Universelles Resonanzprinzip (UR)

Summenform: vollständige Operationalisierung und dokumentiertes Anwendungsbeispiel

Feld	Angabe
Dokument-ID	UR-SUM-1.0
Version / Datum	1.0 vom 9. November 2026
Status	**Freigegeben**
Freigabe	P. J. Heelson (Autor), Freigabeauftrag vom 9. November 2026
Gegenstand	Rechenverfahren der gewichteten Summenform R_Summe = α · Overlap + β · PLV + γ · Stab
Herkunft der Formel	UR-TVK-Complete-Documentation vom 20. Oktober 2025, Kap. 1.1 (Python-Resonanz-Kohärenzmetrik)
Bezug zum Modellkanon	Kanonische Modellform seit 6. November 2026: Produktform R_UR = F_struc · F_sync · F_stab. Dieses Dokument ändert den Kanon nicht (siehe Abschnitt 1).
Beigefügt	Referenzimplementierung ur_summenform.py (Anhang A), Protokollvorlage (Anhang B)

1 Freigabevermerk und Geltungsbereich

Freigegeben ist: das hier beschriebene Rechenverfahren der Summenform in Version 1.0 – Eingangsdaten, Vorverarbeitung, die drei Komponenten, Gewichte, Signifikanzprüfung, Berichtspflichten – sowie die Referenzimplementierung in Anhang A.

Verhältnis zur Produktform: Nach der Autorentscheidung vom 6. November 2026 ist die Produktform die verbindliche Modellfassung; die Summenform gilt dort als historische Erstfassung. Dieses Dokument macht die Summenform als Rechenverfahren vollständig nachvollziehbar und veröffentlichungsfähig. Wo sich beide Formen in ihrer Aussage unterscheiden, wird das in Abschnitt 5.5 offen ausgewiesen.

2 Zweck

Die Summenform fasst drei bekannte Größen der Signalanalyse zu einem Gesamtwert zusammen: die spektrale Übereinstimmung zweier Signale, ihre Phasenkopplung und die Stabilität dieser Kopplung über die Messdauer. Das Dokument legt fest, wie jede Größe berechnet wird, welche Parameter vor einer Auswertung zu fixieren sind, wie ein Ergebnis gegen Zufall geprüft wird und was im Bericht stehen muss. Damit kann jede Dritte und jeder Dritte eine Auswertung mit denselben Daten nachrechnen.

3 Definition der Summenform

$$\mathrm{R_Summe}(x, y) = \alpha \cdot \mathrm{Overlap}(x, y) + \beta \cdot \mathrm{PLV}(x, y) + \gamma \cdot \mathrm{Stab}(x, y)$$

Festlegungen für Version 1.0:

- Jede Komponente liegt im Intervall [0, 1].
- Die Gewichte sind nicht negativ und summieren sich zu eins: α, β, γ ≥ 0 und α + β + γ = 1. Damit liegt auch R_Summe in [0, 1].
- **Standardgewichte:** α = β = γ = 1/3. Die Erstfassung von 2025 nannte keine Zahlenwerte; die damalige Dokumentation vermerkte ausdrücklich, dass die Gewichte nicht empirisch optimiert waren. Gleichgewichtung ist die neutrale Festlegung, solange keine begründeten Gewichte vorliegen.
- Abweichende Gewichte sind zulässig, wenn sie vor der Auswertung festgelegt, begründet und im Bericht genannt werden. Nachträgliche Anpassung an ein gewünschtes Ergebnis ist unzulässig.

- **Komponentenpflicht:** R_Summe wird nie allein berichtet, sondern stets zusammen mit Overlap, PLV und Stab.

4 Operationalisierung

4.1 Eingangsdaten und Voraussetzungen

Anforderung	Festlegung
Signale	Zwei reellwertige Zeitreihen x(t) und y(t), z. B. Audiokanäle, Sensor- oder Gerätesignale
Abtastung	Gleiche Abtastrate f_s; andernfalls vorher auf eine gemeinsame Rate umrechnen und dies protokollieren
Synchronität der Aufzeichnung	Gemeinsamer Zeitbezug; zeitlicher Versatz zwischen den Aufnahmen bekannt und dokumentiert
Länge	Gleiche Länge N; empfohlen mindestens 20 Perioden der untersuchten Mittenfrequenz, besser 100 und mehr
Rohdaten	Unbearbeitete Originaldateien werden aufbewahrt; jede Bearbeitung (Schnitt, Filter, Normierung) wird protokolliert
Messintervall	Anfang und Ende vorab festgelegt, nicht nach Sichtung der Ergebnisse gewählt

4.2 Vorverarbeitung

1. Gleichanteil entfernen (Mittelwert abziehen).
2. Für Overlap: Leistungsdichtespektren S_x(ν), S_y(ν) nach Welch über das gesamte Frequenzband, Segmentlänge L (Standard: 4 s), Hann-Fenster, 50 % Überlappung.
3. Für PLV und Stab: Bandpass um das Untersuchungsband [f_u, f_o] (Butterworth 4. Ordnung, vorwärts-rückwärts gefiltert, damit keine Phasenverschiebung entsteht).
4. Momentanphasen ϕ_x(t), ϕ_y(t) über die Hilbert-Transformation der gefilterten Signale; Phasendifferenz Δϕ(t) = ϕ_x(t) − ϕ_y(t).
5. Randbereich: Bei kurzen Signalen die ersten und letzten 0,5 s wegen Filtereinschwingens verwerfen und dies protokollieren (im Beispiel nicht erforderlich, da 20 s Dauer).

4.3 Komponente 1: Overlap (strukturelle Übereinstimmung)

$$\mathrm{Overlap} = \Sigma\, S_x(\nu) \cdot S_y(\nu) \,/\, \sqrt{(\,\Sigma\, S_x(\nu)^2 \cdot \Sigma\, S_y(\nu)^2\,)}$$

Das normierte Skalarprodukt der beiden Leistungsspektren. Da Leistungsdichten nicht negativ sind, liegt der Wert in [0, 1]. 1 bedeutet: gleiche spektrale Form (unabhängig von der Lautstärke); 0: keine gemeinsame Frequenzlage. Overlap sagt nichts über zeitliche Abstimmung aus – zwei unabhängige Signale gleicher Frequenz erreichen Werte nahe 1.

4.4 Komponente 2: PLV (synchrones Schwingen)

$$\mathrm{PLV} = |\,(1/N) \cdot \Sigma\, \exp(\,i \cdot \Delta\varphi(t)\,)\,|$$

Der Phase-Locking-Value misst, ob die Phasendifferenz über die Zeit konstant bleibt. Er liegt von Natur aus in [0, 1]. Eine feste Verschiebung – auch Gegenphase – ergibt einen hohen Wert; gleichmäßig verteilte Phasendifferenzen ergeben Werte nahe 0. Wegen endlicher Länge und Bandbegrenzung liefert auch reines Rauschen einen kleinen positiven Restwert; deshalb ist die Signifikanzprüfung (4.7) verpflichtend.

Festlegung gegenüber 2025: Die damalige Python-Fassung verwendete den Mittelwert von cos Δϕ, der zwischen −1 und 1 liegen kann. Version 1.0 verwendet den Betrag des komplexen Mittelwerts (Standard-PLV).

4.5 Komponente 3: Stab (stabile Kopplung)

$$\text{Stab} = \max(\,0\,;\ 1 - \sigma(\,\sin \Delta\varphi_\text{entf}(t)\,)\,/\,\sigma_\text{ref}\,), \quad \sigma_\text{ref} = 1/\sqrt{2} \approx 0{,}707$$

Δϕ_entf ist die mit Phasen-Unwrapping entfaltete Phasendifferenz (Bezug zur Fassung 2025). σ bezeichnet die Standardabweichung über das Messintervall. σ_ref ist die Standardabweichung von sin Δϕ bei gleichverteilter Phase; Stab = 0 bedeutet daher: so unruhig wie eine zufällige Phasenbeziehung, Stab = 1: vollkommen konstante Kopplung. Die Normierung benötigt keinen frei wählbaren Parameter.

Zusätzliche Diagnosegröße (wird berichtet, geht nicht in R_Summe ein): die mittlere Driftrate der entfalteten Phasendifferenz in rad/s, bestimmt als Steigung einer Ausgleichsgeraden. Eine Drift nahe 0 zeigt, dass keine systematische Frequenzabweichung zwischen den Signalen besteht.

Hinweis: Stab und PLV beruhen beide auf Δϕ und sind daher nicht unabhängig voneinander. Hohe PLV-Werte gehen in der Regel mit hohen Stab-Werten einher. Die Summenform zählt die zeitliche Abstimmung dadurch faktisch doppelt; das ist bei der Wahl der Gewichte zu berücksichtigen.

4.6 Gewichte

Standard α = β = γ = 1/3 (Abschnitt 3). Wird davon abgewichen, wird zusätzlich die Sensitivität berichtet: R_Summe mit Standardgewichten und mit den gewählten Gewichten nebeneinander.

4.7 Signifikanzprüfung gegen Zufall

Ein R_Summe-Wert ist erst interpretierbar, wenn er mit dem verglichen wird, was ohne Kopplung zu erwarten wäre. Version 1.0 verwendet zeitversetzte Surrogate:

1. y wird um eine zufällige Verschiebung k zirkulär rotiert, mindestens 1 s und höchstens N − 1 s. Das Spektrum bleibt dabei erhalten, eine bestehende zeitliche Kopplung wird zerstört.
2. Für jedes Surrogat werden PLV, Stab und R_Summe neu berechnet (Overlap ändert sich durch Rotation nicht).
3. M = 1000 Surrogate, fester Zufallsstartwert (Seed) zur Reproduzierbarkeit.
4. p = (Anzahl Surrogate mit R_Summe ≥ beobachtetem Wert + 1) / (M + 1).
5. Signifikanzniveau vorab festlegen; Standard 0,01 (entspricht dem Prüfdesign der Dokumentation von 2025). Bei mehreren Signalpaaren wird für Mehrfachtests korrigiert (z. B. Bonferroni oder Holm) und dies berichtet.

Grenze des Verfahrens: Bei streng periodischen Signalen ohne jede natürliche Phasenschwankung zerstört eine Zeitverschiebung die Kopplung nicht, weil zwei konstante Sinusschwingungen gleicher Frequenz bei jeder Verschiebung phasenstarr bleiben. In diesem Fall ist die Prüfung nicht aussagekräftig; dann sind unabhängige Wiederholungsaufnahmen als Vergleich erforderlich.

4.8 Vorab festzulegende Parameter

Parameter	Symbol	Standard V1.0	Im Beispiel
Abtastrate	f_s	aus Daten	250 Hz
Untersuchungsband	[f_u, f_o]	vorab begründet	8–12 Hz
Welch-Segmentlänge	L	4 s	1000 Werte = 4 s
Filterordnung	–	4 (Butterworth)	4
Gewichte	α, β, γ	je 1/3	je 1/3
Surrogate	M	1000	1000
Mindestverschiebung	k_min	1 s	1 s
Signifikanzniveau	–	0,01	0,01
Zufallsstartwert	Seed	dokumentieren	20261109

4.9 Berichtspflichten

Ein Ergebnisbericht enthält mindestens: Datei- und Sitzungskennung beider Signale, Messintervall, alle Parameter aus 4.8, die drei Komponenten, R_Summe, die Driftrate, den p-Wert mit Anzahl der Surrogate, Softwareversion und Prüfsumme der Rohdaten. Die Protokollvorlage in Anhang B bildet diese Felder ab.

4.10 Interpretationsregeln

- **Keine festen Bedeutungsstufen.** Version 1.0 legt keine Grenzwerte wie „hohe Resonanz ab 0,7“ fest. Maßgeblich ist der Vergleich mit den Surrogaten und mit Kontrollaufnahmen.
- **Komponenten vor Gesamtwert.** Ein mittlerer R_Summe-Wert kann aus drei mittleren Komponenten oder aus einer sehr hohen und zwei sehr niedrigen entstehen. Die Deutung richtet sich nach dem Muster der Komponenten.
- **Kompensation beachten.** In der Summe kann ein hoher Overlap eine fehlende Phasenkopplung teilweise ausgleichen. Ein R_Summe-Wert ohne signifikante Phasenkopplung ist deshalb nicht als Kopplung zu bezeichnen.
- **Kohärenz ist nicht Herkunft.** Ein signifikantes Ergebnis zeigt eine statistische Phasenbeziehung zweier Signale. Es sagt nichts über Ursache, Inhalt oder Quelle.

5 Anwendungsbeispiel

Kennzeichnung: Das Beispiel verwendet synthetisch erzeugte Testsignale mit festem Zufallsstartwert. Es sind **keine Messdaten** aus OviBox-, EVP- oder sonstigen Aufnahmen. Das Beispiel dient allein dazu, den Rechenweg vorzuführen und mit Anhang A exakt nachrechnen zu lassen.

5.1 Aufbau

Dauer 20 s, Abtastrate 250 Hz (N = 5000 Werte). Referenzsignal x: 10-Hz-Schwingung mit natürlicher, langsamer Phasendrift (Zufallsweg, Schrittweite 0,05 rad) und additivem Rauschen (Standardabweichung 0,5). Drei Vergleichssignale:

Fall	Konstruktion von y	Erwartung
A – gekoppelt	Folgt der Phase von x mit fester Verschiebung 0,8 rad, kleinem Phasenjitter (0,25 rad) und eigenem Rauschen	Alle drei Komponenten hoch; signifikant
B – gleiche Frequenz, unabhängige Phase	10 Hz mit eigener, von x unabhängiger Phasendrift; eigenes Rauschen	Overlap hoch, PLV und Stab niedrig; nicht signifikant
C – anderes Band	25 Hz mit eigener Phasendrift; eigenes Rauschen	Alle Komponenten niedrig

5.2 Rechenweg am Fall A

1. Welch-Spektren von x und y_A: Beide haben ihr Maximum bei 10 Hz und denselben Rauschboden → Overlap = 1,000 (gerundet).
2. Bandpass 8–12 Hz, Hilbert-Phasen, $\Delta\phi(t)$ schwankt eng um −0,8 rad (Abbildung 1, links).
3. PLV = |Mittelwert von $\exp(i\Delta\phi)$| = 0,991.
4. $\sigma(\sin \Delta\phi_{entf}) \approx 0{,}096$ → Stab = 1 − 0,096/0,707 = 0,864.
5. R_Summe = (1,000 + 0,991 + 0,864)/3 = 0,952.
6. 1000 zeitversetzte Surrogate: Keines erreicht 0,952 → p = (0 + 1)/1001 ≈ 0,001 < 0,01.
7. Driftrate ≈ 0,000 rad/s: keine systematische Frequenzabweichung.

5.3 Ergebnisse

Fall	Overlap	PLV	Stab	R_Summe	p (M = 1000)	Drift [rad/s]	Bewertung
A	1,000	0,991	0,864	0,952	0,001	0,000	signifikante Phasenkopplung
B	0,984	0,384	0,042	0,470	0,343	0,296	keine Kopplung nachweisbar
C	0,009	0,133	0,004	0,049	0,314	1,103	keine Kopplung

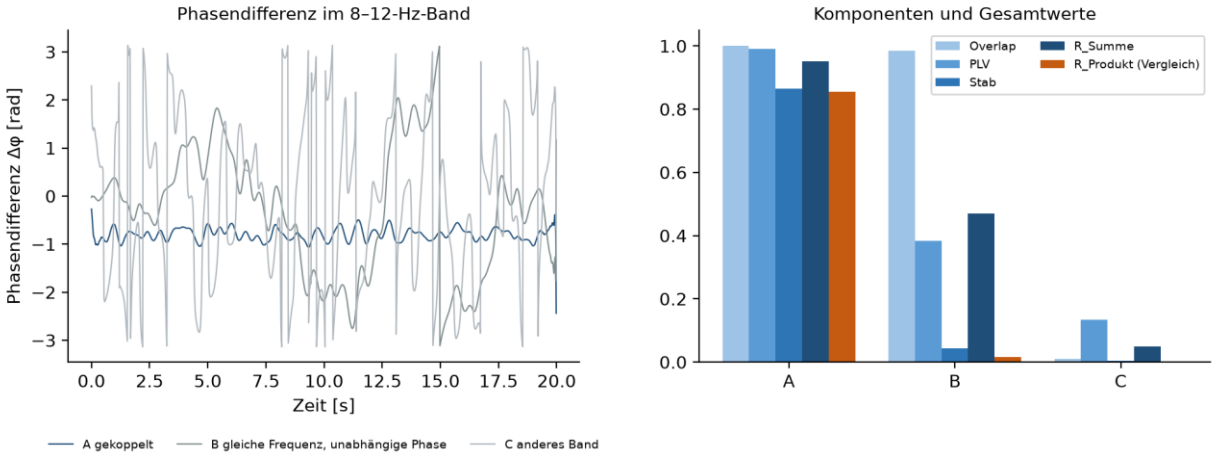


Abbildung 1: Links die Phasendifferenz Δϕ im 8–12-Hz-Band; Fall A bleibt eng bei einer festen Verschiebung, B und C laufen frei. Rechts die drei Komponenten, R_Summe und zum Vergleich das Produkt.

5.4 Auswertung

- **Fall A** erfüllt alle Komponenten und ist gegen Zufall abgesichert. Nach den Regeln aus 4.10 darf von einer signifikanten Phasenkopplung der beiden Testsignale gesprochen werden – mehr nicht.
- **Fall B** zeigt die zentrale Eigenschaft der Summenform: Der hohe Overlap hebt R_Summe auf 0,470, obwohl keine stabile Kopplung besteht (Stab 0,042) und das Ergebnis nicht signifikant ist (p = 0,343). Ohne Komponentenpflicht und Surrogatprüfung könnte dieser Wert als „mittlere Resonanz“ missverstanden werden.
- **Fall C** zeigt den Restwert des PLV bei Rauschen: 0,133 ist kein Kopplungshinweis, sondern das Grundniveau eines bandbegrenzten Signals von 20 s Länge; die Surrogatprüfung bestätigt das.

5.5 Gewichtssensitivität und Vergleich mit der Produktform

Gewichte α / β / γ	R_Summe Fall B
1/3 / 1/3 / 1/3 (Standard)	0,470
0,50 / 0,25 / 0,25	0,599
0,25 / 0,50 / 0,25	0,449
0,25 / 0,25 / 0,50	0,363

Je stärker der Overlap gewichtet wird, desto höher fällt R_Summe für das ungekoppelte Signalpaar B aus. Das ist der Grund, warum Gewichte vorab festgelegt werden müssen.

Zum Vergleich ergibt die kanonische Produktform für dieselben Werte: Fall A 0,856, Fall B 0,016, Fall C 0,000. Beide Formen ordnen die Fälle gleich (A vor B vor C). Sie unterscheiden sich darin, wie deutlich sie den Fall B als ungekoppelt ausweisen: Die Summe kompensiert, das Produkt nicht. Für das Modell, nach dem jede der drei Bedingungen notwendig ist, bleibt deshalb die Produktform maßgeblich; die Summenform ist ein zulässiges, transparentes Kohärenzmaß, wenn Komponenten und Signifikanz mitberichtet werden.

6 Grenzen

- Alle drei Komponenten sind etablierte Verfahren der Signalanalyse; ihre Kombination ist eine Modellfestlegung, kein neues physikalisches Gesetz.
- PLV und Stab sind voneinander abhängig (4.5).
- Die Summenform kompensiert fehlende Bedingungen (5.4, 5.5).
- Das Verfahren misst Beziehungen zwischen zwei Zeitreihen im Diesseits.
- Für reale Aufnahmen sind zusätzlich Kontrollaufnahmen ohne Versuchsbedingung erforderlich; Surrogate ersetzen sie nicht.

7 Fassungsgeschichte

Fassung	Datum	Inhalt
Python-Resonanz-Kohärenzmetrik	Oktober 2025	R_gesamt = α · Overlap + β · PhaseLockVal + γ · Stab; Gewichte ohne Zahlenwerte; Stab „auf Basis von Phase-Unwrapping“
Kanontext Produktform	6. November 2026	Produktform verbindlich für das Modell; Summenform historische Erstfassung
UR-SUM-1.0	9. November 2026	Summenform vollständig operationalisiert: Standard-PLV statt Mittelwert von cos Δϕ; Stab normiert über σ_ref = 1/√2; Gewichte je 1/3 mit Summe 1; Surrogatprüfung; Berichtspflichten; Anwendungsbeispiel. **Freigegeben.**

Anhang A Referenzimplementierung (Python 3, NumPy, SciPy)

Aufruf: python3 ur_summenform.py. Die Ausgabe reproduziert Tabelle 5.3 exakt.

```
"""UR-Summenform V1.0 – Referenzimplementierung (P. J. Heelson, 09.11.2026)."""
import numpy as np
from scipy.signal import butter, filtfilt, hilbert, welch


PARAM = dict(fs=250.0, band=(8.0, 12.0), welch_nperseg=1000, order=4,
             alpha=1/3, beta=1/3, gamma=1/3, n_surr=1000, min_shift_s=1.0, seed=20261109)
SIGMA_REF = 1/np.sqrt(2)   # Standardabweichung von sin(Δϕ) bei gleichverteilter Phase


def bandpass(s, fs, band, order):
    b, a = butter(order, [band[0]/(fs/2), band[1]/(fs/2)], btype="band")
    return filtfilt(b, a, s)


def overlap(x, y, p):
    f, Sx = welch(x, fs=p["fs"], nperseg=p["welch_nperseg"])
    _, Sy = welch(y, fs=p["fs"], nperseg=p["welch_nperseg"])
    df = f[1]-f[0]
    return float(np.sum(Sx*Sy)*df / np.sqrt(np.sum(Sx**2)*df*np.sum(Sy**2)*df))


def phases(x, y, p):
    px = np.angle(hilbert(bandpass(x, p["fs"], p["band"], p["order"])))
    py = np.angle(hilbert(bandpass(y, p["fs"], p["band"], p["order"])))
    return px, py


def components(x, y, p, ov=None):
    px, py = phases(x, y, p)
    d = px - py
    plv = float(np.abs(np.mean(np.exp(1j*d))))
    d_unw = np.unwrap(d)                        # Phasen-Unwrapping (Fassung 2025)
    stab = float(np.clip(1 - np.std(np.sin(d_unw))/SIGMA_REF, 0, 1))
    if ov is None: ov = overlap(x, y, p)
    return ov, plv, stab


def drift_rate(x, y, p):
    """Diagnosegröße: mittlere Driftrate der entfalteten Phasendifferenz in rad/s."""
    px, py = phases(x, y, p)
    d_unw = np.unwrap(px - py)
    t = np.arange(d_unw.size)/p["fs"]
    return float(np.polyfit(t, d_unw, 1)[0])


def r_sum(ov, plv, stab, p):
    return p["alpha"]*ov + p["beta"]*plv + p["gamma"]*stab


def surrogate_p(x, y, p, r_obs, ov):
    rng = np.random.default_rng(p["seed"]+1)
    n = len(y); m = int(p["min_shift_s"]*p["fs"])
    cnt = 0
    for _ in range(p["n_surr"]):
        k = rng.integers(m, n-m)
        _, plv, stab = components(x, np.roll(y, k), p, ov=ov)  # Spektrum bleibt bei Rotation gleich
        cnt += r_sum(ov, plv, stab, p) >= r_obs
    return (cnt+1)/(p["n_surr"]+1)


def make_signals(p, T=20.0):
    """Synthetische Testsignale (keine Messdaten)."""
    rng = np.random.default_rng(p["seed"])
    fs = p["fs"]; t = np.arange(0, T, 1/fs)
    drift_x = np.cumsum(rng.normal(0, 0.05, t.size))          # natürliche Phasendrift von x
    phi_x = 2*np.pi*10*t + drift_x
    x  = np.sin(phi_x) + 0.5*rng.standard_normal(t.size)
    # Fall A: y folgt der Phase von x mit fester Verschiebung und kleinem Jitter
    yA = np.sin(phi_x + 0.8 + rng.normal(0, 0.25, t.size)) + 0.5*rng.standard_normal(t.size)
    # Fall B: gleiches Frequenzband, aber eigene, unabhängige Phasendrift
    drift_b = np.cumsum(rng.normal(0, 0.05, t.size))
    yB = np.sin(2*np.pi*10*t + drift_b) + 0.5*rng.standard_normal(t.size)
    # Fall C: anderes Frequenzband (25 Hz), unabhängig
    yC = np.sin(2*np.pi*25*t + np.cumsum(rng.normal(0, 0.05, t.size))) + 0.5*rng.standard_normal(t.size)
    return t, x, {"A": yA, "B": yB, "C": yC}


if __name__ == "__main__":
    p = PARAM
    t, x, ys = make_signals(p)
    for k, y in ys.items():
```

```
        ov, plv, stab = components(x, y, p)
        R = r_sum(ov, plv, stab, p)
        pv = surrogate_p(x, y, p, R, ov)
        dr = drift_rate(x, y, p)
        print(f"{k}: Drift={dr:.3f} rad/s Overlap={ov:.3f} PLV={plv:.3f} Stab={stab:.3f} R_sum={R:.3f}
p={pv:.4f} Produkt={ov*plv*stab:.3f}")
```

Anhang B Protokollvorlage

Feld	Eintrag
Protokoll-Nr. / Datum	
Bearbeiter/in	
Signal x: Datei, Sitzung, Prüfsumme	
Signal y: Datei, Sitzung, Prüfsumme	
Messintervall (Beginn – Ende)	
Vorverarbeitung (Schnitte, Umrechnung, Randverwurf)	
f_s / Band [f_u, f_o] / L / Filterordnung	
Gewichte α / β / γ (Begründung bei Abweichung)	
Overlap	
PLV	
Stab	
R_Summe	
Driftrate [rad/s]	
Surrogate M / Seed / p-Wert	
Signifikanzniveau / Korrektur für Mehrfachtests	
Kontrollaufnahme vorhanden? (Kennung)	
Softwareversion	
Bewertung nach 4.10	
Offene Punkte	