SENSORFUSION ZUR BEWEGUNGSANALYSE VON PHYSIOTHERAPEUTISCHEN ÜBUNGEN

Abschlussvortrag Bachelorarbeit

Luise Herrmann

AGENDA

I. Motivation

II. Datensatz

III. Datenvorverarbeitung

IV. Auswertung

V. Ergebnisse

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

MOTIVATION

Physiotherapie

- Aktive Bewegungstherapie effizienter durch eigenständiges Üben zuhause
- Problem: Keine Korrektur durch Fachkraft
- Mögliche Folgen: Falsche Ausführung, dadurch Verschlechterung der Beschwerden

Lösungsansatz

- Kamera/Videoaufnahme soll fehlende Fachkraft bei Heimübungen ersetzen
- Bewertung der Bewegungsqualität
- Ermittlung Muskelaktivität & Gewichtsverteilung anhand aussagekräftiger Winkel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

DATENSATZ

12 Probanden, 3 Experimente

- E1: Kniebeuge, korrekt
- E2: Kniebeuge, Fehler 1
- E3: Kniebeuge, Fehler 2

Je 3 Durchführungen mit 10 Wiederholungen

Aufzeichnung

- Elektromyographie (EMG), Kraftmessplatten (GRF), Motion Capture (MoCap)
- Kameravideos aus 2 Perspektiven (frontal, lateral)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

BEISPIELÜBUNG KNIEBEUGE

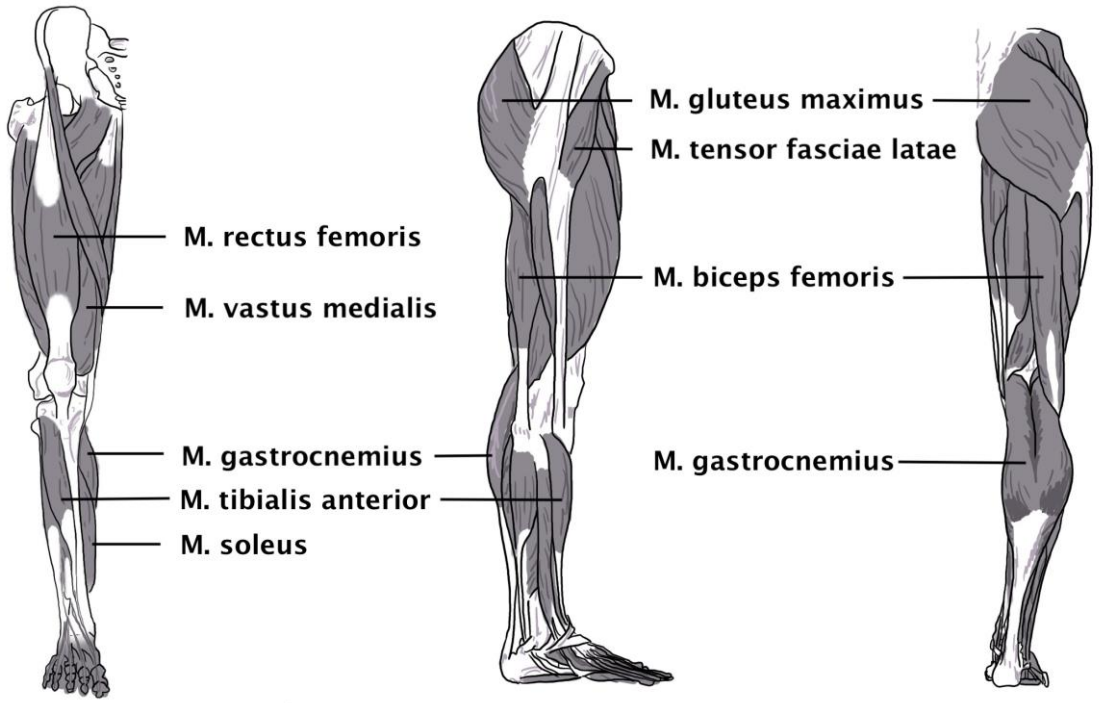
Kniebeuge als Standardübung

Vielseitige Muskelbeanspruchung

Langsame Bewegung

Korrekte Ausführung

- Schulterbreitstand, gerader Rücken
- Tiefe Kniebeuge (0-140° Kniewinkel)
- Reduziert Belastung auf Knie & Rücken
- Fördert Muskelentwicklung



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

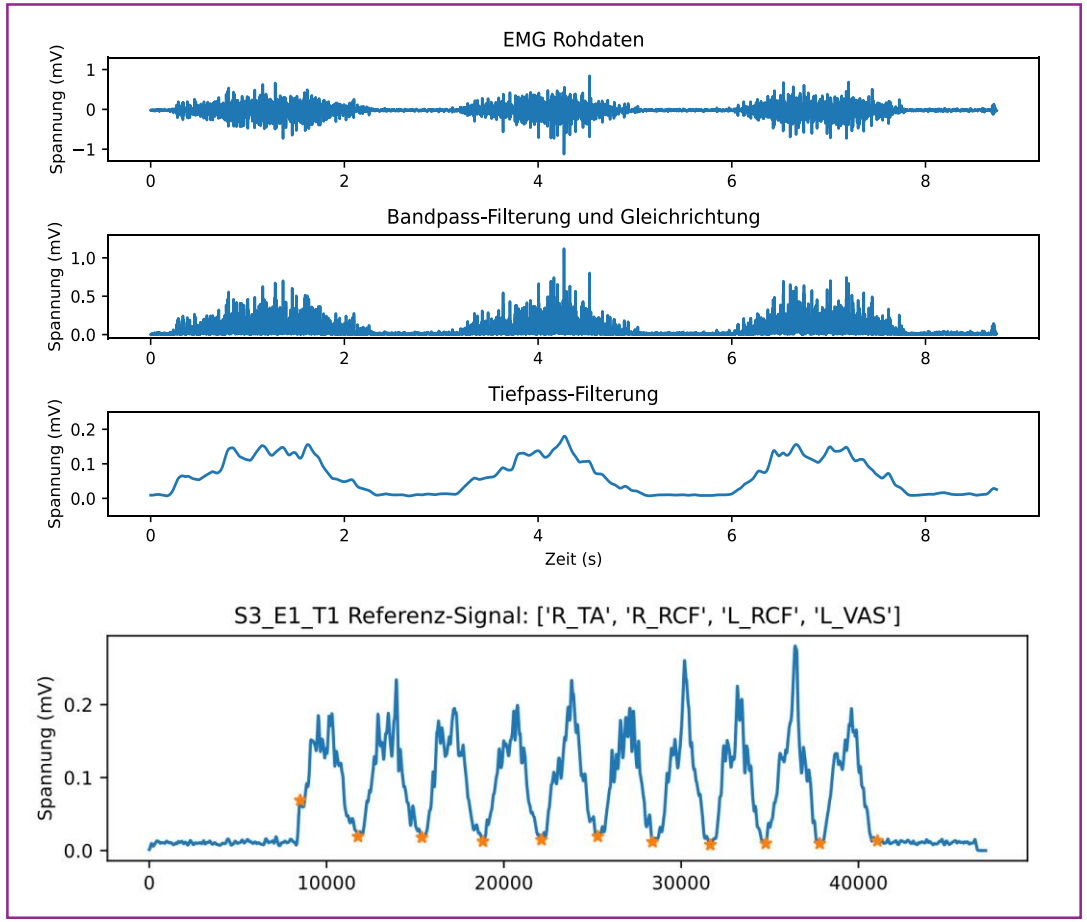
DATENVORVERARBEITUNG EMG & GRF

Vorverarbeitung

- Filterung (Bandpass, Betrag, Tiefpass)
- Segmentierung der Daten
- Durch Referenzmuskel einzelne Wiederholungen bestimmen

Normalisierung

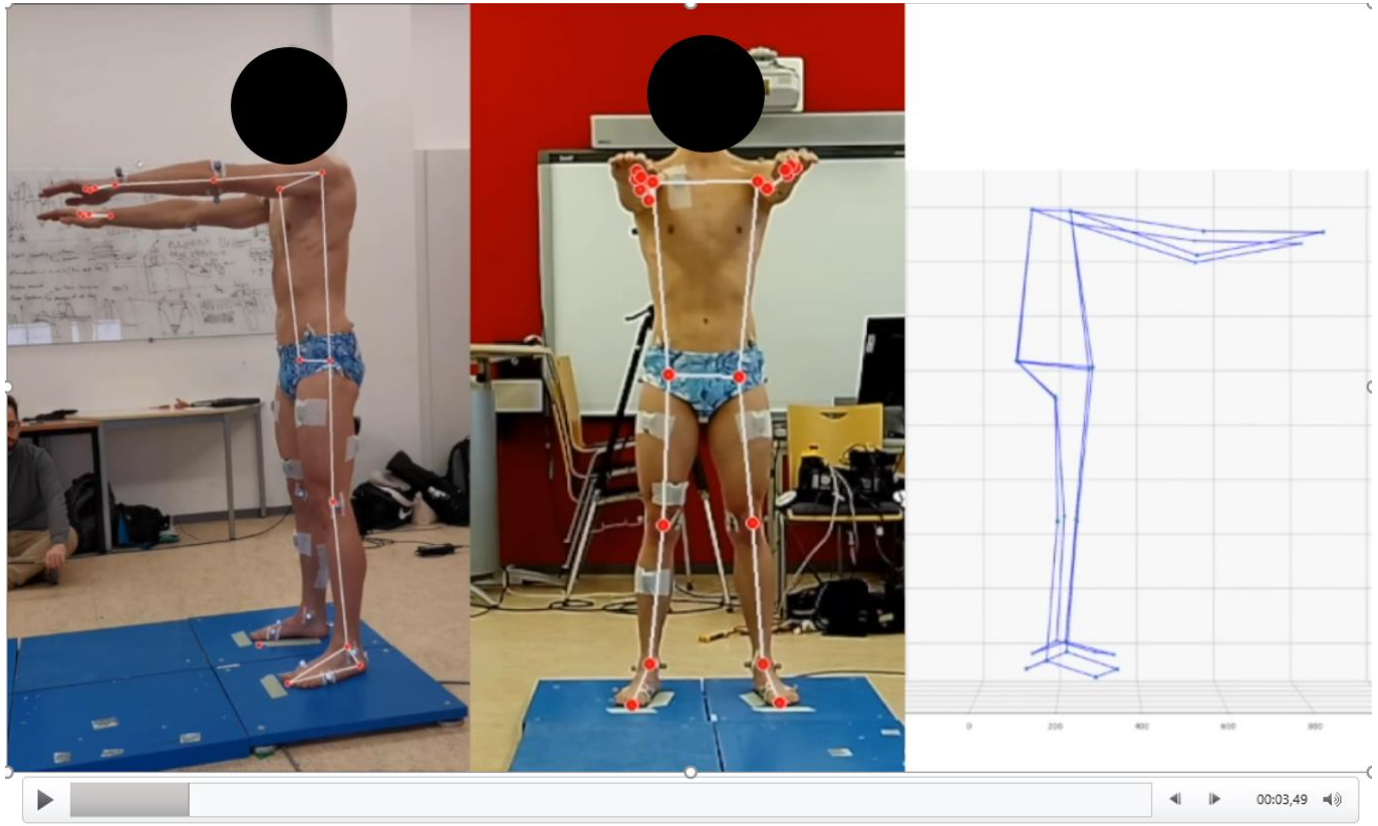
- Amplitudennormalisierung
- Längennormalisierung auf 1.000 Zeiteinheiten



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

DATENVORVERARBEITUNG MOCAP & KAMERAS

- Verarbeitung Kameravideos mit MediaPipe
- Synchronisation Kameradaten
- Vier Körperwinkel:
  - Sprunggelenkwinkel, Kniewinkel, Hüftwinkel, Symmetriewinkel



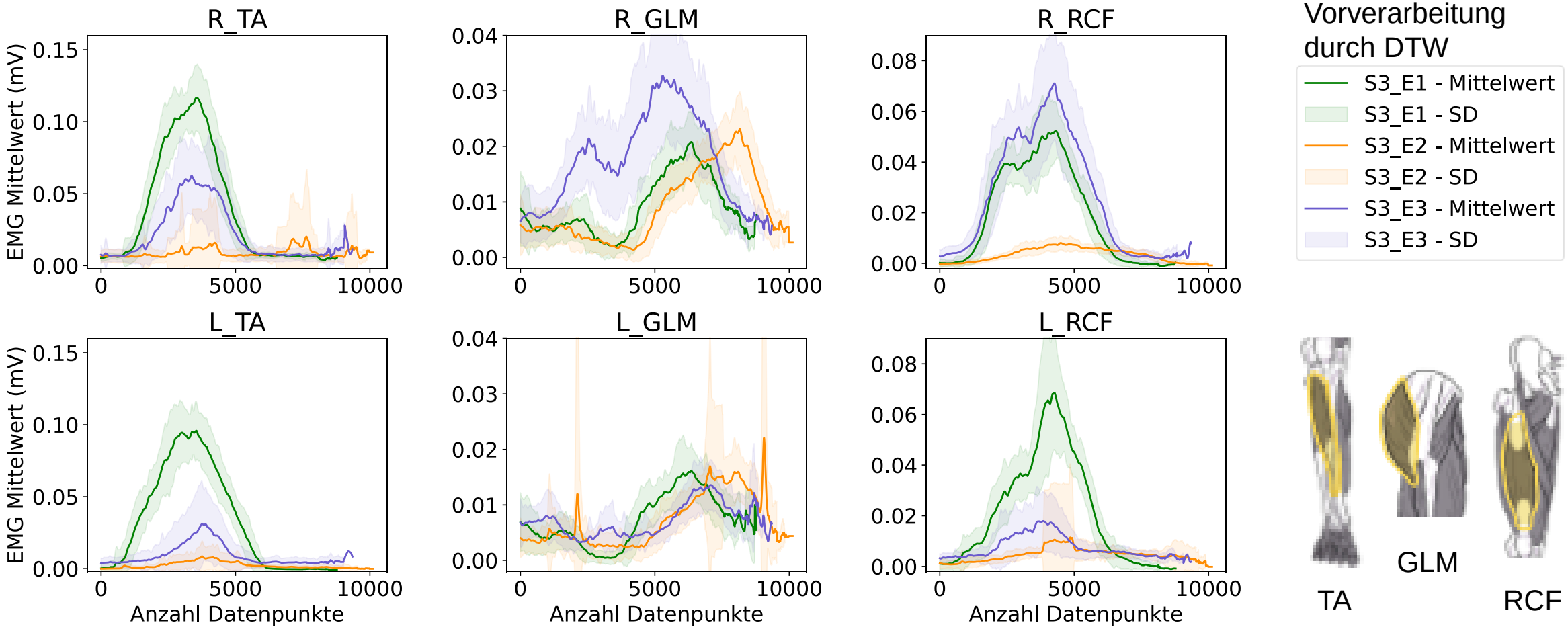
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

IV. AUSWERTUNG

- Visuelle Analyse
- Korrelationsanalyse
- Entscheidungsbaum-Modell

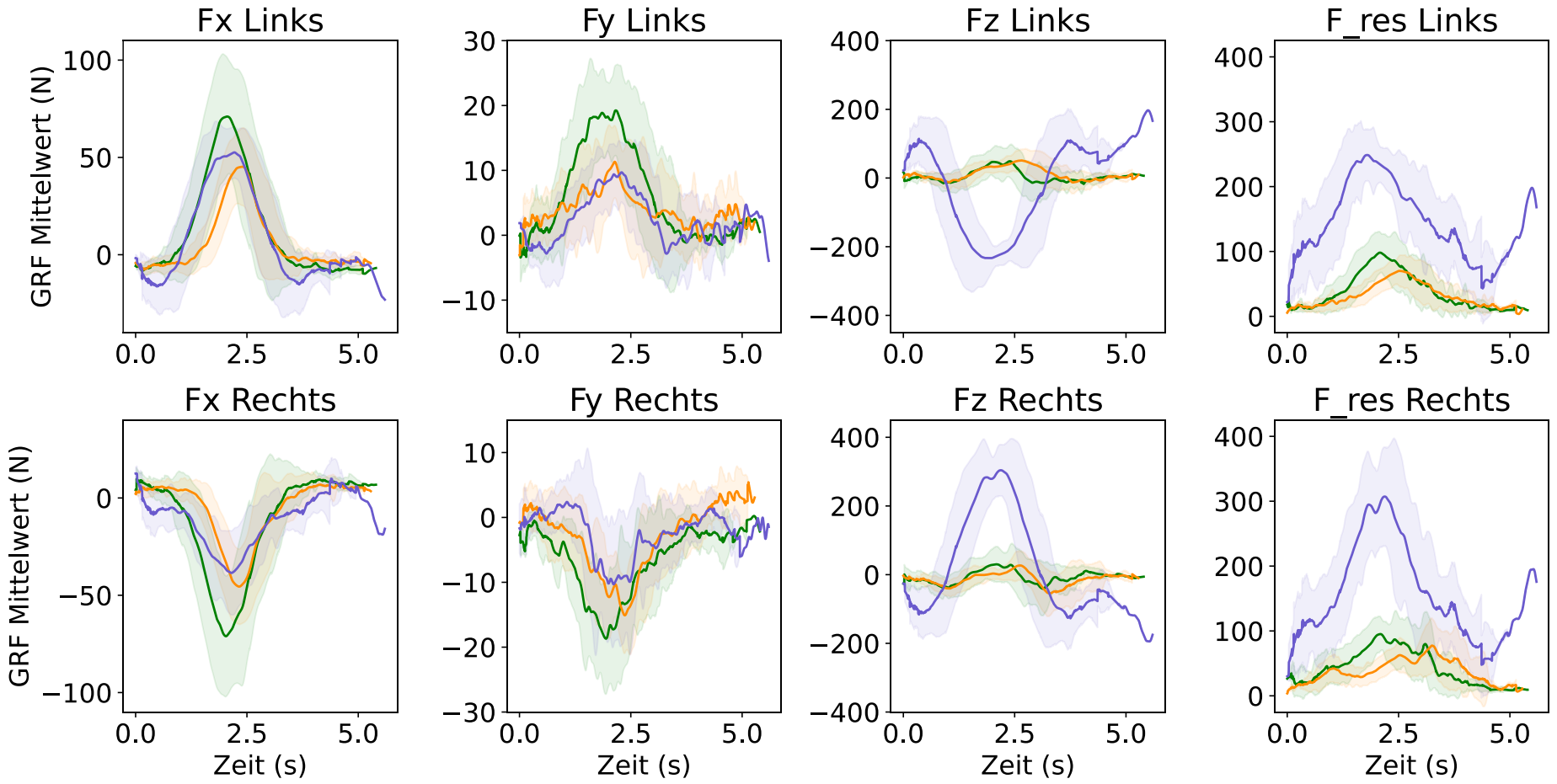
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

VISUELLE ANALYSE - EMG



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

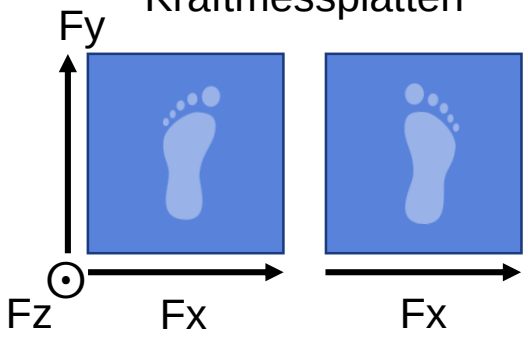
VISUELLE ANALYSE - GRF



Vorverarbeitung durch Korrelation

- S7_E1 - Mittelwert
- S7_E1 - SD
- S7_E2 - Mittelwert
- S7_E2 - SD
- S7_E3 - Mittelwert
- S7_E3 - SD

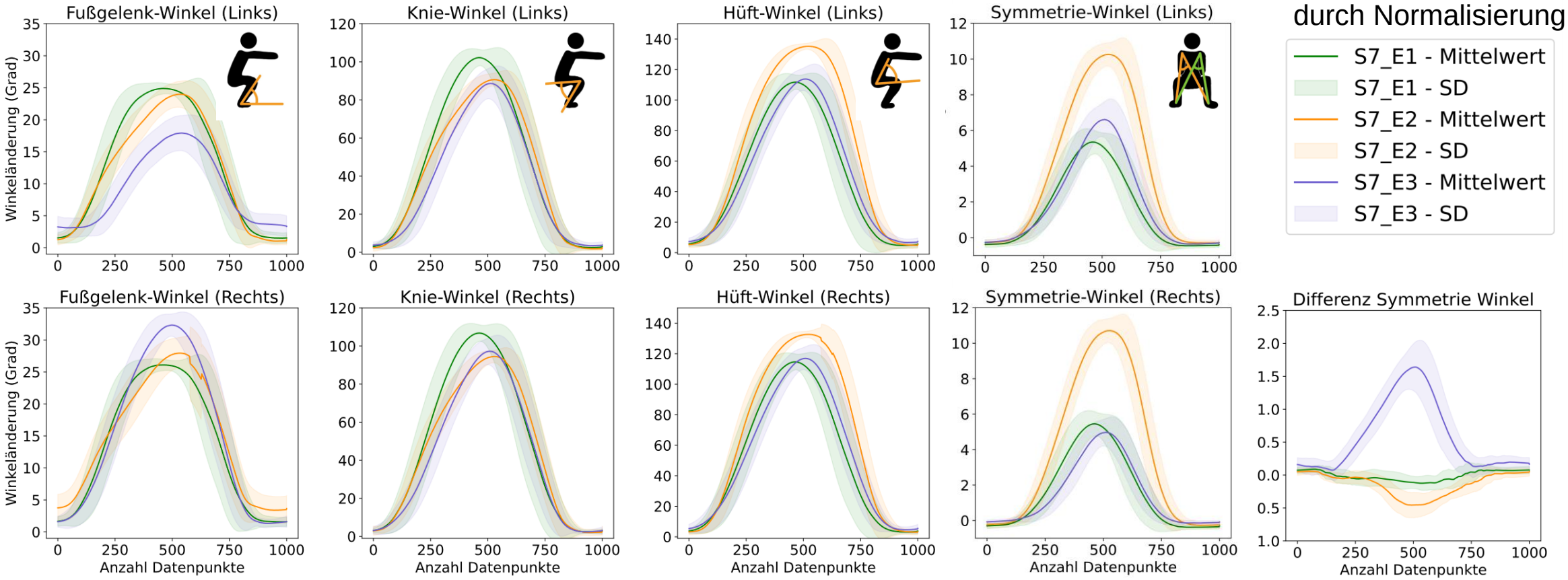
Ausrichtung Kraftmessplatten



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

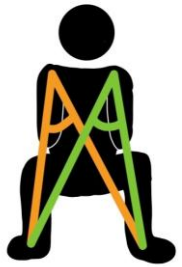
VISUELLE ANALYSE – MOCAP

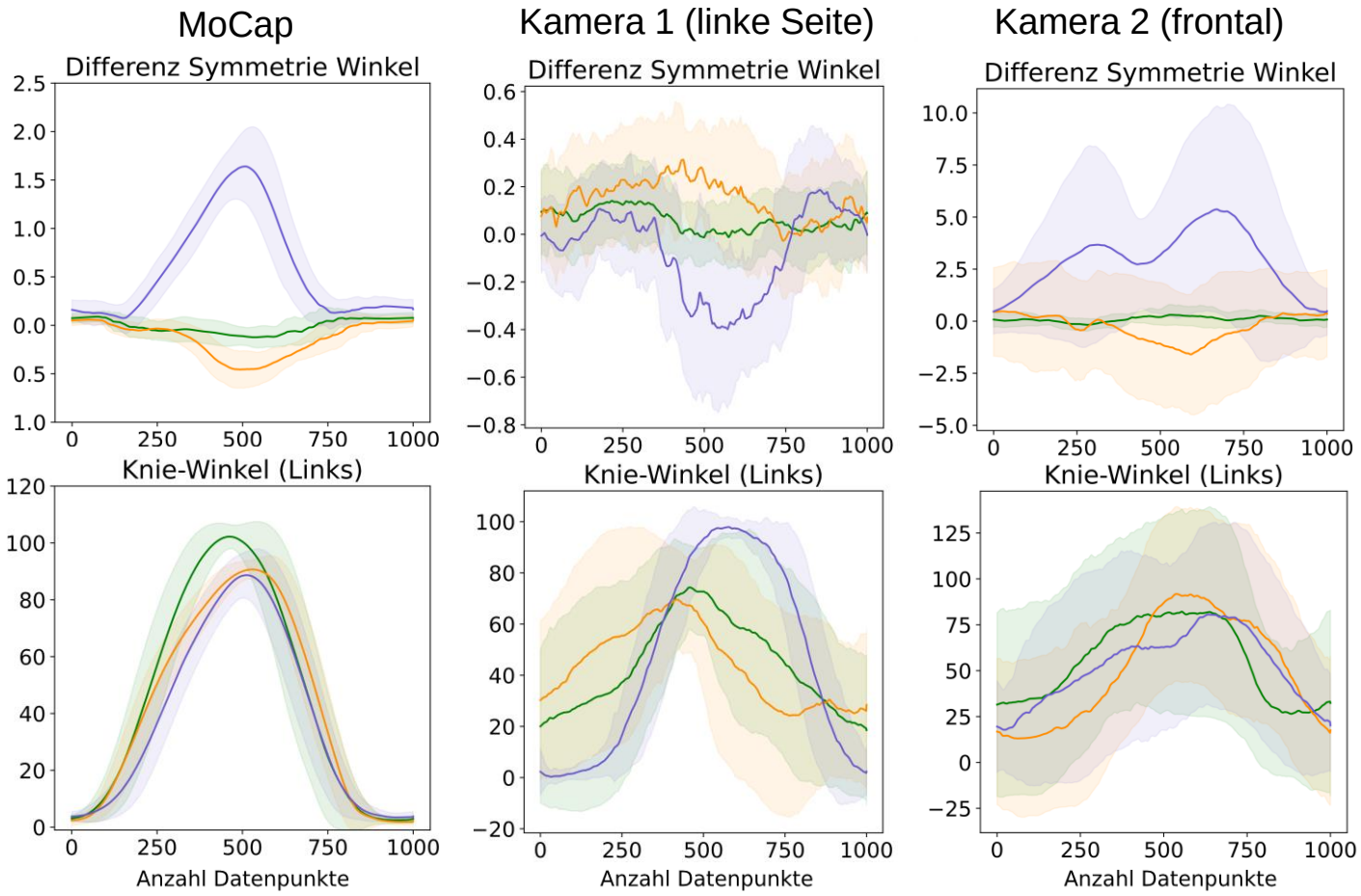
Vorverarbeitung durch Normalisierung



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

VISUELLE ANALYSE - WINKEL





TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

KORRELATIONSANALYSE

Innerhalb eines Probanden

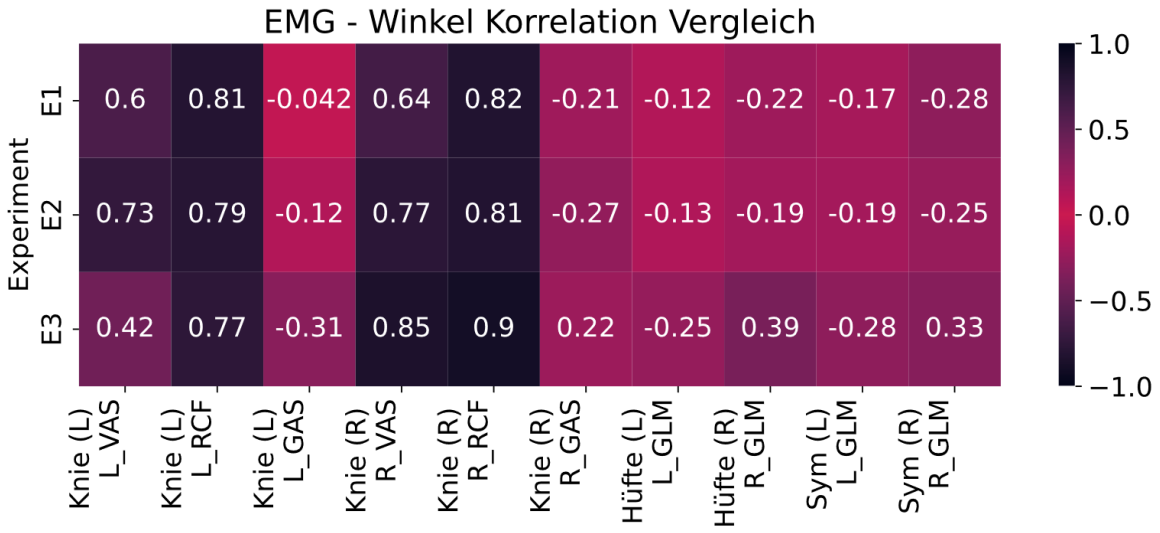
- Hohe Links-Rechts Korrelation bei E1
- Geringer bei fehlerhafter Ausführung (E2, E3)

Zwischen Probanden

- Konsistente EMG- und GRF-Muster in E1
- Geringere Korrelationen in E2 und E3 durch individuelle Kompensationsstrategien

EMG-MoCap Winkel-Korrelation

- Hoch bei Quadrizeps-Aktivität (M. rectus femoris, M. vastus medialis) mit Kniewinkel



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ENTSCHEIDUNGSBAUM

Merkmalsextraktion

- Für jede einzelne Wiederholung:
  - **Peaks:**
    EMG, GRF, Winkel
  - **Integral + normalisiert:**
    EMG, GRF

Zwei Entscheidungsbaum-Modelle

- **Ziel 1:**
  Klassifikation korrekte vs. fehlerhafte Ausführung
- **Ziel 2:**
  Klassifikation E1, E2, E3

➢ Leave-one-out-Ansatz zur Validierung

Evaluationsmetriken

- **F1-Score:**
  Harmonisches Mittel von Präzision und Sensitivität
- **Sensitivität**:
  True Positive Rate
- **Spezifität**:
  True Negative Rate

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ENTSCHEIDUNGSBAUM MERKMALSBEWERTUNG

EMG-Features

- **Peaks**: Sehr zuverlässig
- **Integral (Norm)**: Moderate Leistung, normiert besser

GRF-Features

- **Peaks**: Moderat, variabel
- **Integral**: Solide Leistung

Winkel-Features

- **MoCap**: Zuverlässigstes Merkmal (F1 max: 1.0)
- **Kamera 1** (lateral): Schwächere Leistung
- **Kamera 2** (frontal): Besser als Kamera 1, aber hinter MoCap

Feature	F1-mean Modell 1	F1-mean Modell 2
EMG_peaks	0.80450	0.66794
EMG_int	0.53144	0.16797
EMG_int_norm	0.66775	0.46467
GRF_peaks	0.66083	0.65970
GRF_int	0.68038	0.68128
GRF_int_norm	0.64441	0.58302
MoCap_peaks	0.89603	0.81490
cam1_peaks	0.59066	0.43848
cam2_peaks	0.76873	0.70319

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ENTSCHEIDUNGSBAUM SENSORKOMBINATIONEN

Feature (Peaks) Kombinationen	F1-Score Mean	Sensitivität Mean	Spezifität Mean
EMG + MoCap	0.89	0.90	0.89
GRF + MoCap	0.88	0.89	0.88
cam1 + cam2	0.81	0.82	0.81
EMG + cam1 + cam2	0.82	0.83	0.80
EMG + GRF	0.77	0.78	0.74

- Mehr Sensoren, mehr Merkmale → bessere Performance des Entscheidungsbaum-Modells
- Beste Performance: EMG + MoCap
- Kamera-Kombination:
  - Liefert deutlich verbesserte Ergebnisse im Vergleich zur einzelnen Betrachtung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ERGEBNISSE

Beobachtung

- Signifikante Unterschiede in Muskelaktivierung, Kräften & Gelenk-winkeln zwischen korrekter und fehlerhafter Kniebeuge

Entscheidungsbaum

- Solide Leistung bei Klassifikation, Schwierigkeiten bei Unterscheidung zwischen Fehlern
- MoCap-Peaks als zuverlässigstes Merkmal

Sensorkombination

- Verbessert Bewegungsanalyse
- Potential zur Schätzung von Muskelaktivität durch Gelenkwinkel erkennbar

Ausblick

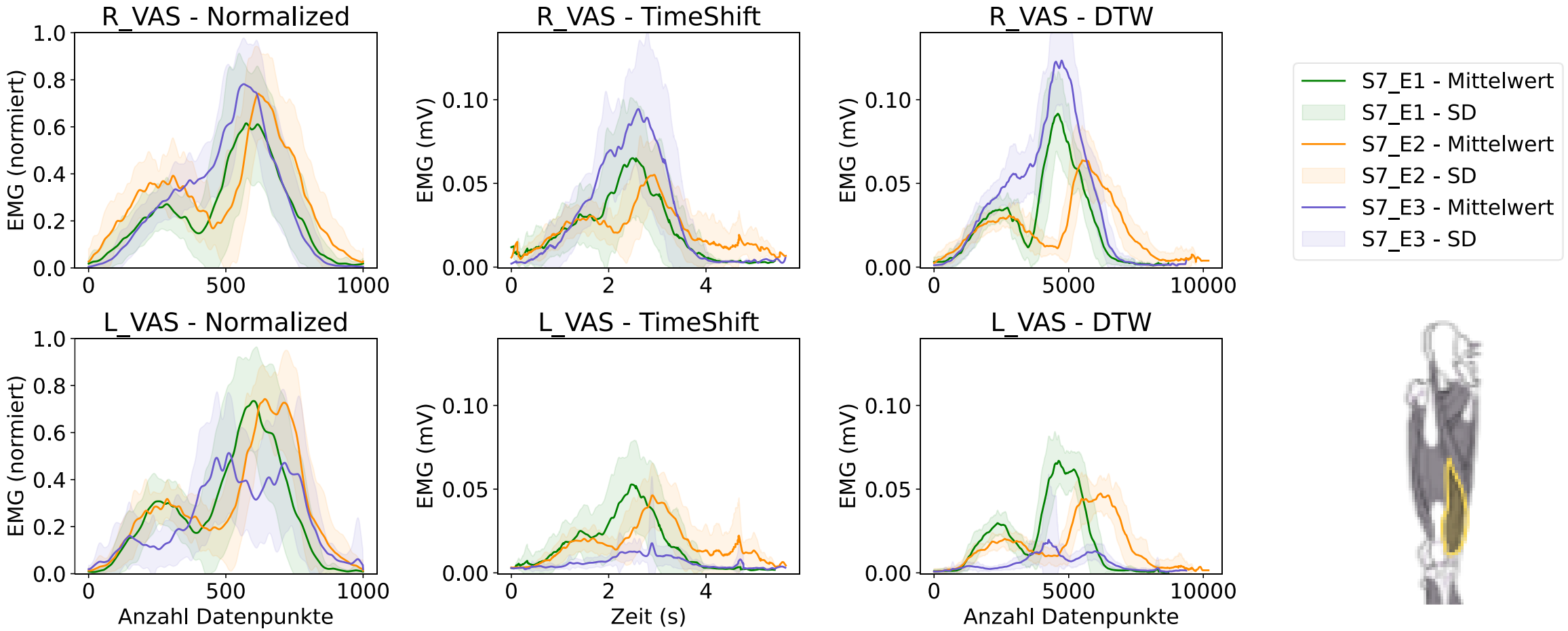
- Fusion der Kameraperspektiven
- Untersuchung auf weitere Proportionalitäten

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ANHANG

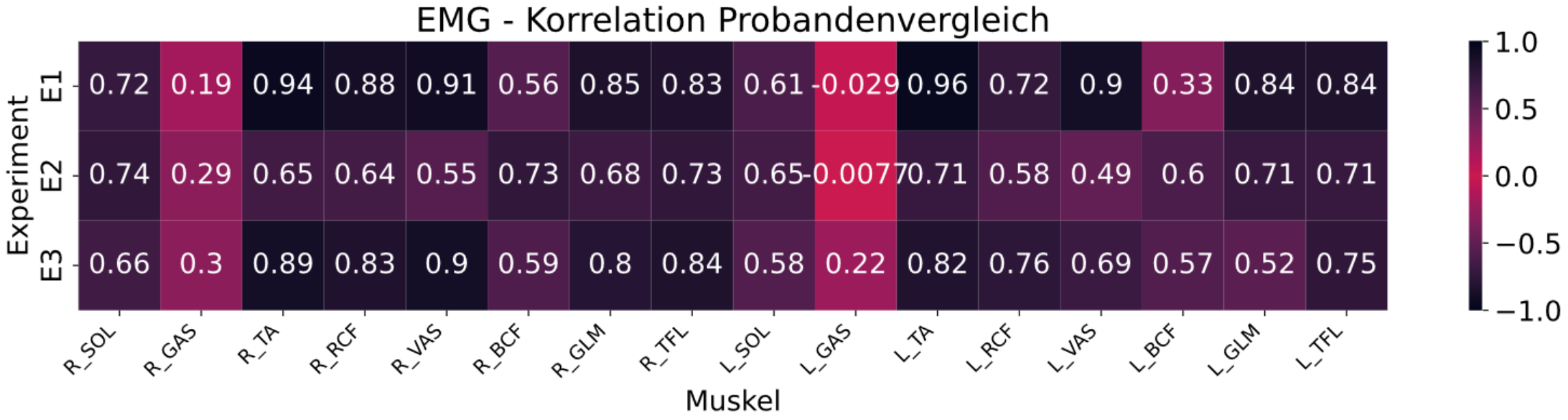
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

VISUELLE ANALYSE - MITTELWERTBILDUNG

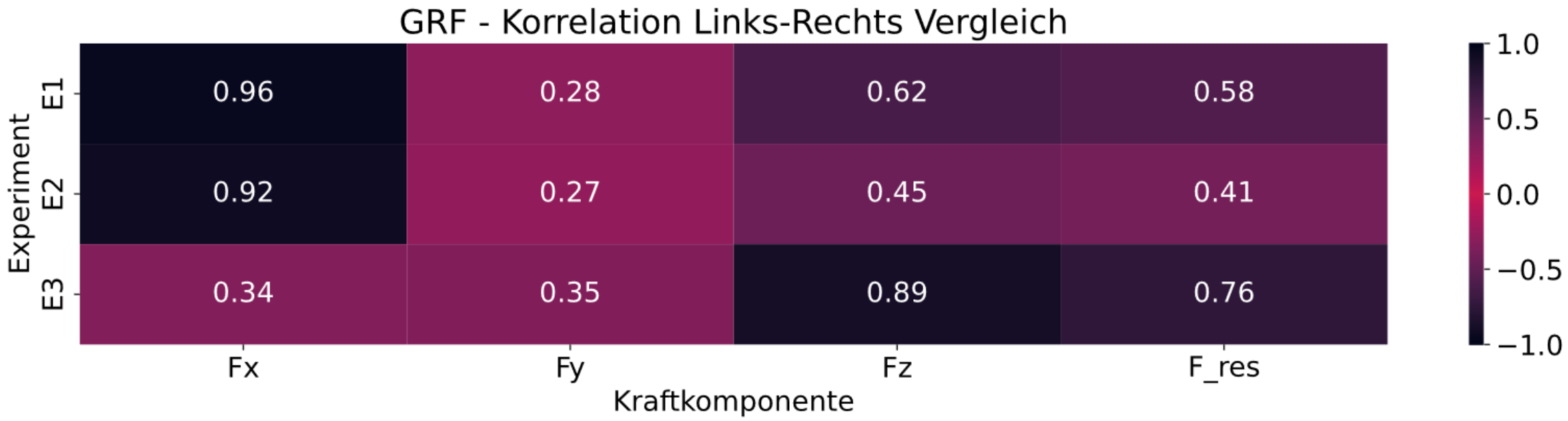


TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

KORRELATIONSTABELLE EMG PROBANDENVERGLEICH

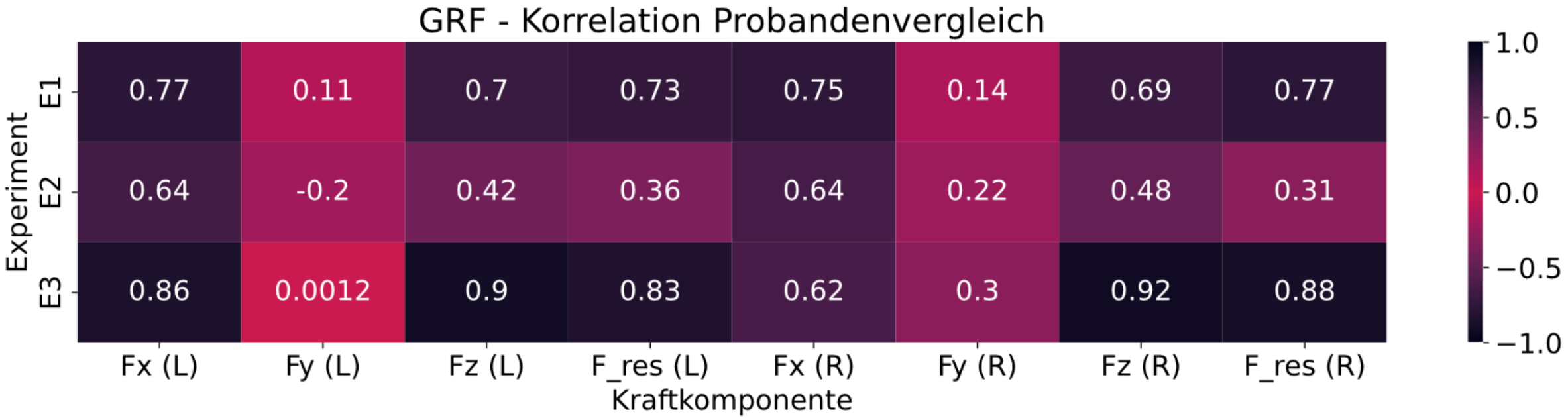


KORRELATIONSTABELLE GRF R/L



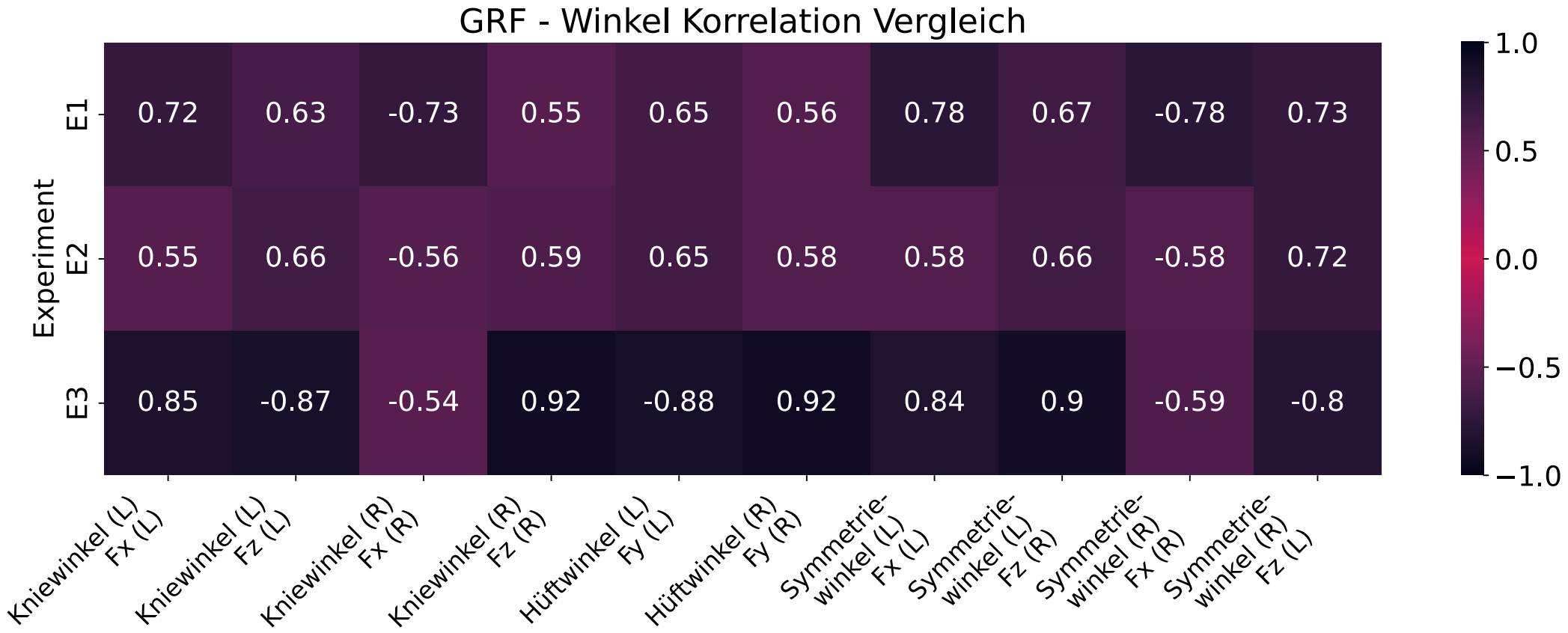
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

KORRELATIONSTABELLE GRF PROBANDENVERGLEICH



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

KORRELATIONSTABELLE GRF - WINKEL



TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ENTSCHEIDUNGSBAUM KORREKT VS FEHLER

Feature	F1-Score mean	F1-Score MIN	F1-Score MAX	Sensitivität mean	Spezifität mean
EMG_peaks	0.80450	0.62254	0.91179	0.81605	0.78788
EMG_integral	0.53144	0.52398	0.53333	0.66519	0.50000
EMG_int_norm	0.66775	0.55564	0.80727	0.67722	0.63549
GRF_peaks	0.66083	0.38253	0.79410	0.66712	0.62628
GRF_integral	0.68038	0.48400	0.84130	0.69958	0.65108
GRF_int_norm	0.64441	0.51870	0.84304	0.65410	0.60174
COP	0.60647	0.45988	0.69484	0.60283	0.56869
MoCap_peaks	0.89603	0.67496	1.00000	0.90027	0.89962
cam1_peaks	0.59066	0.39911	0.74872	0.59899	0.56113
cam2_peaks	0.76873	0.62204	0.88536	0.77661	0.74615

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

ENTSCHEIDUNGSBAUM E1 VS E2 VS E3

Feature	F1-Score mean	F1-Score MIN	F1-Score MAX	Sensitivität mean	Spezifität mean
EMG_peaks	0.66794	0.49445	0.86659	0.69823	0.69858
EMG_integral	0.16797	0.16667	0.17312	0.33481	0.33333
EMG_int_norm	0.46467	0.35013	0.70278	0.47024	0.47004
GRF_peaks	0.65970	0.33312	0.83318	0.67841	0.67812
GRF_integral	0.68128	0.18009	0.87512	0.69496	0.69494
GRF_int_norm	0.58302	0.39032	0.68142	0.58943	0.58910
COP	0.55620	0.42750	0.67012	0.55833	0.55873
MoCap_peaks	0.81490	0.34940	1.00000	0.82992	0.83042
cam1_peaks	0.43848	0.21484	0.68937	0.47674	0.47476
cam2_peaks	0.70319	0.53630	0.87686	0.71574	0.71429

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

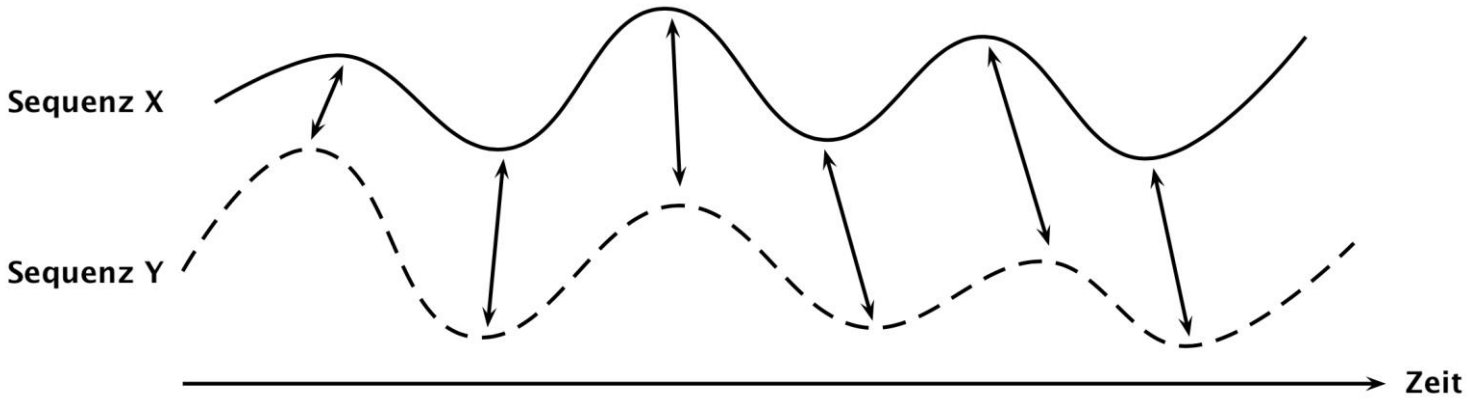
ENTSCHEIDUNGSBAUM SENSORKOMBINATION

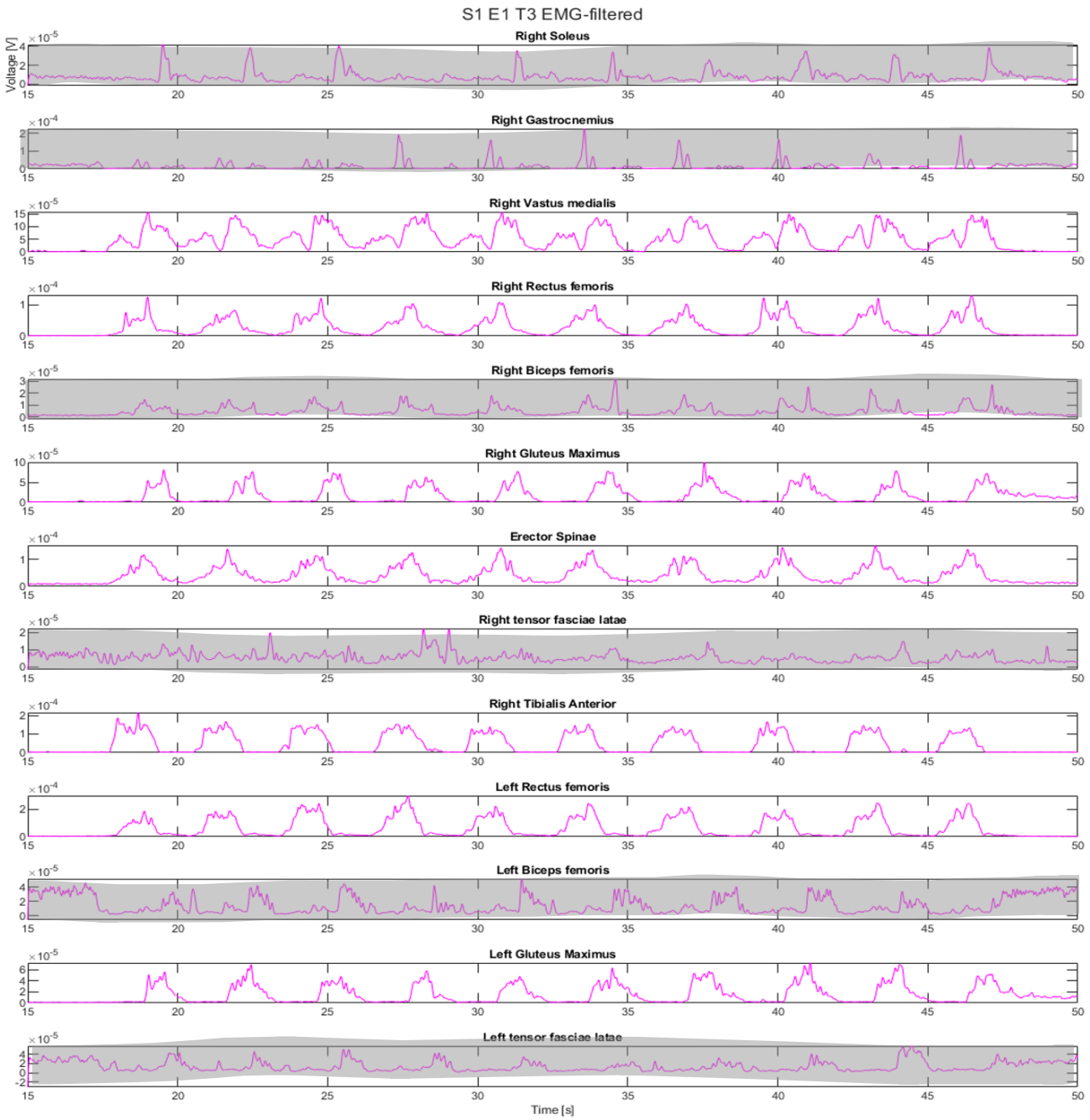
Feature	F1-Score mean	F1-Score MIN	F1-Score MAX	Sensitivität mean	Spezifität mean
EMG_peaks + MoCap_peaks	0.89298	0.69570	1.00000	0.89691	0.88949
EMG_peaks + GRF_peaks	0.77224	0.46067	0.91923	0.77601	0.74031
GRF_peaks + MoCap_peaks	0.88457	0.67496	1.00000	0.88916	0.88379
cam1_peaks + cam2_peaks	0.81411	0.59747	0.97778	0.82066	0.80518
EMG_peaks + cam1_peaks + cam2_peaks	0.81565	0.53682	0.97778	0.82935	0.79896
GRF_peaks + cam1_peaks + cam2_peaks	0.76587	0.54876	0.96703	0.77902	0.76809

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

DYNAMIC TIME WARPING

- Voraussetzung: zwei Sequenzen mit grundsätzlich gleicher Signalform
- Nicht lineare Deformation der Zeitachsen (Streckung, Stauchung) um bestmögliche Übereinstimmung zu erzielen



EMG REFERENZ-MUSKEL

- FFT anwenden und positives Spektrum betrachten
- Muskeln wählen anhand Verhältnis Hochfrequenzenergie zur Gesamtenergie
- Min. 3 „rauscharme“ Muskeln mit Hochfrequenzverhältnis 0,5 (entspricht SNR 1:1) aufaddieren