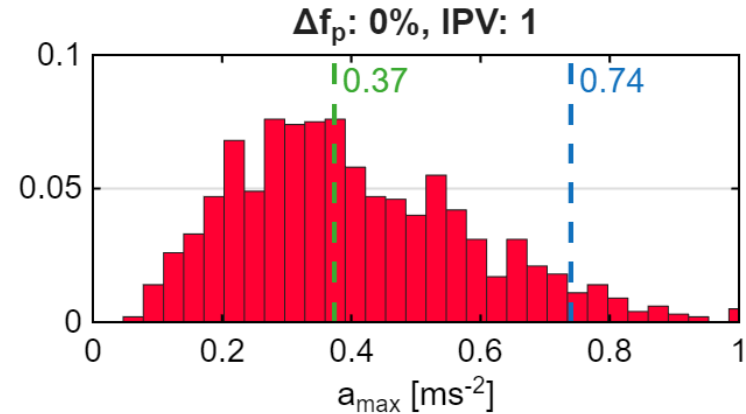
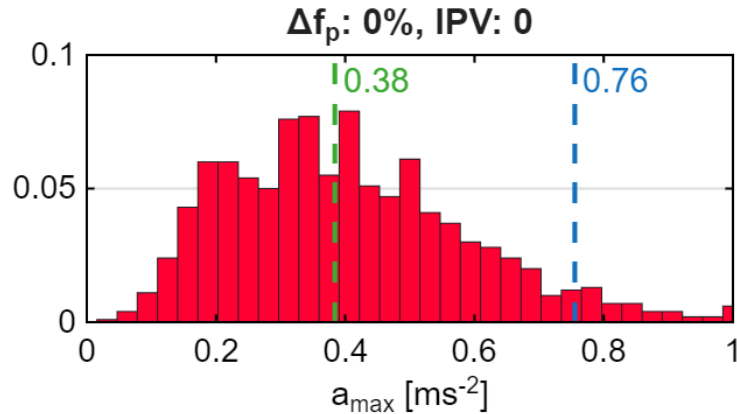
Simulationsmodell

- Einmassenschwinger (Zerlegung in Modalformen)
- Generierung von 1000 Einwirkungen
 - BKK-Modell ISO 10137
 - Masse Fussgänger: 75 kg
 - Geschwindigkeit Fussgänger: 4 km/h
- Ausführung 1000 Simulationen
- Empirische Verteilung a_{\max} aus 1000 Simulationen
- Bemessungswert ist 95%-Quantile der empirischen Verteilung a_{\max}

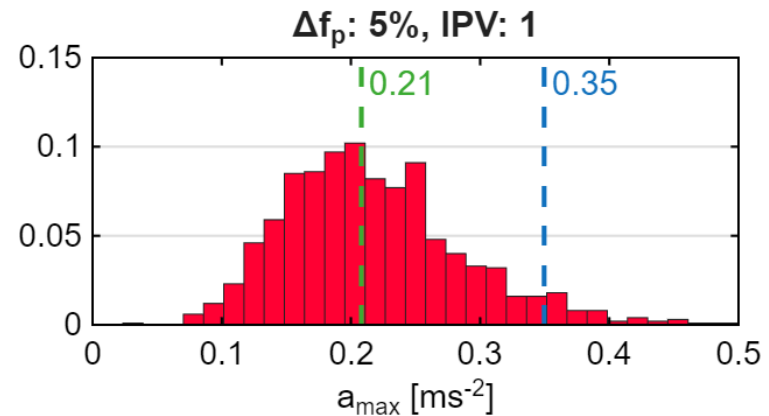
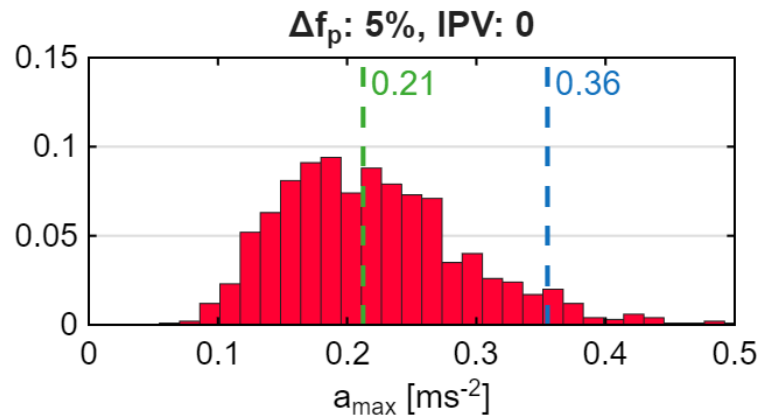
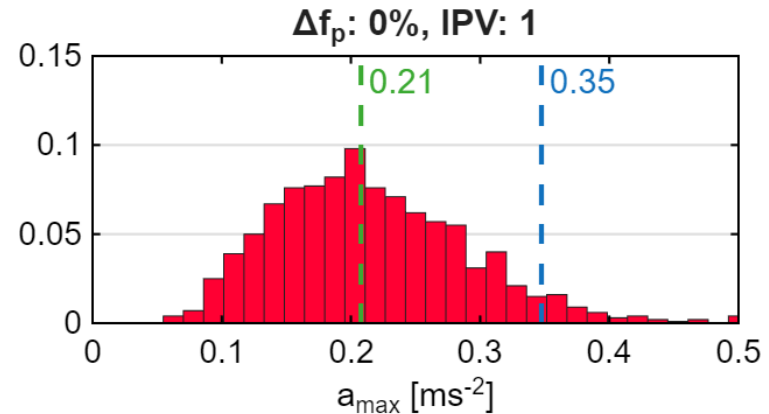
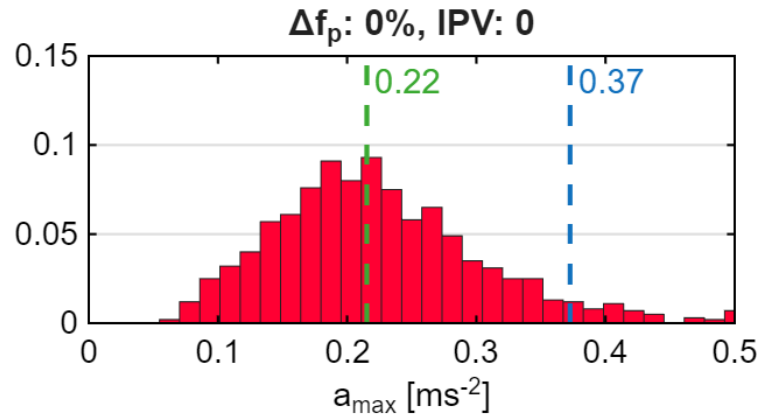
1 Person, Schrittfrequenz f_p = Eigenfrequenz f_1



18 Personen, Schrittfrequenz f_p = Eigenfrequenz f_1



18 Personen, Schrittfrequenz $f_p = f_1 \pm 0.15$ Hz



Vergleich Messungen/Simulation BKK ISO 10137

- Statistische Charakterisierung der Messwerte unbekannt (Richtwerte)
- Simulation ergibt brauchbare Ergebnisse

Lastfall	Messung	$\Delta f_p = 0$		$\Delta f_p = 5\%$	
		IPV = 0	IPV = 1	IPV = 0	IPV = 1
1 Person, $f_p = f_1$	0.09	0.14	0.13	0.10	0.10
8 Personen, $f_p = f_1$	0.45	0.50	0.49	0.45	0.44
8 Personen, $f_p = 1.85 \pm 0.15$ Hz	0.19	0.19	0.19	0.17	0.18
18 Personen, $f_p = f_1$	0.66	0.76	0.74	0.66	0.65
18 Personen, $f_p = 1.85 \pm 0.15$ Hz	0.29	0.28	0.26	0.26	0.26

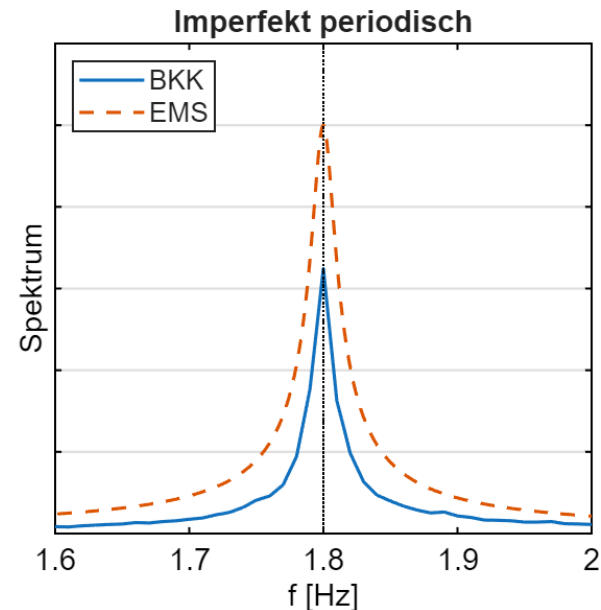
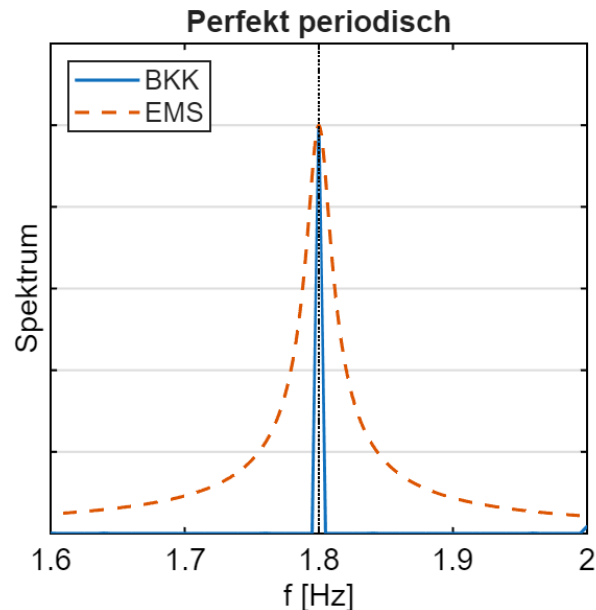
Vergleich Messungen/Simulation/Modell Eurocode

- Versuche mit Fussgängergruppen

Lastfall	Messung	ISO 10137 BKK	ISO 10137 Harm.	Peters ⁴ Harm.	EN 1991-2 Annex G
1 Person, $f_p = f_1$	0.09	0.13	0.09	0.05	0.24
8 Personen, $f_p = f_1$	0.45	0.49	0.43	0.28	0.67
8 Personen, f_p frei	0.19	0.18	0.17	0.12	
18 Personen, $f_p = f_1$	0.66	0.74	0.67	0.46	1.01
18 Personen, f_p frei	0.29	0.26	0.25	0.19	

Einfluss Spektrum BKK auf Antwort EMS

- Perfekt periodisch: Antwort EMS nur durch eine Spektralkomponente (Fourierkoeffizient) der BKK bestimmt
- Imperfekt periodisch: Antwort EMS durch mehrere Spektralkomponenten bestimmt



Vergleich Simulation/Eurocode

- **Fussgängerstrom**

- Lastfälle 50, 100 und 250 Personen: $f_p = f_1 \pm 0.15$ Hz
- Lastfall 500 Personen: $f_p = f_1$
- Masse der Fussgänger nicht berücksichtigt

Lastfall Fussgängerstrom	ISO 10137 BKK	ISO 10137 Harm.	Peters ⁴ Harm.	EN 1991-2 Annex G
50 Personen (0.1 P/m ²)	0.56	0.53	0.33	0.75
100 Personen (0.2 P/m ²)	0.76	0.72	0.46	1.06
250 Personen (0.5 P/m ²)	1.23	1.15	0.73	1.68
500 Personen (1 P/m ²)	3.33	3.28	1.08	6.35

Vergleich Simulation/Verfahren Strobbe⁹

- **Fussgängerstrom**

- Lastfälle 50, 100 und 250 Personen: $f_p = f_1 \pm 0.15$ Hz
- Lastfall 500 Personen: $f_p = f_1$
- Masse der Fussgänger berücksichtigt

Lastfall Fussgängerstrom	ISO 10137 BKK	Strobbe ⁹	EN 1991-2 Annex G
50 Personen (0.1 P/m ²)	0.47	0.64	0.72
100 Personen (0.2 P/m ²)	0.73	0.87	0.98
250 Personen (0.5 P/m ²)	1.00	1.21	1.36
500 Personen (1 P/m ²)	2.50	2.90	4.18

Zusammenfassung Bodenkontaktkräfte

- Dynamische Analyse mit Bodenkontaktkräften ergibt zufriedenstellende Ergebnisse
- In praktisch relevanten Bemessungssituationen sind
 - das Niveau der BKK und die interpersonale Variation relevant
 - die Variation der Schrittfrequenz und intrapersonalen Variation nicht relevant
- Harmonische Lastmodelle sollten die Fourierkoeffizienten der perfekt periodischen BKK benützen
- Sich bewegende harmonische Lastmodelle ergeben etwas kleinere Ergebnisse als die korrespondierenden BKK-Lastmodelle (fehlende interpersonale Variation)
- Zuverlässige Aussagen aus der Forschung zum Mittelwert und der interpersonalen Variation der BKK erforderlich
- Messungen an Fussgängerbrücken immer mit einer genügend grossen Zahl von Personen durchführen (Schätzwert der Streuung durch Variation der BKK)

Zusammenfassung Fussgängerbrücken

- Das Verfahren nach Eurocode ist (konzeptionell) grundsätzlich empfehlenswert
- Resultate nach Eurocode sind:
 - für unbewegliche Fussgängergruppen sehr konservativ
 - für Fussgängerströme bis Dichte 0.5 P/m^2 zufriedenstellend bis moderat konservativ
 - für Fussgängerströme ab Dichte 1 P/m^2 sehr konservativ
- Für Fussgängergruppen immer dynamische Analyse mit sich bewegenden Personen durchführen (gilt auch für Joggergruppen)
- Bei schwingungsempfindlichen Fussgängerbrücken lohnt es sich, für kritische Lastfälle eine dynamische Analyse mit Bodenkontaktkräften durchzuführen

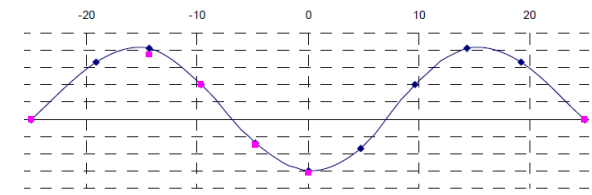
Literaturverzeichnis

- 1) Blanchard, J., Davies, B. L., & Smith, J. W. (1977). Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges. In Proceeding of a Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges at the Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England, May 19, 1977. (No. TRRL Rpt. 275 Proceeding).
- 2) Bachmann, H., & Ammann, W. (1987). Vibrations in structures: induced by man and machines (Vol. 3). IABSE.
- 3) Rainer, J. H., Pernica, G., & Allen, D. E. (1988). Dynamic loading and response of footbridges. Canadian Journal of Civil Engineering, 15(1), 66-71.
- 4) Peters, A. E., et al. (2022). Fourier series approximation of vertical walking force-time history through frequentist and bayesian inference. Vibration 5.4: 883-913.
- 5) Van Nimmen, Katrien, et al. (2016). Numerical and experimental evaluation of the dynamic performance of a footbridge with tuned mass dampers. Journal of Bridge Engineering 21.8
- 6) Sétra. (2006). Evaluation du comportement vibratoire des passerelles piétonnes sous l'action des piétons.
- 7) Heinemeyer, C., Butz, C., Keil, A., Schlaich, M., Goldack, A., Trometer, S., ... & Caetano, E. (2009). Design of lightweight footbridges for human induced vibrations.
- 8) Butz, C. (2007). Beitrag zur Berechnung fußgängerinduzierter Brückenschwingungen (Doctoral dissertation, WILEY-VCH Verlag).
- 9) Strobbe, S., Van den Broeck, P., De Corte, W., & Van Nimmen, K. (2026). Vibration serviceability assessment of footbridges: Extending the application range of current design guides. Engineering Structures, 350, 121814.
- 10) Racic, V., & Brownjohn, J. M. W. (2011). Stochastic model of near-periodic vertical loads due to humans walking. Advanced Engineering Informatics, 25(2), 259-275.

Auswirkungen auf Antwort Fussgängerbrücke

- **Eutinger Waagsteg⁷**

- Spannweite: 50 m
- Eigenfrequenz (3. Biege-Mode): 2.02 Hz
- Modale Masse : 14.95 t
- Modale Dämpfung: 0.71%
- Lastfälle:
 - 1 Fussgänger
 - Gruppe mit 2 Fussgängern ($f_p = 2.02$ Hz und 1.8 Hz)
 - Gruppe mit 4 Fussgängern ($f_p = 2.02$ Hz und 1.8 Hz)



Vergleich Messungen/Simulation/Eurocode

- Fussgängergruppen

Lastfall	Messung	ISO 10137 BKK	ISO 10137 Harm.	Peters ⁴ Harm.	EN 1991-2 Annex G
1 Person, $f_p = f_1$	0.38	0.60	0.53	0.36	1.32
1 Person, $f_p = 1.8 \text{ Hz}$	0.11	0.15	0.12	0.04	
2 Personen, $f_p = f_1$	0.70	1.02	0.93	0.73	1.87
2 Personen, $f_p = 1.8 \text{ Hz}$	0.20	0.22	0.18	0.08	
4 Personen, $f_p = f_1$	1.35	1.70	1.69	1.29	2.64
4 Personen, $f_p = 1.8 \text{ Hz}$	0.38	0.34	0.29	0.15	

Vergleich Simulation/Eurocode

- **Fussgängerstrom**

- Lastfälle 14, 28 und 70 Personen: $f_p = f_1 \pm 0.15$ Hz
- Lastfall 140 Personen: $f_p = f_1$
- Masse der Fussgänger nicht berücksichtigt

Lastfall Fussgängerstrom	ISO 10137 BKK	ISO 10137 Harmon.	EN 1991-1 Annex G
14 Personen (0.1 P/m ²)	3.17	2.97	2.86
28 Personen (0.2 P/m ²)	4.20	4.31	4.04
70 Personen (0.5 P/m ²)	6.70	6.49	6.39
140 Personen (1 P/m ²)	9.69	9.69	18.4

Vergleich Simulation/Verfahren Strobbe

- **Fussgängerstrom**

- Lastfälle 14, 28 und 70 Personen: $f_p = f_1 \pm 0.15$ Hz
- Lastfall 140 Personen: $f_p = f_1$
- Masse der Fussgänger berücksichtigt

Lastfall Fussgängerstrom	ISO 10137 BKK	Strobbe ⁹	EN 1991-1 Annex G
14 Personen (0.1 P/m ²)	2.64	2.88	2.77
28 Personen (0.2 P/m ²)	3.58	3.95	3.79
70 Personen (0.5 P/m ²)	4.47	5.71	5.49
140 Personen (1 P/m ²)	7.31	8.07	13.8