

**Prozessorientierte kinematische Analyse von Bewegungsmustern am  
Beispiel der Strafstoßsituation im Fußball**

Vom Fachbereich Sozialwissenschaften  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades  
Doktor der Philosophie (Dr. phil.)  
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Sportwiss. Sebastian Zart  
aus Neustadt an der Weinstraße

Tag der mündlichen Prüfung:	09.10.2012
Dekan:	Prof. Dr. Thomas Schmidt
Vorsitzender:	Prof. Dr. Thomas Schmidt
Gutachter:	1. Prof. Dr. Thomas Jaitner 2. Prof. Dr. Arne Güllich

D 386

(2012)



Meinen Eltern gewidmet

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Professor Dr. Thomas Jaitner einen großen Dank aussprechen, der mich von der Themenfindung meines Promotionsvorhabens über die Datenerhebung bis zur Datenauswertung nicht nur fachlich begleitet, sondern auch finanziell und materiell unterstützt hat und mit den immer wieder klärenden und anregenden Gesprächen und Diskussionen es mir ermöglichte, den richtigen Kurs einzuhalten.

Besonders danken möchte ich auch Professor Dr. Arne Güllich, der spontan und mit großem Interesse die Rolle als Zweitgutachter wahrgenommen hat.

Danken möchte ich den Studierenden Stephanie Fritzen, Manfred Gölter, Nicolas Grün, Evelyn Hess, Christian Krämer, Mario Sauer, Eva Schmitt, Sascha Spallek, Bastian Weber, Stephanie Weber, Stefan Weinz, Christoph Wittal und Sören Zwick, die mir tatkräftig mit helfender Hand zur Seite standen. Nur mit ihrer Hilfe konnte der Aufbau des Equipments und die Erfassung der Daten an den Untersuchungstagen reibungsfrei ablaufen sowie die Datenaufbereitung im Anschluss vorangetrieben werden.

Vielen Dank auch an jeden Spieler, der sich für die Untersuchung Zeit genommen und mir als Proband zur Verfügung gestanden hat. Hervorheben möchte ich den Einsatz von Frederik Heinz und Marc Bisch, die an den Untersuchungstagen als Torhüter agierten und großes Engagement zeigten.

Besonders große Unterstützung bekam ich auch von Walter Pradt und seinem Team des Soccer-Centers, die für die Untersuchung notwendigen guten Rahmenbedingungen sorgten.

Zuletzt, aber deswegen weit weniger unbedeutend, gilt mein Dank meiner Freundin Jasmin, die mir im letzten Abschnitt meines Promotionsvorhabens nicht nur moralische Unterstützung zuteilwerden ließ, sondern auch eine große Hilfe bei der Datenaufbereitung war und mir darüber hinaus den Rücken frei gehalten hat, so dass ich mich voll und ganz auf den Abschluss meiner Arbeit konzentrieren konnte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>13</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>16</b>
<b>2 Forschungsstand</b> .....	<b>18</b>
2.1 Analyse sportlicher Bewegungen .....	18
2.1.1 Elementaristische Verfahren zur Bewegungsanalyse .....	20
2.1.2 Holistische Verfahren zur Bewegungsmustererkennung .....	24
2.1.2.1 Faktorenanalyse .....	25
2.1.2.2 Verfahren linearer Distanzmaße .....	32
2.1.2.3 Support Vector Machine .....	39
2.1.2.4 Künstliche Neuronale Netze .....	43
2.1.3 Zusammenfassung .....	51
2.2 Merkmale der Strafstoßsituation .....	52
2.2.1 Strategien beim Strafstoß.....	53
2.2.2 Wahrnehmungsaspekte beim Strafstoß .....	56
2.2.2.1 Einflussnahme des Torwarts .....	56
2.2.2.2 Einfluss der Blickrichtung.....	58
2.2.2.3 Bewegungserkennung durch Hinweisreize.....	60
2.2.3 Kinematische Analyse des Strafstoßes .....	64
2.2.4 Zusammenfassung.....	72
<b>3 Problemstellung</b> .....	<b>74</b>
<b>4 Untersuchungsmethodik</b> .....	<b>76</b>
4.1 Untersuchungsbedingungen.....	76
4.2 Versuchspersonen .....	77
4.3 Untersuchungsablauf .....	78
4.4 Messsaufbau .....	80
4.5 Messwerverfassung .....	81
4.6 Fehlerabschätzung.....	83
4.6.1 Raum- und Winkelmerkmale .....	83
4.6.2 Zeitmerkmale.....	85
4.7 Auswahl der Merkmalsstichprobe .....	86
4.8 Messwertverarbeitung .....	88
4.8.1 Bewegungsbezogene Merkmale .....	88
4.8.2 Resultatbezogene Merkmale.....	91

<b>5</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b>	<b>92</b>
5.1	Resultatbezogene Merkmale	92
5.1.1	Trefferquoten	92
5.1.2	Zeitliche Ausprägung des Anlaufs	95
5.2	Prozessorientierte Merkmale	96
5.2.1	Richtungsspezifische Variabilität der Bewegungsmuster	96
5.2.1.1	Variabilitätskoeffizienten ganzheitlicher Bewegungsmuster	97
5.2.1.2	Variabilitätskoeffizienten phasenbezogener Bewegungsmuster	99
5.2.1.3	Schlussfolgerung	101
5.2.2	Inter-individueller Vergleich von Bewegungsmustern	102
5.2.2.1	Winkel-Verlauf	102
5.2.2.2	Winkelgeschwindigkeit	103
5.2.2.3	Verlauf der Gelenkmittelpunkte	104
5.2.2.4	Schlussfolgerung	105
5.2.3	Richtungsspezifische Auswertung von Bewegungsmustern	105
5.2.3.1	Bedingung Baseline	106
5.2.3.1.1	Intra-individueller Vergleich ganzheitlicher Bewegungsmuster	106
5.2.3.1.1.1	Winkel-Verlauf	106
5.2.3.1.1.2	Winkelgeschwindigkeit	109
5.2.3.1.1.3	Verlauf von Gelenkmittelpunkten	112
5.2.3.1.1.4	Schlussfolgerung	114
5.2.3.1.2	Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster	116
5.2.3.1.2.1	Winkel-Verlauf	116
5.2.3.1.2.2	Winkelgeschwindigkeit	119
5.2.3.1.2.3	Verlauf von Gelenkmittelpunkten	122
5.2.3.1.2.4	Schlussfolgerung	125
5.2.3.1.3	Intra-individueller Vergleich mittels phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster	126
5.2.3.2	Bedingung Keeper-independent	130
5.2.3.2.1	Intra-individueller Vergleich ganzheitlicher Bewegungsmuster	130
5.2.3.2.2	Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster	133
5.2.3.2.3	Intra-individueller Vergleich phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster	136
5.2.3.2.4	Vergleich der Bewegungsmuster <i>Baseline</i> und <i>Keeper-independent</i>	139
5.2.3.2.5	Schlussfolgerung	142
5.2.3.3	Bedingung Keeper-dependent	142
5.2.3.3.1	Intra-individueller Vergleich ganzheitlicher Bewegungsmuster	142

---

5.2.3.3.2	Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster.....	145
5.2.3.3.3	Intra-individueller Vergleich phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster.....	148
5.2.3.3.4	Vergleich der Bewegungsmuster <i>Baseline</i> und <i>Keeper-dependent</i> .....	150
5.2.3.3.5	Schlussfolgerung.....	153
5.2.3.4	Point of no return.....	153
5.2.3.4.1	Intra-individueller Vergleich mittels ganzheitlicher Bewegungsmuster.....	153
5.2.3.4.2	Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster.....	156
5.2.3.4.3	Intra-individueller Vergleich mittels phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster.....	159
5.2.3.4.4	Vergleich der Bewegungsmuster <i>Baseline</i> und <i>Point of no return</i> .....	162
5.2.3.4.5	Schlussfolgerung.....	165
5.2.4	Zusammenfassung.....	165
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>170</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>177</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>185</b>

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1.</i> Zeitdiskrete (schwarz) und zeitkontinuierliche (grau) Merkmale im Vergleich (Jaitner, 2002b, S. 63) .....	18
<i>Abb. 2.</i> Definition der Winkel Oberschenkel ( $\theta T$ ), Bein ( $\theta L$ ) und Knie ( $\theta K$ ) (Li et al., 1999, S. 68).....	21
<i>Abb. 3.</i> CRP der Geh- und Laufmuster von sechs Probanden (Li et al., 1999, S. 77).....	21
<i>Abb. 4.</i> Vektorkodierung einer Kurve (Tepavac & Field-Note, 2001, S. 261) .....	22
<i>Abb. 5.</i> Zeitlicher Winkel-Verlauf der Handöffnung beim Fangen (Mazyn et al., 2006, S. 151).....	24
<i>Abb. 6.</i> Versuchsaufbau zur Erfassung diagonaler (CC) und gerader (IO) Vorhandschläge mit kurzer (S) und langer (D) Schlagdistanz (Huys et al., 2008, S. 1219) .....	26
<i>Abb. 7.</i> 18 rekonstruierte Körperpunkte zur Beschreibung der Bewegung (Diaz et al., 2012, S. 4).....	27
<i>Abb. 8.</i> Räumliche Differenz der Marker (mm) für die Eigenvektoren 12, 13 und 15 in Bezug zum Kontrollsignal (links); repräsentative Körperhaltung (Kreise) überlagert mit Körperpunkten ohne den Anteil der entsprechenden Eigenvektoren 12, 13 und 15 (Diaz et al., 2012, S. 7) .....	28
<i>Abb. 9.</i> Absoluter Gruppenmittelwert der Eigenvektorkoeffizienten von Körpermarkern der ersten Hauptkomponente für die vier Wurfzonen (B = bottom, T = top, R = right, L = left) (Bourne et al., 2011, S. 47).....	29
<i>Abb. 10.</i> Dreidimensionale signifikante Eigenvektorkoeffizienten resultierend aus den PCAs Gehen (links) und Laufen (rechts) (Lamoth et al., 2009, S. 378).....	30
<i>Abb. 11.</i> Effektwert der Hauptkomponenten für einzelne Geschwindigkeitsstufen (Lamoth et al., 2009, S. 379).....	31
<i>Abb. 12.</i> Clustereinteilung der sechs Bewegungsphasen beim Weitsprung (Jaitner et al., 2001, S. 7) .....	33
<i>Abb. 13.</i> Clustereinteilung der Sprünge beim Stabhochsprung sowie Weitsprung anhand aller kinematischer Merkmale. blau=Stabhochsprung; rot=Weitsprung; helle Farbtöne=Zehnkämpfer (Jaitner, 2002a, S. 134).....	33
<i>Abb. 14.</i> Clustereinteilung der Sprünge beim Weitsprung anhand zeitkontinuierlicher Daten (Jaitner, 2007, S. 467) .....	34
<i>Abb. 15.</i> Clustereinteilung der Angriffsschläge dreier Bundesligaspieler (Jaitner & Schack, 2002, S. 241) .....	35
<i>Abb. 16.</i> Surface Plot über alle Würfe der Probanden (Schorer et al., 2007, S. 414).....	37
<i>Abb. 17.</i> Dendrogramm über den intra-individuellen Vergleich der Würfe eines weiblichen Novizen (Schorer et al., 2007, S. 416). 1. Buchstabe: a = Proband; 2. Buchstabe: l = low, m = middle, h = high; 3. Buchstabe: l = left, m = middle, r = right .....	38
<i>Abb. 18.</i> Anzahl der Würfe bezogen auf eine Richtung bei den intra-individuellen Clusterbildungen (Schorer et al., 2007, S. 417).....	39
<i>Abb. 19.</i> Lineare Trennung (links) und nicht-lineare Trennung (rechts) der Daten (Burges, 1998).....	40



<i>Abb. 20.</i> Entwicklung der Erkennungsrate mittels der SVM durch sukzessives Hinzufügen kinematischer Merkmale (Fukuchi et al., 2011, S. 541).....	41
<i>Abb. 21.</i> Definition des Merkmals Minimum Foot Clearance (MFC) (Begg et al., 2005, S. 828).....	41
<i>Abb. 22.</i> MFC-Histogramm (links) und Poincaré Plot (rechts) zur Bestimmung der Merkmale für die SVM (Begg et al., 2005, S. 831) .....	42
<i>Abb. 23.</i> Zuordnung der Netzbereiche zu den Phasen des Annäherungsschlags (Lamb et al., 2011, S. 1135) .....	43
<i>Abb. 24.</i> Trajektorien der Annäherungsschläge des Probanden PB für die Distanzen 4m (a), 8m (b), 12m (c), 16m (d), 20m (e) und 24m (f) (Lamb et al., 2011, S. 1139).....	44
<i>Abb. 25.</i> Attraktor-Diagramme der Probanden für Annäherungsschläge aller Distanzen (Lamb et al., 2011, S. 1139).....	45
<i>Abb. 26.</i> Abbildung von 3 Schüssen mit dem rechten (Spalte 1-3) und linken Fuß (Spalte 4-6) der 6 Probanden (Lees & Barton, 2005, S. 86).....	46
<i>Abb. 27.</i> Semantik von DyCoN für den Freiwurf im Basketball (Schmidt, 2012, S. 368).....	47
<i>Abb. 28.</i> Wurftrajektorien (links) und Phasendiagramme (rechts) eines Novizen (Proband 3), Fortgeschrittenen (Proband 13) und Experten (Proband 17) (mod. nach Schmidt, 2010, S. 124 und 130) .....	48
<i>Abb. 29.</i> Typisierung der Freiwurfmuster von Probanden T1 bis T21 (vgl. Schmidt, 2012, S. 371).....	49
<i>Abb. 30.</i> Phasendiagramme von Schuss 2-5 für 4 Athleten (A, B = Nationalkader; F, I = A-Kader) (Baca & Kornfeind, 2012, S. 299) .....	50
<i>Abb. 31.</i> Vergleich der Ähnlichkeit beim Zielen anhand von 8 Zielmustertypen (Baca & Kornfeind, 2012, S. 300).....	51
<i>Abb. 32.</i> Schusspräzision für Bedingungen ‚keeper-independent‘ und ‚keeper-dependent‘ (Wood & Wilson, 2010a, S. 298).....	59
<i>Abb. 33.</i> Reliabilität von lokalen (a) und verteilten (b) Hinweisreizen im Bewegungsverlauf zur Erkennung von Schussrichtungen (Diaz et al., 2012, S. 6) .....	61
<i>Abb. 34.</i> Schusspräzision von Schusstechniken in Abhängigkeit der Aufgabenstellungen Schusspräzision (Max KA) und Schussgeschwindigkeit (Max KV) (Sterzing et al., 2009).....	65
<i>Abb. 35.</i> Anzeige der Schussrichtung über LED-Lampen im Tor bei der Untersuchungsbedingung Point of no return .....	77
<i>Abb. 36.</i> Versuchsaufbau in der Soccer-Halle .....	81
<i>Abb. 37.</i> Ganzkörpermodell (mod. nach Vicon Motion Systems, Oxford).....	82
<i>Abb. 38.</i> Auswertungsschema der Datenverarbeitung (vgl. Jaitner, Mendoza & Schöllhorn, 2002).....	88
<i>Abb. 39.</i> Gemittelter, phasenbezogener Variabilitätskoeffizient über alle Bewegungsmuster eines Probanden der Phasen LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK (Winkel-Verlauf).....	99
<i>Abb. 40.</i> Gemittelter, phasenbezogener Variabilitätskoeffizient über alle Bewegungsmuster eines Probanden der Phasen LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK (Winkelgeschwindigkeit) .....	99

<i>Abb. 41.</i> Gemittelter, phasenbezogener Variabilitätskoeffizient über alle Bewegungsmuster eines Probanden der Phasen LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK (Verlauf der Gelenkmittelpunkte).....	100
<i>Abb. 42.</i> Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM .....	102
<i>Abb. 43.</i> Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM .....	103
<i>Abb. 44.</i> Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte gBM.....	104
<i>Abb. 45.</i> Dendrogramm des Spielers RP anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM (Baseline).....	107
<i>Abb. 46.</i> Dendrogramm des Spielers MV anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM (Baseline).....	107
<i>Abb. 47.</i> Dendrogramm des Spielers MB anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline) .....	110
<i>Abb. 48.</i> Dendrogramm des Spielers TS anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline) .....	110
<i>Abb. 49.</i> Dendrogramm des Spielers MR1 anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline) .....	111
<i>Abb. 50.</i> Dendrogramm des Spielers MM anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Baseline).....	113
<i>Abb. 51.</i> Dendrogramm des Spielers DH anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Baseline).....	113
<i>Abb. 52.</i> Dendrogramm des Spielers CS anhand des Merkmals Winkel-Verlauf für das pBM LVS-LLS (Baseline) .....	117
<i>Abb. 53.</i> Dendrogramm des Spielers CS anhand des Merkmals Winkel-Verlauf für das pBM LLS-STB (Baseline) .....	117
<i>Abb. 54.</i> Dendrogramm des Spielers CS anhand des Merkmals Winkel-Verlauf für das pBM STB-BK (Baseline).....	118
<i>Abb. 55.</i> Dendrogramm des Spielers NA anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit für das pBM LVS-LLS (Baseline) .....	120
<i>Abb. 56.</i> Dendrogramm des Spielers NA anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit für das pBM LLS-STB (Baseline).....	120
<i>Abb. 57.</i> Dendrogramm des Spielers NA anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit für das pBM STB-BK (Baseline) .....	121
<i>Abb. 58.</i> Dendrogramm des Spielers DR anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das pBM LVS-LLS (Baseline).....	123
<i>Abb. 59.</i> Dendrogramm des Spielers DR anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das pBM LLS-STB (Baseline).....	123
<i>Abb. 60.</i> Dendrogramm des Spielers DR anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das pBM STB-BK (Baseline) .....	124
<i>Abb. 61.</i> Entwicklung der Separierungsraten für die Merkmale anhand der Phasenmittelwerte ...	126

<i>Abb. 62.</i> Dendrogramm des Spielers SW anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das psBM Standbein (Baseline) .....	128
<i>Abb. 63.</i> Dendrogramm des Spielers SW anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das psBM Schussbein (Baseline) .....	128
<i>Abb. 64.</i> Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-independent) .....	131
<i>Abb. 65.</i> Dendrogramm des Spielers SE anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-independent) .....	131
<i>Abb. 66.</i> Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LVS-LLS (Keeper-independent) .....	133
<i>Abb. 67.</i> Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LLS-STB (Keeper-independent) .....	134
<i>Abb. 68.</i> Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Keeper-independent) .....	134
<i>Abb. 69.</i> Dendrogramm des Spielers CS anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-independent) .....	137
<i>Abb. 70.</i> Dendrogramm des Spielers MM anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-independent) .....	137
<i>Abb. 71.</i> Dendrogramm des Spielers MM anhand der Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Vergleich Baseline mit Keeper-independent); Nummerierung: 1-12 und 25-38 = links; 13-24 und 39-48 = rechts .....	140
<i>Abb. 72.</i> Dendrogramm des Spielers ML anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-dependent) .....	143
<i>Abb. 73.</i> Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-dependent) .....	143
<i>Abb. 74.</i> Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LVS-LLS (Keeper-dependent) .....	145
<i>Abb. 75.</i> Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LLS-STB (Keeper-dependent) .....	146
<i>Abb. 76.</i> Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Keeper-dependent) .....	146
<i>Abb. 77.</i> Dendrogramm des Spielers MR1 anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-dependent) .....	148
<i>Abb. 78.</i> Dendrogramm des Spielers ML anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-dependent) .....	149
<i>Abb. 79.</i> Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Vergleich Baseline mit Keeper-dependent); Nummerierung: 1-12 und 25-35 = links; 13-24 und 36-48 = rechts .....	151
<i>Abb. 80.</i> Dendrogramm des Spielers AM anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Point of no return) .....	154
<i>Abb. 81.</i> Dendrogramm des Spielers MR2 anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Point of no return) .....	155

---

<i>Abb. 82.</i> Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LVS-LLS (Point of no return) .....	157
<i>Abb. 83.</i> Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LLS-STB (Point of no return) .....	157
<i>Abb. 84.</i> Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Point of no return).....	158
<i>Abb. 85.</i> Dendrogramm des Spielers DJ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Point of no return).....	160
<i>Abb. 86.</i> Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Point of no return).....	160
<i>Abb. 87.</i> Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Vergleich Baseline mit Point of no return (PONR)); Nummerierung: 1-12 und 25-38 = links; 13-24 und 39-48 = rechts .....	163
<i>Abb. 88.</i> Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Winkel-Verläufe gBM .....	194
<i>Abb. 89.</i> Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Winkelgeschwindigkeit gBM .....	201
<i>Abb. 90.</i> Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Winkelgeschwindigkeit gBM .....	208

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1. Durchschnittliche Schusspräzision (Standardabweichung) und Blickverhalten bei Strafstoßen mit Torwart (Wood & Wilson, 2010a, S. 304).....	60
Tab. 2. Chronologie von Bewegungshinweisen des Strafstoßschützen zur Antizipation der Schussrichtung (mod. nach Dicks et al., 2010, S. 1114) .....	62
Tab. 3. Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der kinematischen Daten für beide Experteniveaus bei ruhenden und rollenden Bällen; c = signifikante Effekte zwischen Bedingungen; g = signifikante Effekte zwischen Gruppen (Egan et al., 2007, S. 429).....	68
Tab. 4. Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der kinematischen Daten für die Untersuchungsbedingungen (Teixeira, 1999, S. 787) .....	69
Tab. 5. Unterschiede zwischen den Spielerpositionen für die bestimmten Merkmale (vgl. Amiri-Khorasani et al., 2009, 23).....	70
Tab. 6. Durchschnittswerte und Standardabweichungen kinematischer und resultatbezogener Merkmale. TD = touch down; + = Signifikanz ( $p < 0,05$ ) zwischen Naturrasen und Kunstrasen (Gemisch); # = Signifikanz ( $p < 0,05$ ) zwischen Kunstrasen (Gemisch) und Kunstrasen (Granulat); n.s. = keine Signifikanz (Potthast, 2010, S. 32).....	71
Tab. 7. Personenbezogene Informationen zu den Strafstoßschützen .....	78
Tab. 8. Verteilung der Spieler auf die Untersuchungsbedingungen .....	79
Tab. 9. Körpermarker (vgl. Vicon Motion Systems, Oxford) .....	83
Tab. 10. Berechnete Genauigkeit der Markerprojektionen für die Kamerasensoren nach der Kalibrierung.....	85
Tab. 11. Anzahl an Strafstoßen für die vier Bedingungen .....	91
Tab. 12. Trefferquoten (%) der Bedingungen Baseline und Keeper-independent im Vergleich .....	92
Tab. 13. Trefferquoten (%) der Bedingungen Baseline und Keeper-dependent im Vergleich; PF = Primärfeld, AF = Alternativfeld, WF = Wechselfeld .....	92
Tab. 14. Trefferquoten (%) der Bedingungen Baseline und Point of no return im Vergleich .....	93
Tab. 15. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung (s) der Anlaufzeit (ms) jedes Spielers für die Bedingungen Baseline und Keeper-independent .....	95
Tab. 16. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung (s) der Anlaufzeit (ms) jedes Spielers für die Bedingungen Baseline und Keeper-dependent .....	95
Tab. 17. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung (s) der Anlaufzeit (ms) jedes Spielers für die Bedingungen Baseline und Point of no return .....	95
Tab. 18. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für die Merkmale Winkel-Verlauf, Winkelgeschwindigkeit und Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM.....	97
Tab. 19. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM (Baseline).....	106
Tab. 20. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline) .....	109
Tab. 21. Separierungsquoten (%) für die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Baseline).....	112

Tab. 22. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei pBM (Baseline).....	116
Tab. 23. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei pBM (Baseline) .....	119
Tab. 24. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei pBM (Baseline).....	122
Tab. 25. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse vier richtungsspezifischer Hinweisreize anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei psBM (Baseline) .....	127
Tab. 26. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Keeper-independent) .....	130
Tab. 27. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM (Keeper-independent) .....	133
Tab. 28. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse für das psBM Standbein (Keeper-independent) .....	136
Tab. 29. Gruppenbezogene Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für die Bedingungen Baseline und Keeper-independent im Vergleich bei gBM, pBM und psBM.....	139
Tab. 30. Separierungsquoten (%) der kombinierten Clusteranalyse über Baseline und Keeper-independent anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM, pBM und psBM; * = zusätzliche Separierung nach Bedingungen erkennbar .....	139
Tab. 31. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Keeper-dependent).....	142
Tab. 32. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM (Keeper-dependent).....	145
Tab. 33. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse für das psBM Standbein (Keeper-dependent).....	148
Tab. 34. Gruppenbezogene Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für die Bedingungen Baseline und Keeper-dependent im Vergleich bei gBM, pBM und psBM .....	150
Tab. 35. Separierungsquoten (%) der kombinierten Clusteranalyse über Baseline und Keeper-dependent anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM, pBM und psBM; * = zusätzliche Separierung nach Bedingungen erkennbar .....	150
Tab. 36. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Point of no return).....	153
Tab. 37. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung (s) der Verarbeitungszeit (ms) bei Strafstoßen mit einem Wechsel der Schussrichtung (Point of no return) .....	154
Tab. 38. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM (Point of no return).....	156
Tab. 39. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse für das psBM Standbein (Point of no return) .....	159
Tab. 40. Gruppenbezogene Separierungsquoten (%) der Clusteranalysen anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für die Bedingungen Baseline und Point of no return im Vergleich bei gBM, pBM und psBM .....	162

---

Tab. 41. Separierungsquoten (%) der kombinierten Clusteranalyse über Baseline und Point of no return anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM, pBM und psBM; * = zusätzliche Separierung nach Bedingungen erkennbar.....	162
Tab. 42. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für das Merkmal Winkel-Verlauf bei pBM.....	185
Tab. 43. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für das Merkmal Winkelgeschwindigkeit bei pBM.....	186
Tab. 44. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für das Merkmal Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM .....	187

# 1 Einleitung

„Das Team, das während des Spiels mehr Tore erzielt, hat gewonnen“ (Deutscher Fußball-Bund, 2010, S. 65). Dieser einfache Spielgedanke ist die Grundlage für eines der populärsten und faszinierendsten Spiele auf der Welt, dem tagtäglich Aktive wie Zuschauer mit Begeisterung und Treue folgen, seitdem die Sportart Fußball Ende des 19. Jahrhunderts aus England seinen erfolgreichen Weg in die weite Welt begann. Die Faszination des Fußballs lebt neben der Einfachheit des Spiels stark durch die Unberechenbarkeit des Spieldausgangs und somit durch die Entscheidung über Sieger und Verlierer. Durch die große Anzahl der beteiligten Spieler sind komplexe Handlungsweisen und taktische Finessen beider Mannschaften auf dem Spielfeld realisierbar, die eine Vorhersage des Spielergebnisses nicht zulassen und stets den Ausgang offen halten. Über die Spielzeit treten viele Spielszenen auf, die bei den Zuschauern für Aufregung oder Spannung sorgen, und sie in ihren Bann ziehen. Jedoch erreicht die Spannung in einem Spiel zumeist in einer Standardsituation ihren Höhepunkt, nämlich dann, wenn der Pfiff des Schiedsrichters für einen Strafstoß ertönt.

Diese Anspannung konnten Millionen von Zuschauern in der 85. Minute des Endspiels der Weltmeisterschaft 1990 in Italien erleben, als der deutschen Mannschaft ein Strafstoß zugesprochen wurde. Während der Rudelbildung und Diskussionen von argentinischen Spielern mit dem Schiedsrichter trat Brehme demonstrativ an den Elfmeterpunkt und konzentrierte sich auf den bevorstehenden Strafstoß. Brehme nahm den Ball und legte ihn auf den Strafstoßpunkt. Danach wich er zurück und wählte seinen Anlauf. Ein kurzer Weg zum großen Glück. Brehme lief mit vier Schritten Anlauf zum Elfmeterpunkt und schoss den Ball mit der rechten Innenseite auf das Tor. Der Ball traf das Tor flach neben den Pfosten in die linke untere Ecke. Der Torwart wählte die richtige Ecke des Tores für seine Abwehrhandlung aus, doch der Schuss von Brehme war zu präzise ausgeführt. Solch packende Momente konnten ebenso Fußballfans bei der Europameisterschaft 2012 erleben. Sowohl Schützen als auch Torhüter zeigten außergewöhnliche Leistungen im direkten Duell zweier Spieler, das als Umsetzung des elementaren Grundgedankens des Spiels „Tore schießen - Tore verhindern“ (vgl. Dietrich, Dürrwächter & Schaller, 2007) angesehen werden kann. Doch worin liegt die Kunst, einen Strafstoß als Torhüter zu halten? Und welche Strategien können Schützen einsetzen, um erfolgreich aus diesem Duell hervorzugehen?

Aus wahrnehmungsbasierter Perspektive liegen zahlreiche Untersuchungen vor, die Erkenntnisse zu richtungsspezifischen Hinweisreizen in der Bewegungsausführung des Schützen liefern (u.a. Franks & Harvey, 1997; McMorris & Colenso, 1996; Williams & Burwitz, 1995). Die subjektiv erfassten Merkmale zur Antizipation sind in Trainingsprogrammen zur Schulung der Wahrnehmung durch eine erhöhte Vorhersagegenauigkeit der Schussrichtung bestätigt worden (vgl. McMorris & Hauxwell, 1997). Auch die kontinuierliche Erfassung der Blickrichtungen von Torhütern bei der Beobachtung von Strafstoßausführungen zeigen, dass erfahrene Torhüter ge-



zielt Körperbereiche anvisieren, um Informationen über die Schussrichtung bereits vor dem Ballkontakt zu gewinnen. Jedoch stellen die Fixierungen nur einen Ausschnitt der Blickrichtungen dar. Zudem kann keine Aussage darüber getroffen werden, welche Informationen über peripheres Sehen aufgenommen werden.

Eine objektive Bestimmung richtungsspezifischer Unterschiede in der Bewegungsausführung ist dagegen in wenigen kinematischen Studien aufzufinden, die aber zumeist die Analyse auf diskrete Zeitpunkte in der Bewegung beschränken (vgl. Goktepe, Karabork, Ak, Cicek & Korkusuz, 2008; Lees & Owens, 2011). Einen alternativen Ansatz wählen Diaz, Fajen und Phillips (2012) mit einer verlaufsorientierten kinematischen Analyse in der Strafstoßsituation. Die zeitkontinuierliche Betrachtung über verlaufsorientierte Bewegungsmuster bietet die Möglichkeit, Aussagen über die Struktur und den Verlauf einer Bewegung über die Zeit zu treffen. Dieser methodische Zugang erreicht neben der quantitativen Erfassung von Bewegungsmerkmalen auch qualitative Ausprägungen im Bewegungsmuster. Eine prozessorientierte Bewegungsanalyse ist über holistische Verfahren möglich. Diese Verfahren können aufgrund der datenreduzierenden Eigenschaften komplexe Bewegungsmuster verarbeiten, die den gesamten Körper in der Bewegung abbilden. Diaz et al. (2012) binden in ihrer Untersuchung keinen Torwart bei der Ausführung der Strafstöße ein, so dass Handlungsstrategien von Schützen, welche bei Strafstößen im Wettspiel immer angewendet werden, keine Berücksichtigung finden. Die Wahl der Strategie könnte aber Einfluss auf die Bewegungsausführung haben und weitere Erkenntnisse liefern.

Aus diesen Gegebenheiten ist das Ziel der Arbeit unter Einsatz eines holistischen Verfahrens, eine Mustererkennung über prozessorientierte Bewegungsmuster in der Strafstoßsituation durchzuführen. Die Untersuchung wird über vier quasi-experimentelle Aufgabenstellungen realisiert, welche die strategischen Handlungsmöglichkeiten eines Schützen und somit wettspielnahe Strafstoßsituationen integrieren.

## 2 Forschungsstand

### 2.1 Analyse sportlicher Bewegungen

„Unter Bewegungsanalysen werden verschiedene Verfahren zur Erfassung und Erklärung von sportlichen Bewegungen zusammengefasst“ (Meinel & Schnabel, 2007, S. 397). Das Ziel einer Bewegungsanalyse ist die Erforschung von Bewegungsstrukturen, -prinzipien, -funktionen und -eigenschaften (vgl. Göhner, 1992, S. 74). Eine sportliche Bewegung kennzeichnet eine feststellbare Ortsveränderung von Mensch und Gerät während der Sportausübung (vgl. Ballreich, 1996, S. 2). Dabei können sportliche Bewegungen qualitativ und quantitativ beschrieben und erforscht werden. Eine quantitative Herangehensweise misst die Ausprägung bzw. Größe eines biomechanischen Beschreibungsmerkmals für eine zielgerichtete Bewegung mittels kinematischer, dynamometrischer und elektrophysiologischer Verfahren. Im Gegensatz können qualitative Analysen – z.B. anhand einer morphologischen Bewegungsanalyse – Bewegungsabläufe beschreiben.

Die quantitative Analyse von sportlichen Bewegungen kann mittels eines resultatbezogenen oder verlaufsorientierten Ansatzes erfolgen (vgl. Jaitner, 2002b, S. 63). Bei einer resultatbezogenen Betrachtung von Bewegungen werden für Knotenpunkte des Bewegungsablaufes Variablen erfasst, so dass zu konkreten Zeitpunkten die Ausprägung eines zeitdiskreten Merkmals vorliegt. Diese Zeitpunkte können den Beginn und das Ende einer Bewegungsphase oder den Zeitpunkt der größten Ausprägung von Variablen darstellen (vgl. Menzel, 2000). Beispiele aus der Praxis wären der Standbeinaufsatz beim Sprint, der Fuß-Ballkontakt beim Schießen im Fußball oder die Abwurfposition im Basketball. Diese stroboskopische Beschreibung der Bewegung ist eingeschränkt auf die Größe der erfassten Merkmale und charakterisiert Bewegungszustände, kann aber keine Aussagen über den zeitlichen Verlauf oder die Struktur treffen. Im Gegensatz zur diskreten Analyse erfasst eine zeitkontinuierliche Untersuchung den vollständigen Verlauf einer Variable oder sogar einer Bewegung (vgl. Baumann, Preiß & Schöllhorn, 1996, S. 161; Button, Davids & Schöllhorn, 2006, S. 142).

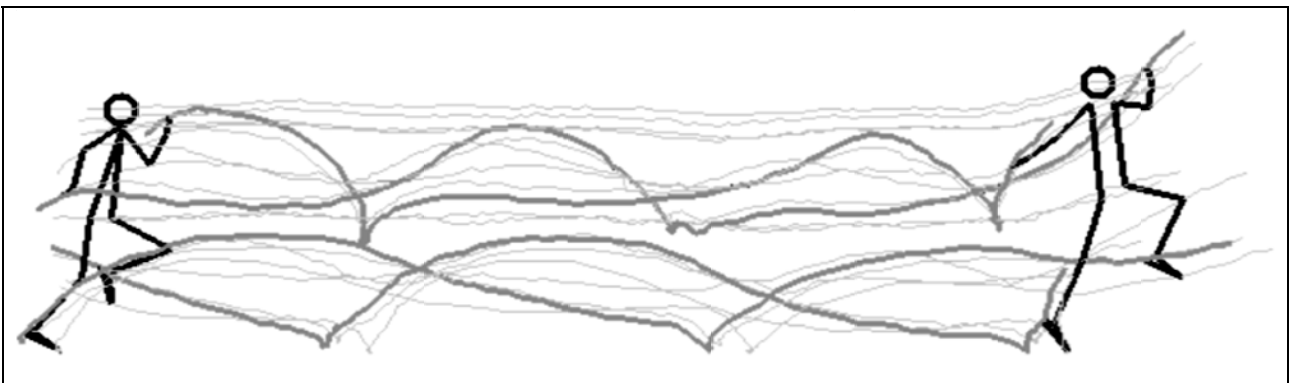


Abb. 1. Zeitdiskrete (schwarz) und zeitkontinuierliche (grau) Merkmale im Vergleich (Jaitner, 2002b, S. 63)

Eine Herangehensweise zur verlaufsorientierten Analyse stellt die Methode ‚coordination profiling‘ dar (vgl. Button et al., 2006, S. 138). Mittels dieses Ansatzes können für Individuen Koordinationsprofile bei bestimmten Aufgaben unter gewissen Bedingungen erstellt werden. Hierzu sind zahlreiche Versuche eines Individuums in einer Aufgabenstellung erforderlich, um eine Profilierung im Bewegungsmuster erkennen zu können. Der Ansatz des ‚coordination profiling‘ rückt ab von der gruppenweisen Betrachtung relevanter Bewegungsmerkmale sowie der Präsentation Individuen übergreifender Ergebnisse anhand von Gruppenmittelwerten oder -streuungen (vgl. Button et al., 2006, S. 138-139). „Because each person possesses his or her own ‚signature‘, it makes little sense to average performance over individuals“ (Kelso, 1995, zitiert nach Button et al., 2006, S. 136). Ein Experiment von Button, Bennett und Davids (1998) verglich diskrete und rhythmische Greifbewegungen und die Autoren werteten die Daten gruppenweise und Individuen bezogen aus. Die gruppenweise Analyse ergab keine Unterschiede in den Greifbewegungen beim Vergleich der beiden Bedingungen. Anhand der individuellen Datenanalyse konnte aber eine intra-individuelle Variabilität in den Greifbewegungen erkannt werden. Die Probanden zeigten im Vergleich zur diskreten Bedingung bei der rhythmischen Greifbewegung die Tendenz entweder früher oder später das Greifen zu initialisieren. Der Vergleich beider methodischen Vorgehen verdeutlicht, dass durch gruppenweise Betrachtung der Messwerte aufgrund von inter-individueller Variabilität Effekte nivelliert werden können, obwohl unterschiedliche Strategien bzw. Muster im Bewegungsverlauf zwischen den Individuen zu erkennen waren (vgl. Button et al., 2006, S. 139).

Entsprechend der Variablenauswahl unterscheidet Jaitner (2002b, S. 63) zwischen holistischen und elementaristischen Analysen. Ein holistisches Vorgehen ermöglicht unter Berücksichtigung einer großen Anzahl beschreibender Bewegungsmerkmale eine Strukturierung von Bewegungsklassen (Springen, Laufen, Werfen) oder -techniken und deren Varianten. Bei einer elementaristischen Analyse werden einzelne oder eine kleine Gruppe von Variablen prozessorientiert betrachtet (vgl. Jaitner, 2002b, S. 63). Die beschreibenden Merkmale beider Betrachtungsweisen zur Abbildung des Bewegungsvollzuges gestalten jeweils ein Bewegungsmuster. Nach Schmidt (2010) stellt ein Bewegungsmuster eine Grundstruktur von Bewegungen dar und sollte die vollständige kinematische Kette enthalten, welche an der Realisierung der Bewegung beteiligt ist. Schorer, Baker, Fath und Jaitner (2007, S. 410-411) definieren in ihrer Studie zur Analyse des Siebenmeterwurfs ein komplexes Bewegungsmuster auf Basis der Zeitreihen von Variablen, die bezogen auf eine Bewegung ausgewählt werden. Diese Begriffsbestimmung ermöglicht eine flexible Handhabung im Umgang mit der Variablenauswahl. Der Definition entsprechend kann ein Bewegungsmuster aus verlaufsorientierten Daten einzelner Segmente bestehen, wohin gegen Schmidt (2010) nach ihrer Abgrenzung des Begriffs Bewegungsmuster stets die vollständige kinematische Kette erfasst.

### 2.1.1 Elementaristische Verfahren zur Bewegungsanalyse

Die Analyse der zeitkontinuierlichen Daten kann unter Verwendung von kontinuierlichen relativen Phasen (CRP), Vektorkodierung, Kreuzkorrelation und normierten quadrierten Mittelwerten (NoRMS) erfolgen. Die Verfahren können einen Einblick in die Bewegungsstruktur und Aufschluss über die Variabilität eines Bewegungsmusters geben (vgl. Hamill, Haddad & McDermott, 2000; Wilson, Gittoes & Heywood, 2008; Wilson, Simpson, Hamill & Van Emmerik, 2007; Wilson, Simpson, van Emmerik & Hamill, 2008).

„CRP indicates the phase relation between two oscillating segments at each sampled data point throughout the cycle of movement“ (Wheat & Glazier, 2006, S. 170). Berechnen lassen sich CRP über die Differenz von relativen Phasenwinkeln proximaler und distaler Körpersegmente. Der relative Phasenwinkel koppelt räumliche und zeitliche Ausprägungen eines sich bewegenden Körpersegments über den Bewegungsablauf hinweg. Die Bestimmung eines relativen Phasenwinkels für jedes Segment wird durch folgende Formel berechnet:

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \frac{\dot{\theta}(t)}{\theta(t)}$$

Der Phasenwinkel  $\varphi$  ergibt sich aus dem Arkustangens des Quotienten Winkelgeschwindigkeit ( $\dot{\theta}$ ) und Winkel ( $\theta$ ) zu einem Zeitpunkt  $t$ .

Ein Einsatz dieses Verfahrens wurde in Studien zur Prävention von Laufverletzungen (vgl. Dierks & Davis, 2007), dem Einfluss des Quadrizepswinkels auf Patellarsehnenreizungen (vgl. Heiderscheit, Hamill & Van Emmerik, 1999), zum Vergleich von Koordinationsmustern des Gehens und Laufens (vgl. Li, Van den Bogert, Caldwell, van Emmerik & Hamill, 1999) und der Koordination von Oberkörper- und Hüftrotation beim Gehen und Laufen (vgl. Seay, Van Emmerik & Hamill, 2011; van Emmerik & Wagenaar, 1996) eingesetzt.

Beispielsweise untersuchten Li et al. (1999) die Bewegungsmuster des Gehens und Laufens bei gleicher Geschwindigkeit und Schrittfrequenz auf einem Laufband. Die CRP wurde für die Phasenwinkel im Oberschenkel ( $\theta_T$ ) und Bein ( $\theta_L$ ) berechnet (Abbildung 2). Um Aussagen über die Variabilität der CRP (VCRP) im Bewegungszyklus treffen zu können, berechneten die Autoren die durchschnittliche Standardabweichung jedes zeitlichen Messpunktes über alle Zyklen. Die Ergebnisse zeigten viele Ähnlichkeiten zwischen den CRP von Geh- und Laufmustern (Abbildung 3). Außer dem Bereich von 20%-40% des Bewegungszyklus traten keine großartigen Unterschiede zwischen den CRP auf. Die Variabilität bei Geh- und Laufmustern zeigte ähnliche Ausmaße, wobei die intra-individuelle Analyse für mehrere Probanden größere Variationen in den VCRP für Geh- oder Laufmuster aufwies. „Therefore, increases in variability of relative phase can possibly identify transitions from one stable pattern to another“ (Li et al., 1999, S. 81). Entsprechende Ergebnisse lieferte die Studie von van Emmerik und Wagenaar (1996) über Rotationsbewegungen zwischen Brustkorb und Hüfte bei den Übergängen von Gehen

und Laufen. Größere Variabilität der CRP deutete auf einen Übergang zwischen zwei Bewegungsmustern hin.

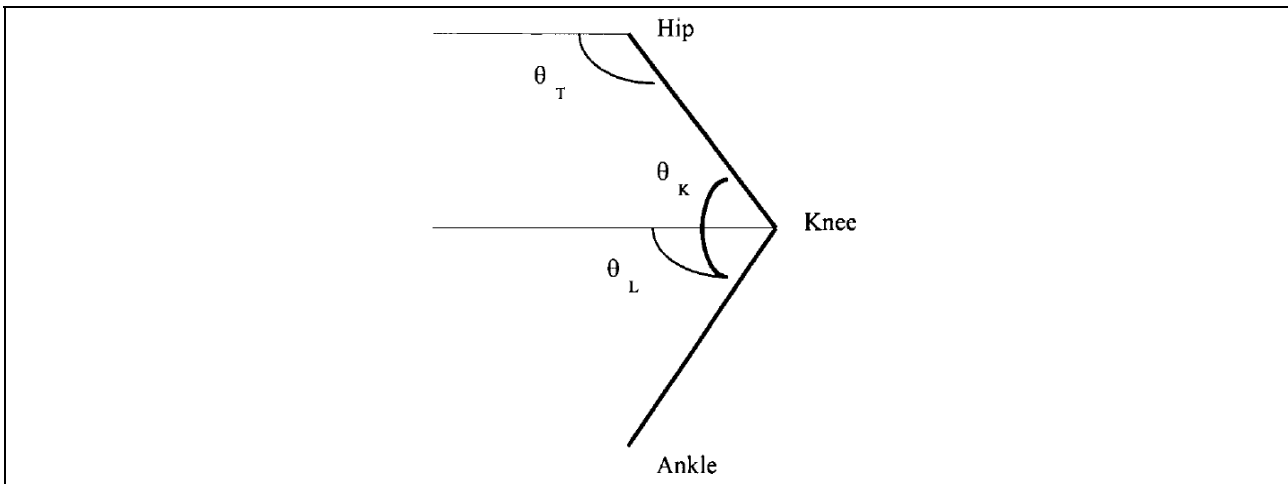


Abb. 2. Definition der Winkel Oberschenkel ( $\theta_T$ ), Bein ( $\theta_L$ ) und Knie ( $\theta_K$ ) (Li et al., 1999, S. 68).

Das Verfahren besitzt den Vorteil, dass es nicht nur räumliche (Winkel-Verlauf), sondern auch zeitliche (Winkelgeschwindigkeit) Merkmale bei der Berechnung berücksichtigt. Dies führt zu einer höher-dimensionalen und detaillierteren Analyse des Bewegungsverhaltens. Zudem stellen durch Einbindung der Winkelgeschwindigkeit CRP ein sensibleres Maß zur Bestimmung der Variabilität dar (vgl. Hamill et al., 2000, S. 413; Wheat & Glazier, 2006, S. 175). Ein Nachteil ist die eingeschränkte Verwendbarkeit für sinusförmige Gelenkverläufe. Über Normalisieren und Transformieren der Daten könnte jedoch der Verlauf sinusförmiger gestaltet und somit die Verwendung für CRP ermöglicht werden.

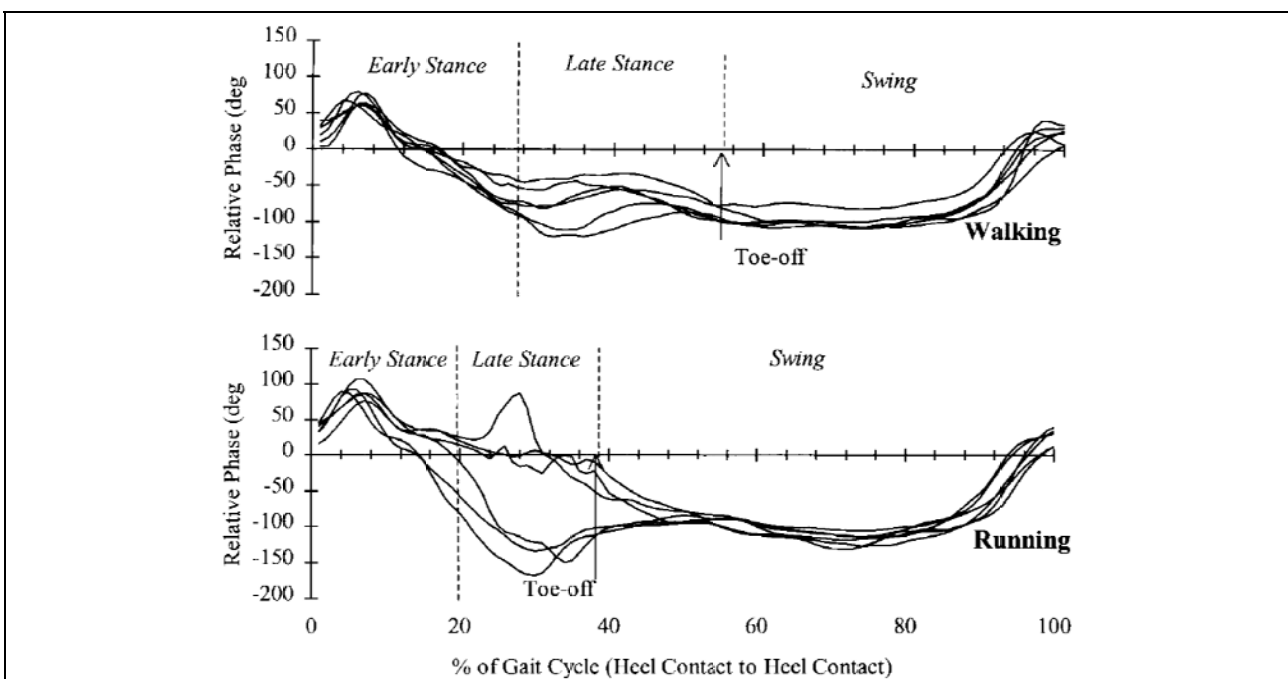


Abb. 3. CRP der Geh- und Laufmuster von sechs Probanden (Li et al., 1999, S. 77).

Vektorkodierung basiert auf einer Kettenverschlüsselungstechnik, um beispielsweise Winkel-Winkel-Verläufe abzubilden (vgl. Tepavac & Field-Note, 2001, S. 260). Dazu werden die Verläufe auf ein Gitternetz mittels Zifferkodierung digitalisiert. Der Verlauf der Winkel-Winkel-Trajektorie wird bildweise über Zuweisung einer Ziffer abgebildet (Abbildung 4). Die Ziffer einer achtstufigen Skala enthält Informationen über die relative Position des Punktes zum vorherigen Punkt der Trajektorie (vgl. Tepavac & Field-Note, 2001, S. 260; Wheat & Glazier, 2006, S. 176). Verwendung fand dieses Verfahren u.a. in Expertise-Studien zur Bestimmung der Variabilität in Bewegungsmustern (Wilson et al., 2007; Wilson et al.; 2008). Die Bewegungsmuster umfassten den Winkel-Verlauf des proximalen und distalen Gelenks eines Beinsegments (Ober- oder Unterschenkel).

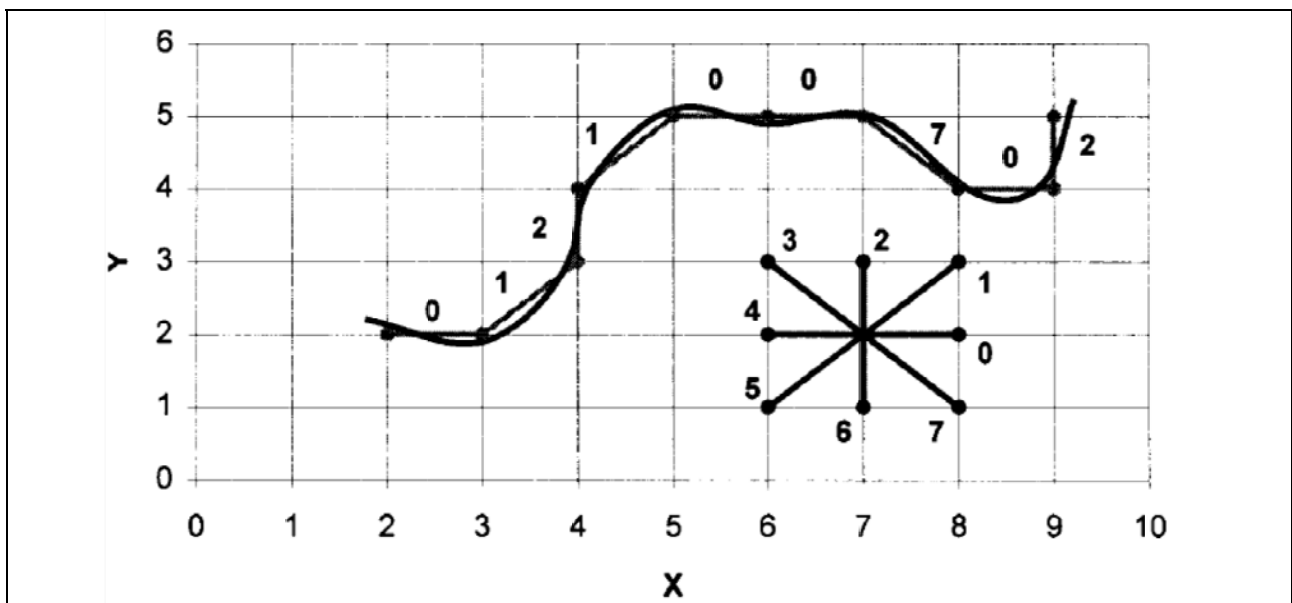


Abb. 4. Vektorkodierung einer Kurve (Tepavac & Field-Note, 2001, S. 261)

In der Disziplin Dreisprung untersuchten Wilson et al. (2007, 2008) die intra-segmentale Variabilität im Übergang vom ersten zum zweiten Sprungschritt bei verschiedenen Leistungsniveaus (fünf Probanden). Innerhalb der Trainingsgruppe sprangen die Athleten im Verhältnis zum Weltrekord 70%-86% der Weite. Anhand der kodierten Winkel-Winkel-Graphen von Sprung-/Kniegelenk und Knie-/Hüftgelenk des Standbeins sowie Knie-/Hüftgelenk des Schwungbeins bestätigte sich die Annahme der Autoren nicht, dass Probanden mit höherem Leistungsniveau größere Variabilität im Bewegungsmuster zeigen würden. Die Ergebnisse präsentierten einen U-förmigen Verlauf der Variabilität im Bewegungsmuster von geringerer zu größerer Sprungweite. Somit deutete die Analyse für diese Trainingsgruppe aufgrund der Sprungfähigkeiten drei Phasen der Bewegungskoordination an, obwohl die Probanden alle als Experten eingestuft wurden. Neben Veränderungen der Bewegungsmuster sowie der Variabilität beim Erlernen einer neuen Bewegung, können nach Wilson et al. (2008, S. 7) innerhalb eines Expertiseniveaus ebenso Entwicklungsstufen in den Bewegungsmustern vorliegen, die sich durch veränderte Variabilität zeigen.

Das Verfahren besitzt den Vorteil, dass die Daten ohne Manipulation verwendet werden können. Die räumlichen Ausprägungen müssen nicht durch eine Normalisierung verändert werden. Nachteil dieses Verfahrens ist das Fehlen von zeitlichen Informationen über die Bewegung (vgl. Wheat & Glazier, 2006, S. 179).

Das Verfahren der Kreuzkorrelation basiert auf der Annahme, „that linear relationships exist between two sets of kinematic time series data (e.g. pairs of joints) but do not assume that these variables change in synchrony during the movement“ (Mullineaux et al., 2001, zitiert nach Glazier, Davids & Bartlett, 2003, S. 3). Über Berechnung des Korrelationskoeffizienten lassen sich Aussagen über den Kopplungsgrad zweier Körpersegmente treffen sowie die Stabilität von Bewegungsmustern anhand mehrerer Versuche bestimmen. Die Interpretation der resultierenden Koeffizienten der Kreuzkorrelation müssen mit Bedacht vorgenommen werden, da unterschiedliche Vergleiche von Variablen-Zeit-Verläufen gleiche Koeffizienten ergeben können. Durch gemeinsame Betrachtung mit beispielsweise Winkel-Winkel-Abbildungen kann eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse abgesichert werden. Ein Vorteil ist, dass keine Normalisierung notwendig ist, wenn die Daten linear sind. Eine Anwendung dieses Verfahrens bei nicht-linearen Beziehungen zwischen Körpersegmenten ist nicht geeignet und schränkt somit die Anwendung dieses Verfahrens ein (vgl. Glazier et al., 2003, S. 3). Kreuzkorrelationen wurden beispielsweise in Studien zur Bestimmung der Reorganisation der Fangbewegung bei unterschiedlichen Ballgeschwindigkeiten (vgl. Mazyn, Montagne, Savelsbergh & Lenoir, 2006) oder dem Einfluss des Übens im Dartwurf angewendet (vgl. Jeansonne, 2003). Exemplarisch wird im Folgenden die Studie von Mazyn et al. (2006) über die Reorganisation der Fangbewegung erläutert.

Mazyn et al. (2006) ließ Probanden über sieben Geschwindigkeitsstufen jeweils 20 Tennisbälle mit einer Hand fangen. Es wurden Kreuzkorrelationen zwischen den Gelenken Schulter, Ellbogen und Hand in die Analyse aufgenommen. Anhand der gemittelten Koeffizienten der Kreuzkorrelationen jeder Geschwindigkeitsstufe wurde eine Varianzanalyse ausgeführt, um mögliche Veränderungen im Bewegungsmuster zu quantifizieren. Die Zeit für die Greifbewegung ist unabhängig von den Geschwindigkeitsstufen immer zum gleichen Zeitpunkt initiiert worden. Jedoch konnte eine weitere Öffnung der Hand in kürzerer Zeit vor der Greifbewegung bei höheren Geschwindigkeiten festgestellt werden (Abbildung 5). Die Koeffizienten der Kreuzkorrelation bei prozessorientierter Betrachtung von Handgelenksgeschwindigkeit und Handöffnung zeigten deutlich einen Effekt der Ballgeschwindigkeit auf das Bewegungsmuster. Wurden bei niedrigen Geschwindigkeiten die Bewegungsabschnitte Hinführen, Öffnen und Schließen der Hand nacheinander ausgeführt, verschmelzen die Bewegungsabschnitte mehr und mehr und laufen schließlich bei hohen Ballgeschwindigkeiten simultan ab. Ebenso konnten Veränderungen in der Bewegungskoordination über die Kreuzkorrelationen Schulter-Hand und Ellbogen-Hand festgehalten werden.

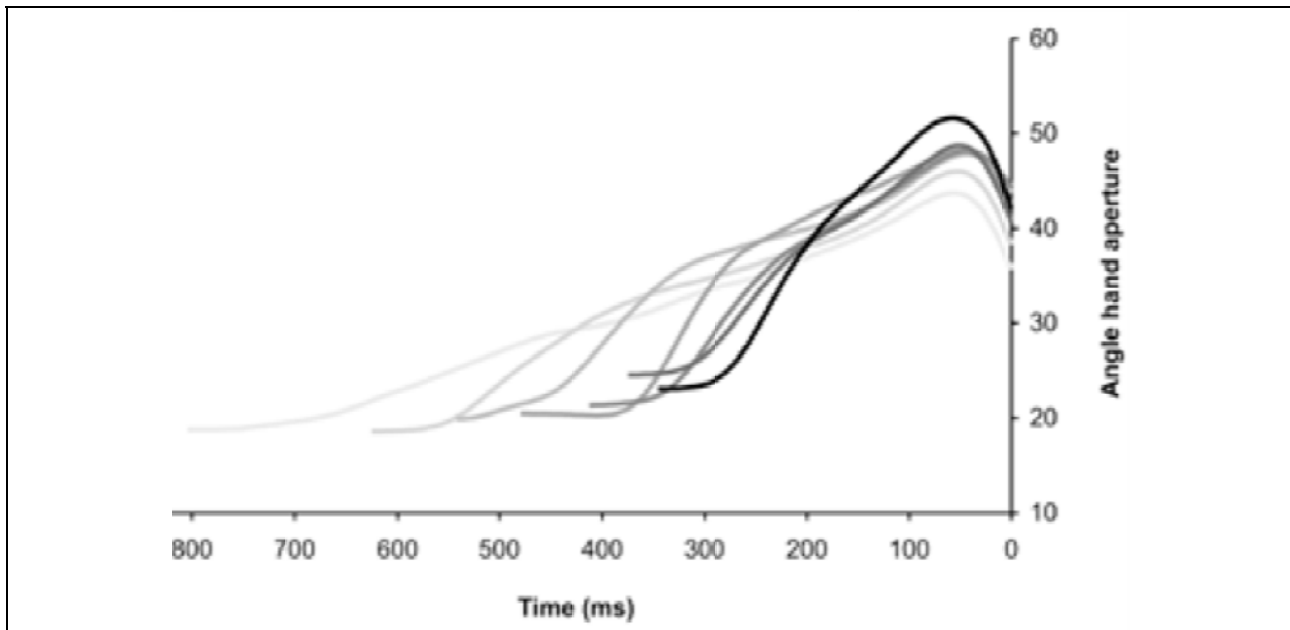


Abb. 5. Zeitlicher Winkel-Verlauf der Handöffnung beim Fangen (Mazyn et al., 2006, S. 151)

Ein weiteres Verfahren basiert auf den normalisierten quadrierten Mittelwerten (NoRMS). Sie messen die Konsistenz oder die Variabilität von Winkel-Winkel-Trajektorien. „By measuring the resultant distance between the angle-angle coordinate of a curve and the angle-angle coordinate of the mean curve at each instant, a root mean square difference is calculated at each point in time“ (Wheat & Glazier, 2006, S. 180). Die Variabilität zeigt sich in Veränderungen der Größe und Form der aufgezeigten Winkel-Winkel-Trajektorien. Darüber hinaus kann aber keine Feststellung über die Koordination zwischen den Segmenten erfolgen (vgl. Wheat & Glazier, 2006, S. 180). Zudem gibt die Berechnung einen Einzelwert als Ergebnis zurück, der keine Aussage zulässt über die funktionale Anpassung der Bewegung im Verlauf einer Bewegungsausführung. Dieses Verfahren findet laut Wheat und Glazier (2006, S. 180-181) in der Biomechanik keine große Anwendung.

### **2.1.2 Holistische Verfahren zur Bewegungsmustererkennung**

Über die im ersten Abschnitt beschriebenen prozessorientierten Verfahren zur Analyse von Bewegungen berücksichtigen holistische Verfahren, die ebenso eine zeitkontinuierliche Beschreibung der Bewegung vornehmen, eine größere Anzahl an Variablen sowie deren Wechselspiel. Anhand komplexer Bewegungsmuster, die sich z. B. aus Größen der Kinematik, Dynamik oder Elektromyographie zusammensetzen können, werden umfassende Bewegungsmodelle gebildet, die zusätzliche Informationen über die Bewegung generieren. Zur Analyse von komplexen Bewegungsmustern stehen lineare und nicht-lineare Verfahren zur Verfügung. Im Folgenden werden die Verfahren Faktorenanalyse, Support Vector Machine, Verfahren linearer Distanzmaße und Künstliche Neuronale Netze sowie ihre Einsatzmöglichkeiten anhand der Ergebnisse ausgewählter Studien erläutert.



### 2.1.2.1 *Faktorenanalyse*

Ein lineares Verfahren aus dem Bereich der Faktorenanalyse stellt die Hauptkomponentenanalyse (PCA) dar, mit deren Hilfe Techniken analysiert und Bewegungsmuster erkannt werden können (vgl. Bockemühl, Troje & Dürr, 2010; Bourne, Bennett, Hayes & Williams, 2011; Coffey, Harrison, Donoghue & Hayes, 2011; Daffertshofer, Lamoth, Meijer & Beek, 2004; Darwish et al., 1997; Donà, Preatoni, Rodano & Cobelli, 2007; Helwig, Hong & Polk, 2012; Huys, Smeeton, Hodges, Beek & Williams, 2008; Laffaye, Bardy & Durey, 2007; Lamoth, Daffertshofer, Huys & Beek, 2009; Maurer, Federolf, von Tscherner, Stirling & Nigg, 2012; Mazyn, Savelsbergh, Lenoir & Montagne, 2007; Post, Daffertshofer & Beek, 2000; Reid, Graham & Costigan, 2010; Smeeton & Huys, 2011; Witte, Schobesberger & Peham, 2009; Wu, Wang & Liu, 2007). Der hauptsächliche Einsatz einer PCA zielt hier auf die kompakte Beschreibung von Bewegungsmustern über eine nicht-redundante Anzahl an Hauptkomponenten oder Faktoren ab. Diese Hauptkomponenten sollen zu großen Anteilen die Varianz der Bewegungsmuster aufklären. Abschließend können durch die PCA Hauptkomponenten von restlichen, unbedeutenden Komponenten separiert werden (vgl. Daffertshofer et al., 2004, S. 426).

Huys et al. (2008) wenden zur Analyse von Bewegungsmustern der Schlagbewegung im Tennis eine PCA an, um Ähnlichkeiten bzw. Unähnlichkeiten zwischen geschlagenen Bällen mit kurzer und langer Distanz sowie den Spielrichtungen ‚inside-out‘ und ‚cross-court‘ anhand kinematischer Merkmale herauszufiltern. Sechs jugendliche wettkämpferfahrene Tennisspielerinnen und -spieler schlugen Bälle mit der Vorhand aus sechs Metern Entfernung auf die vier 0,4x1,0m großen Zielfelder, um die Schlagrichtung bzw. Schlagdistanz zu simulieren (Abbildung 6). Die Schlagbewegung wurde über 18 Marker erfasst (14 Körper- und 4 Schlägermarker). Zur Analyse berücksichtigten die Autoren die vier besten Schläge pro Zielfeld und Proband. Fünf Hauptkomponenten klärten über 96% der Varianz auf. Bei Betrachtung der Variabilität der entsprechenden Eigenvektorkoeffizienten konnte eine ungleiche Verteilung über den Körper sowie Schläger festgestellt werden. Die Variabilität der Eigenvektorkoeffizienten nahm mit den höheren Hauptkomponenten zu. Die Autoren folgerten aufgrund dieser Ergebnisse, dass die Schlagbewegung im Tennis durch eine niedrigdimensionierte Kontrollstruktur geregelt wird (vgl. Huys et al., 2008, S. 1222).

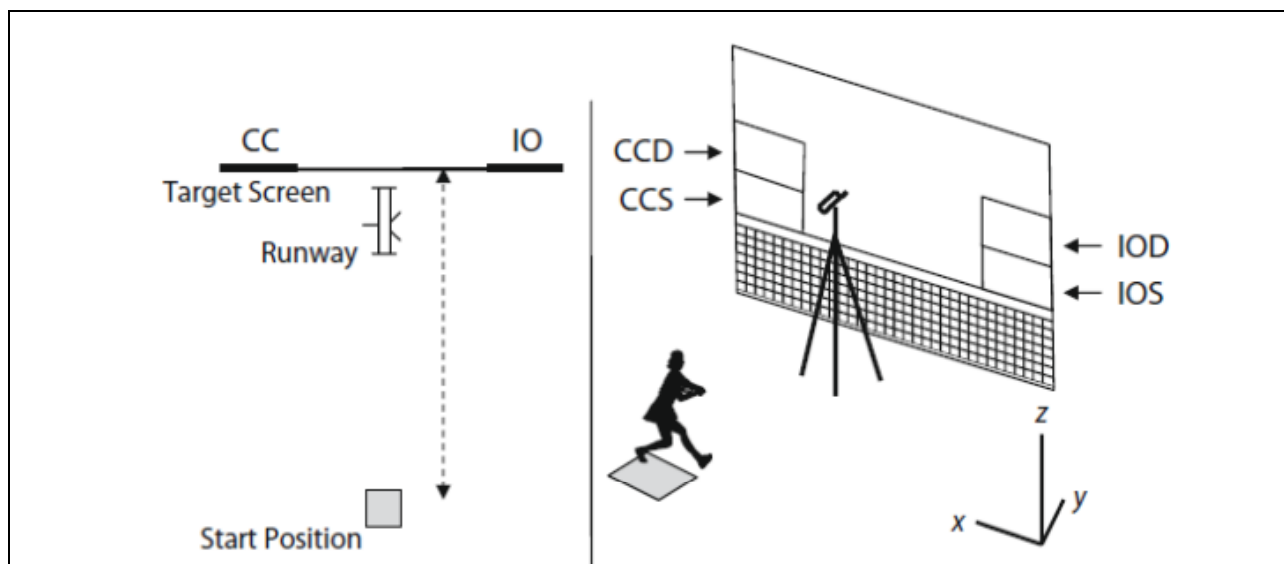


Abb. 6. Versuchsaufbau zur Erfassung diagonaler (CC) und gerader (IO) Vorhandschläge mit kurzer (S) und langer (D) Schlagdistanz (Huys et al., 2008, S. 1219)

Anhand der Eigenvektorkoeffizienten war zudem eine klare Differenzierung zwischen ‚inside-out‘ und ‚cross-court‘ Schlägen in den verschiedenen Bewegungsstrukturen zu erkennen. Am deutlichsten waren die Unterschiede auf der rechten Körperseite und dem Schläger (vor allem in medio-lateraler Richtung) festzustellen. Des Weiteren konnten richtungsspezifische Unterschiede in der Hüfte und den Schultern in alle drei Richtungen sowie dem linken Arm und dem rechten Bein in den Richtungen anterior-posterior und superior-inferior festgehalten werden. In Bezug auf die zeitliche Ausprägung der Schlagbewegung war eine Differenzierung für beide Kriterien Schlagrichtung und -länge erkennbar (vgl. Huys et al., 2008, S. 1222-1223).

Eine PCA wurde auch bei der Untersuchung der Schussbewegung beim Strafstoß im Fußball angewendet, um richtungsspezifische Hinweisreize in den Bewegungsmustern herauszuarbeiten (vgl. Diaz et al., 2012). „PCA was used to extract independent and distributed patterns of lineary related marker translation (e.g. modes)“ (Diaz et al., 2012, S. 5). Die Schüsse von drei Probanden wurden über 45 Körpermarker dreidimensional erfasst. Anhand der Körpermarker konnten unter Verwendung der Vicon IQ Software 18 Körperpunkte bestimmt werden (Abbildung 7). Die Schüsse erfolgten mit einem Schritt Anlauf aus einer Entfernung von 3,66m auf ein aufgehängtes Netz (2,43m Breite), in dem Zielbereiche links und rechts markiert waren. Von jedem Probanden wurden 42 Schüsse analysiert. Die Position jedes Körperpunktes des Modells bestimmten Diaz et al. (2012, S. 5) in Relation zum Marker Nummer 7, der am Rückgrat der Spieler befestigt war. Die resultierende Matrix mit 54 Dimensionen (18 Vektoren der Körperpunkte mit den Komponenten x, y, z) und 126 Schüssen wurde normiert auf die durchschnittliche Anlaufzeit sowie im Anschluss z-transformiert. Basierend auf der Kovarianzmatrix wurden 15 Eigenvektoren für die Analyse ausgewählt. Um Aussagen über die Reliabilität eines Bewegungsmerkmals zu einem bestimmten Zeitpunkt der Schussbewegung im Hin-

blick auf die Schussrichtung treffen zu können, wurde bildweise zusätzlich eine logistische Regression gerechnet.

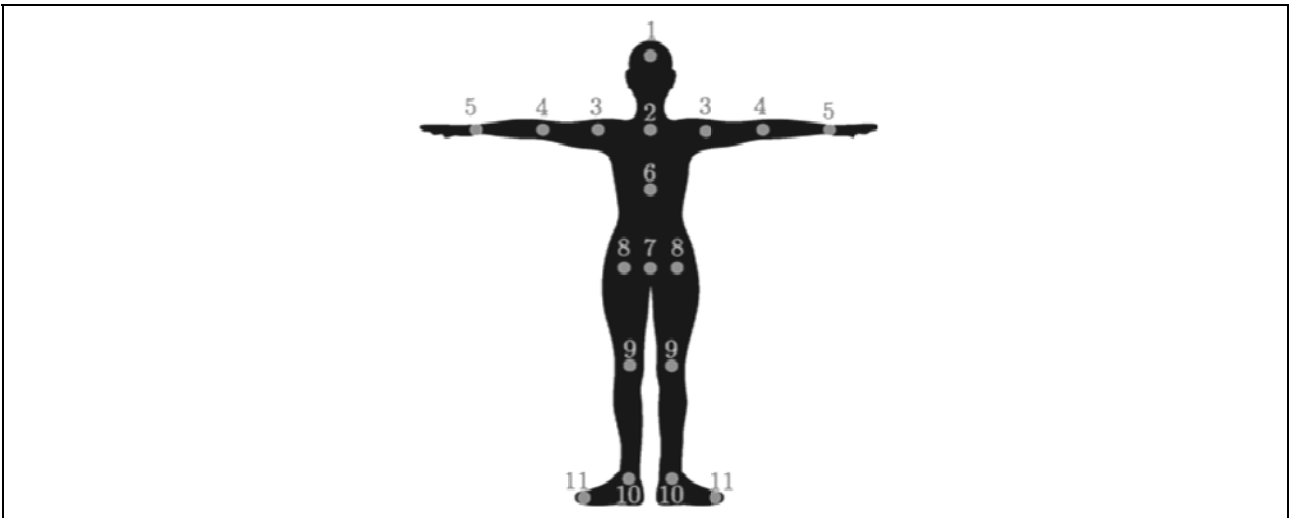


Abb. 7. 18 rekonstruierte Körperpunkte zur Beschreibung der Bewegung (Diaz et al., 2012, S. 4)

Die PCA konnte drei Eigenvektoren aus den Versuchen identifizieren, die im Lauf der Bewegungsausführung eine maximale Reliabilität von 75% bis 85,9% erzielten. Abbildung 8 verdeutlicht den räumlichen Abstand der Bewegungsstrukturen im Verhältnis zur ursprünglichen Bewegung, wenn die Körperpunkte ohne Berücksichtigung der identifizierten Eigenvektoren berechnet wurden. Die Aufklärung der Varianz von Eigenvektor 12 bei Veränderungen der Position des Standfußes war gering im Vergleich zum Schussbein und den Händen (Abbildung 8, Mode 12). Eigenvektor 15 klärte Varianz gleichmäßig verteilt über die Körpersegmente auf (Abbildung 8, Mode 15). Eigenvektor 13 beinhaltete Informationen hauptsächlich über den linken Unterarm, aber auch zu kleineren Anteilen über beide Füße und den rechten Unterarm (Abbildung 8, Mode 13). Die Autoren interpretierten, dass die drei Eigenvektoren der PCA einen Hinweis auf verteilte Hinweisreize geben, da jeder Eigenvektor in mehreren Markern eine Verschiebung aufzeigte (vgl. Diaz et al., 2012, S. 6).

In einer handballbezogenen Studie untersuchten Bourne et al. (2011) dreidimensional erfasste Siebenmeterwürfe mittels einer PCA. Die Autoren analysierten, inwiefern Siebenmeterwürfe bezüglich der Wurfrichtung und zeitlich definierter Phasen während der Wurfausführung zu unterscheiden sind. Es wurden vier erfolgreiche Würfe von fünf Nationalspielern auf die vier Ecken des Tores analysiert. Die Trajektorien umfassten den zeitlichen Verlauf von 14 Körpermarkern von der ersten Bewegung des Handgelenks bis zum Bodenkontakt des wurfunterstützenden Beines. Die Körpermarker waren beidseitig an Schulter, Ellbogen, Handgelenk, Hüfte, Knie, Sprunggelenk und Zeh angebracht. Für die Analyse wurde zudem die Wurfbewegung zeitlich in eine frühe, mittlere und späte Phase unterteilt. Jede Phase entsprach einem Drittel von der Gesamtlänge der Wurfausführung.

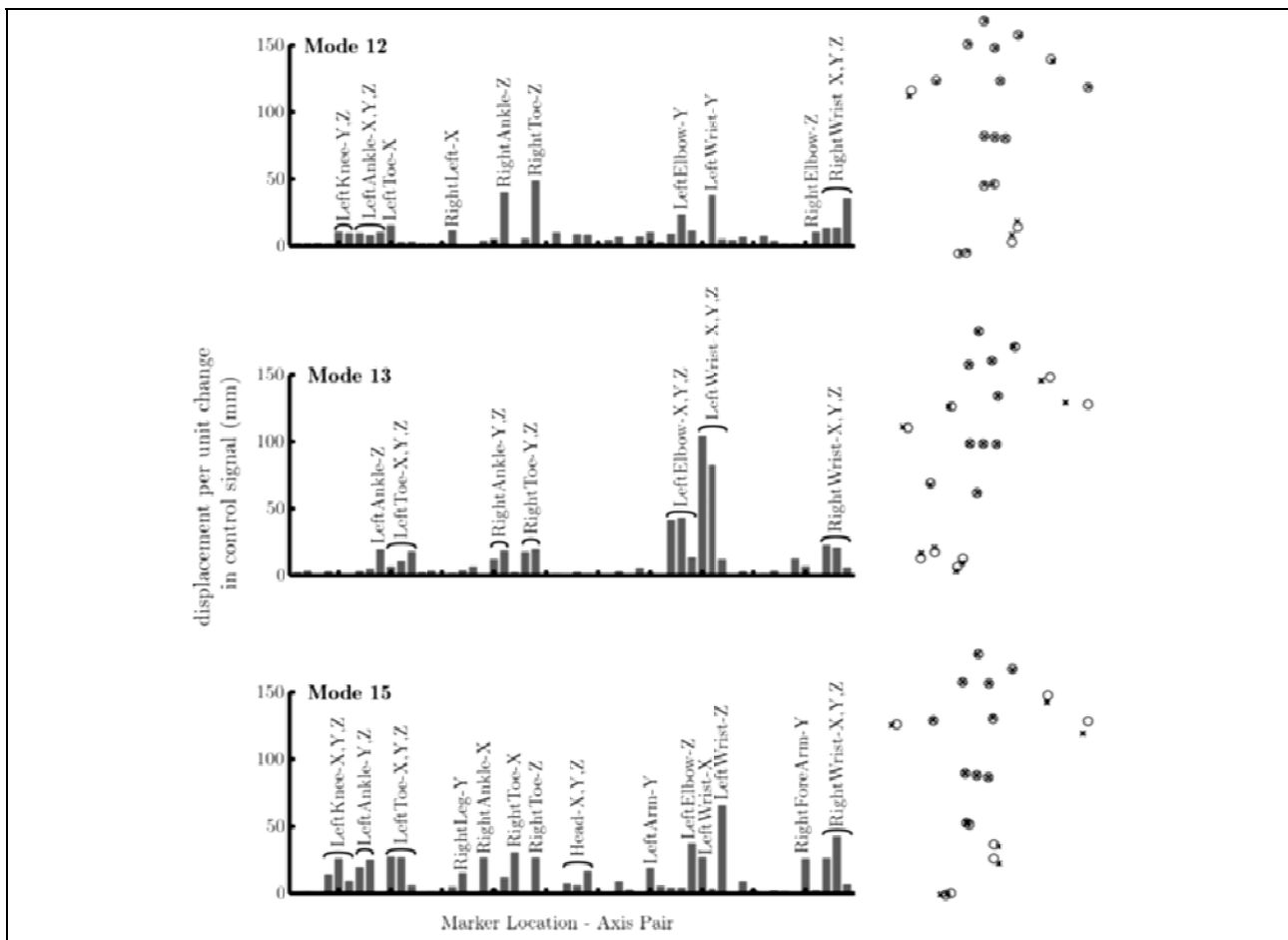


Abb. 8. Räumliche Differenz der Marker (mm) für die Eigenvektoren 12, 13 und 15 in Bezug zum Kontrollsignal (links); repräsentative Körperhaltung (Kreise) überlagert mit Körperpunkten ohne den Anteil der entsprechenden Eigenvektoren 12, 13 und 15 (Diaz et al., 2012, S. 7)

Bei der Analyse der Wurfmuster wurden durch vier Hauptkomponenten über 90% der Varianz aufgeklärt. Die erste Hauptkomponente klärte unabhängig der Wurf- richtung über 50% der Varianz auf. Aufgrund der Ergebnisse der Kovarianzanalyse über die zeitliche Entwicklung im inter-individuellen Vergleich nahmen die Autoren an, dass die Unterschiede zwischen den Kovarianzen der ersten Hauptkomponente ( $M \geq 0,90$ ) sowie der zweiten, dritten und vierten Hauptkomponente ( $M < 0,80$ ) ein In- diz für abweichende Bewegungsstrukturen bezüglich der Wurfbereiche sein könnten (vgl. Bourne et al., 2011, S. 45). Der intra-individuelle Vergleich der Wurfmuster für ein Zielfeld ergab im Mittel für die vier Hauptkomponenten Kovarianzen zwischen 0,70 und 0,54. Abbildung 9 zeigt die graphische Aufbereitung der Eigenvektor- koeffizienten von Körpermarkern für die erste Hauptkomponente. Es ist deutlich über die medio-laterale (x) sowie anterior-posterior (Y) Richtung zu sehen, dass die Koeffizienten der Eigenvektoren zwischen den Wurfrichtungen übereinstimmen. Dies deutet darauf hin, dass die Hauptkomponente einen globalen Anteil der Va- rianz aufklärt (vgl. Bourne et al., 2011, S. 46).

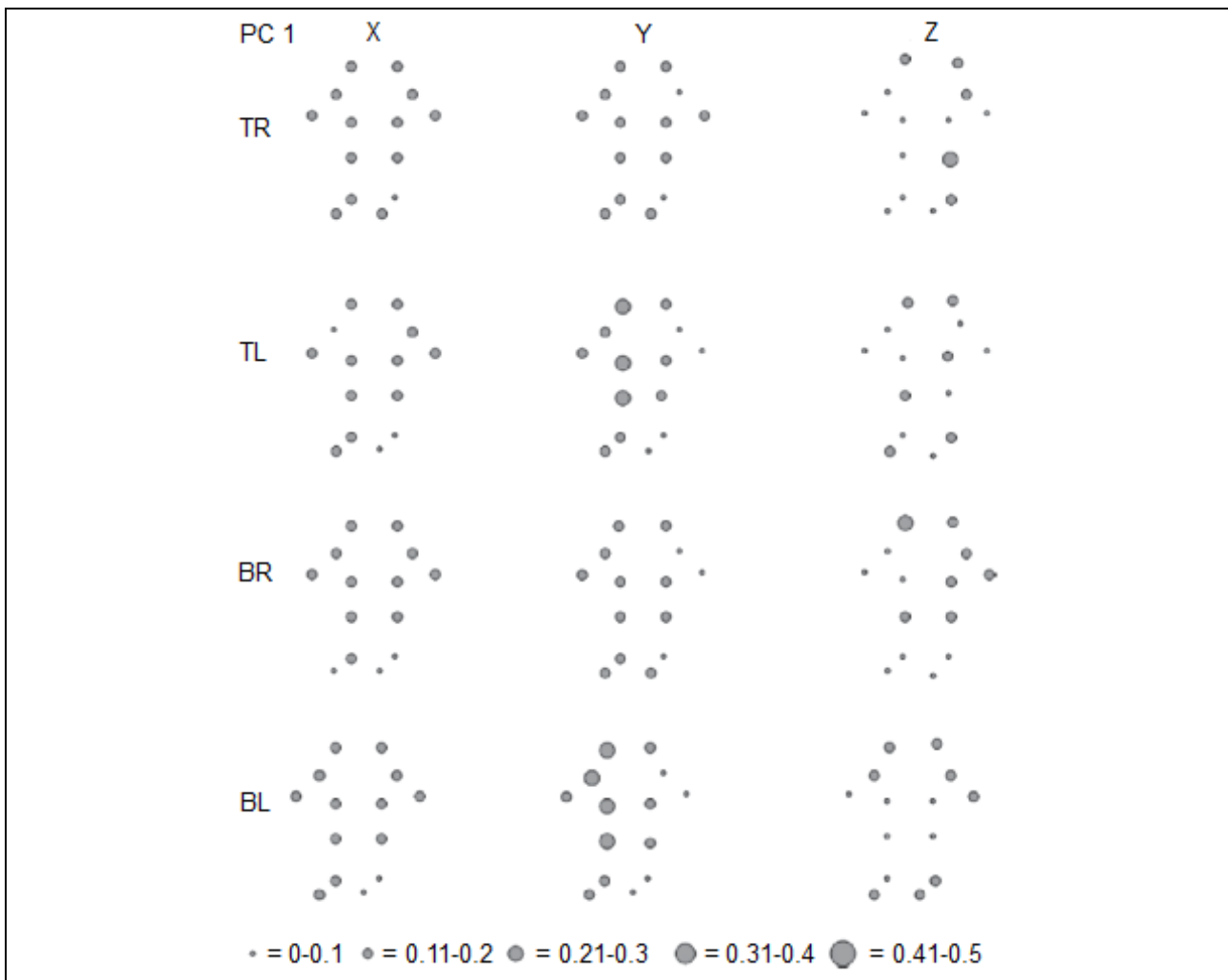


Abb. 9. Absoluter Gruppenmittelwert der Eigenvektorkoeffizienten von Körpermarkern der ersten Hauptkomponente für die vier Wurfzonen (B = bottom, T = top, R = right, L = left) (Bourne et al., 2011, S. 47)

Für die phasenbezogene Untersuchung der Wurfmuster klärte die PCA mit zwei Hauptkomponenten über 90% der Varianz auf. Bereits die erste Hauptkomponente klärte eine Varianz für die drei Wurfphasen bezüglich der Wurfzonen zwischen 67,7% und 89,6% auf und zeigte einen deutlich höheren Wert im Vergleich zur gesamten Wurfphase. Die Eigenwerte für die Wurfphasen 1 und 2 waren für die erste und zweite Hauptkomponente größer im Vergleich zur Wurfphase 3. Es zeigten sich aber keine signifikanten richtungsspezifischen Unterschiede zwischen den Eigenwerten der Wurfphasen. Es konnte eine Kovarianz in Höhe von  $r=0,91$  für gleiche Hauptkomponenten in Bezug auf die vier Zielzonen festgestellt werden. Bourne et al. (2011, S. 49) vermuteten, dass dynamische Bewegungsstrukturen bestanden, die unabhängig von den Wurfzonen beim Zielen Anwendung fanden.

Strukturelle Unterschiede im Bewegungsmuster sowie den dynamischen Übergang vom Gehen zum Laufen auf einem Laufband (und umgekehrt) untersuchten Lamoth et al. (2009) bei neun Probanden. Die Autoren bestimmten für jeden Probanden die individuellen Geschwindigkeiten für ein komfortables Gehen, ein maximal schnelles Gehen sowie ein maximal schnelles Laufen. Die subjektiv komfortabelste Gehgeschwindigkeit wurde über Gehen bei verschiedenen Geschwindig-

keitsstufen getestet und abschließend festgelegt. Die maximale Gehgeschwindigkeit war über die Geschwindigkeitsstufe vor dem Übergang zum Laufen definiert. Und die maximale Laufgeschwindigkeit stellte 80% der maximalen Geschwindigkeit auf dem Laufband über einen Zeitraum von einer Minute dar. Die Probanden führten in Abhängigkeit ihrer individuell bestimmten Geschwindigkeiten jeweils fünf Stufen im Geh- und Lauftempo über eine Länge von 60 Sekunden pro Stufe aus. Die Geschwindigkeitsstufen wurden pyramidenförmig geregelt, so dass bis auf die schnellste Laufstufe alle Stufen doppelt absolviert wurden. Die Analyse des Übergangs zwischen Gehen und Laufen konzentrierte sich auf 20 Schritte vor und nach dem Phasenübergang. Die Bewegung wurde durch ein Modell mit 16 Körperpunkten abgebildet. Lamoth et al. (2009) führten PCAs für die Geschwindigkeitsstufen des Gehens, Laufens und für alle Geschwindigkeitsstufen jeweils unter Einbezug aller Probanden aus. Im Vergleich der PCA für Gehen ( $PCA^W$ ) und Laufen ( $PCA^L$ ) sowie kombiniert ( $PCA^{WL}$ ) wurden durch jeweils vier Hauptkomponenten zwischen 65% und 70% der Varianz für alle Probanden aufgeklärt. Die ersten beiden Hauptkomponenten bildeten dynamische Eigenschaften der Bewegung ab, welche für beide Muster gleich waren (vgl. Lamoth et al., 2009, S. 377). Abbildung 10 zeigt das Auftreten der Hauptkomponenten für die drei Bewegungsrichtungen. Die erste Hauptkomponente beschrieb unabhängig der Laufgeschwindigkeit gleichmäßig die Varianz für viele Körpersegmente auf der x-Koordinate (Laufrichtung). Dagegen klärte in y-Richtung (seitliche Bewegungen) die zweite Hauptkomponente die größte Varianz auf. Die zweite Hauptkomponente deutete zudem aufgrund des negativen Vorzeichens der Eigenvektorkoeffizienten bei y- und z-Koordinate für die  $PCA^W$  im Vergleich zu  $PCA^L$  und  $PCA^{WL}$  an, dass ein Unterschied in der Kopplung der Segmente vorlag, der dem Faktor Geschwindigkeit zuzuschreiben war.

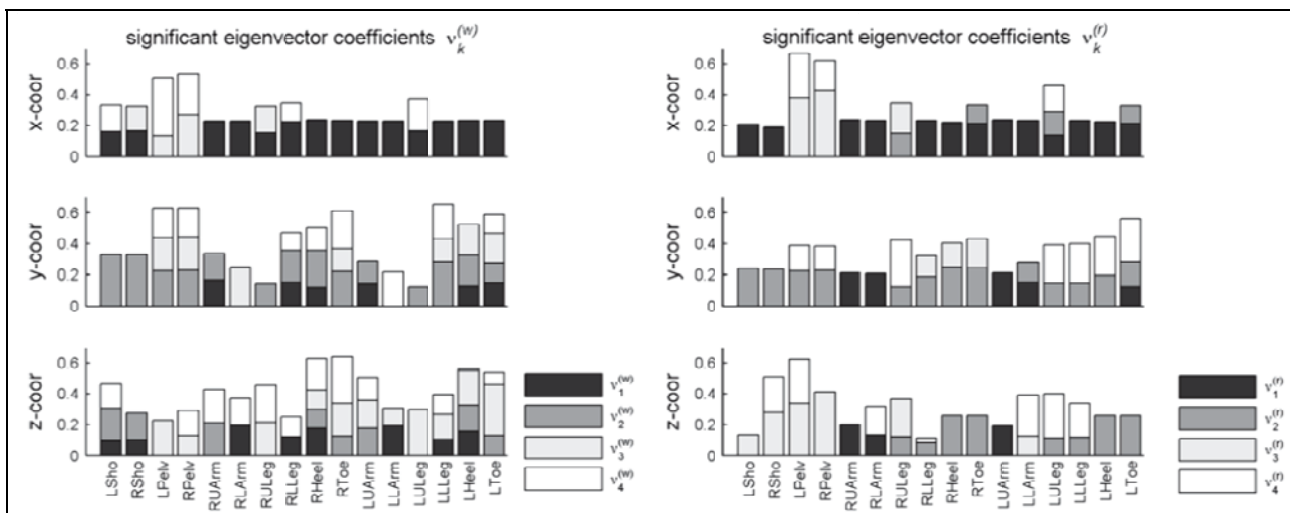


Abb. 10. Dreidimensionale signifikante Eigenvektorkoeffizienten resultierend aus den PCAs Gehen (links) und Laufen (rechts) (Lamoth et al., 2009, S. 378)

Die dritte und vierte Hauptkomponente unterschieden sich im Vergleich von Gehen und Laufen deutlich. Um weitere Aussagen über die Hauptkomponenten treffen zu können, wurden signifikante Unterschiede zwischen den Hauptkomponenten von  $PCA^W$  und  $PCA^L$  über die  $PCA^{WL}$  analysiert. Für jede Hauptkomponente berechneten

Lamoth et al. (2009, S. 376) auf allen Geschwindigkeitsstufen einen Effektwert, der den Anteil der aufgeklärten Varianz für eine Hauptkomponente auf einer Geschwindigkeitsstufe zurückgibt. Die Analyse der PCA<sup>W</sup> bestätigte, dass die erste Hauptkomponente einen geschwindigkeitsunabhängigen Einfluss besaß. Signifikante Unterschiede für die Variable Geschwindigkeit konnten für die Effektwerte 2,3 und 4 festgestellt werden (Abbildung 11).

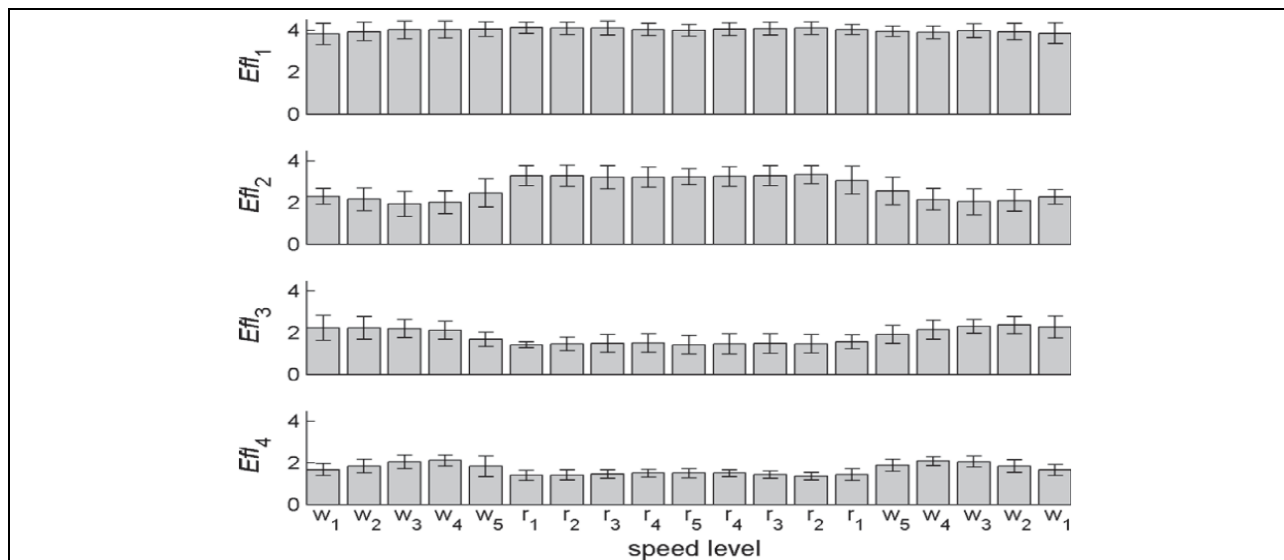


Abb. 11. Effektwert der Hauptkomponenten für einzelne Geschwindigkeitsstufen (Lamoth et al., 2009, S. 379)

Die Analyse der Übergänge vom Gehen zum Laufen wurde paarweise für die Hauptkomponenten über Berechnung der CRP vorgenommen. Die Ergebnisse ergaben für die CRP zwischen den Hauptkomponenten 1, 2 und 3 signifikante Unterschiede im Verlauf der relativen Phasen. Beispielsweise zeigte die CRP für Hauptkomponente 1 und 2 im Phasenübergang folgende Eigenschaften (vgl. Lamoth et al., 2009, S. 379):

- Die Phasendifferenz vor dem übergehenden Schritt war unabhängig der Geschwindigkeitsregelung (Erhöhung bzw. Erniedrigung) signifikant größer als nach dem Übergang
- Die relative Phasenvariabilität war vor dem Phasenübergang signifikant höher als im Anschluss
- Die Erhöhung der Geschwindigkeit beim Übergang Gehen-Laufen zeigte eine signifikant höhere Variabilität als die Reduzierung der Geschwindigkeit beim Übergang Laufen-Gehen. Dieser Aspekt wies auf einen Hysterese-Effekt hin.

„...the change in coordination from walking to running and vice versa occurred within a single stride cycle, albeit that gait transitions were preceded by changes in step characteristics several steps beforehand“ (Lamoth et al., 2009, S. 384).

### 2.1.2.2 Verfahren linearer Distanzmaße

Ein lineares Verfahren zur Erkennung von Bewegungsmustern wendete die Forschungsgruppe um Schöllhorn und Jaitner an (vgl. Jaitner, 2002a, 2002b, 2007; Jaitner, Kretschmar & Hellstern, 2003; Jaitner, Mendoza & Schöllhorn, 2001; Jaitner & Schack, 2002, 2005; Schöllhorn & Bauer, 1997; Schorer et al., 2007). Der Vergleich von Bewegungsmustern basierte auf Distanzmessungen. Über den paarweisen Vergleich von verlaufsorientierten Messreihen konnten bildweise für alle Variablen die euklidischen Distanzen berechnet werden. Die Größe der euklidischen Distanz stellte ein Maß der Ähnlichkeit oder Unähnlichkeit der Versuche zueinander dar. Die Distanzen sind Grundlage für die Klassifizierung der Versuche über eine Clusteranalyse. Dieser Ansatz ermöglichte in verschiedenen Studien das Erkennen trainingsbedingter Anpassungen des Bewegungsmusters im motorischen Lernprozess bei ballistischen Bewegungen, das Klassifizieren von Bewegungsmustern anhand veränderter Bedingungen oder anhand des Leistungsniveaus.

Jaitner et al. (2001) untersuchte die Bewegungsmuster der letzten drei Schritte des Anlaufs im Weitsprung bei 18 Probanden. Dafür wurde die Bewegung in drei Stützphasen und drei Flugphasen untergliedert: die Stützphasen vom vorletzten (S2SL), letzten Schritt (SLS) sowie dem Absprung (TO) und die Flugphasen des drittletzten bis letzten Schritts (F3LS, F2LS, FLS). Für den Vergleich und die Klassifizierung von Bewegungsmustern wurden alle definierten Phasen und alle Versuche der Probanden berücksichtigt. Somit enthielt die Analyse 342 Matrizen (6 Phasen für 57 Versuche). Als Merkmale zur Beschreibung der Bewegung zählten die Winkelverläufe und Winkelgeschwindigkeiten der Körpergelenke sowie des Rumpflagewinkels. Die Klassifizierung von Bewegungsmustern erfolgte unter Anwendung von Clusteranalysen mit dem ‚Single linkage‘ Algorithmus. Abbildung 12 zeigt das Ergebnis der Clusteranalyse in einem Dendrogramm. Auf der ersten Separierungsebene wurden die letzte Stützphase und die Flugphase des vorletzten Schritts von den übrigen Bewegungsphasen getrennt. Im nächsten Gruppierungsschritt wurden alle definierten Bewegungsphasen durch eigene Cluster repräsentiert. Für die beiden Bewegungsabschnitte Stützphase des letzten Schritts sowie Flugphase des vorletzten Schritts lag eine Erkennungsrate von 100% vor. Alle anderen Cluster wiesen eine Zuweisungsrate von mindestens 79% auf. Die Untersuchung von individuellen Ausprägungen während der Stützphase des letzten Schritts und beim Absprung ergab eine Zuweisung von 68% und 88%. Neben der letzten Flugphase mit 58%, konnten bei allen weiteren Phasen weniger als 50% den Individuen zugeordnet werden (vgl. Jaitner et al., 2001).



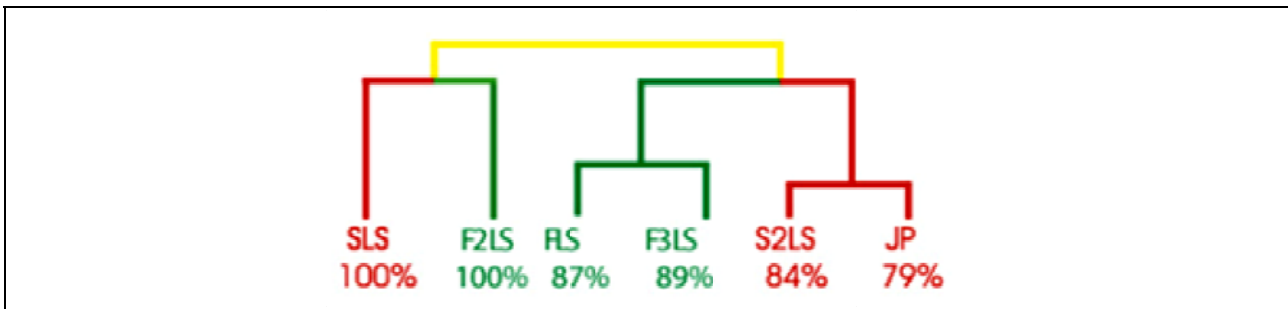


Abb. 12. Clustereinteilung der sechs Bewegungsphasen beim Weitsprung (Jaitner et al., 2001, S. 7)

In einer anderen Studie untersuchte Jaitner (2002a) die Absprungbewegung beim Stabhochsprung und Weitsprung zwischen jeweils sechs Spezialisten der beiden Disziplinen als auch zehn Zehnkämpfern, um strukturelle Unterschiede zwischen den Disziplinen festzustellen. Die Merkmalsstichprobe enthielt die Winkel-Verläufe und Winkelgeschwindigkeiten der Körpergelenke sowie des Rumpflagewinkels. Die Clusteranalyse in der Abbildung 13 zeigt eine klare Trennung der Sprünge nach den Disziplinen. Eine weitere Abgrenzung nach Spezialisten und Zehnkämpfern ist im Dendrogramm nicht zu sehen. In Bezug zum Stabhochsprung führten die Zehnkämpfer ähnliche Bewegungsmuster wie die Spezialisten aus. Bei der Analyse der Merkmale für die Beinsegmente stellten sich ebenso die Unterschiede zwischen den Disziplinen heraus (vgl. Jaitner, 2002a, S. 134).

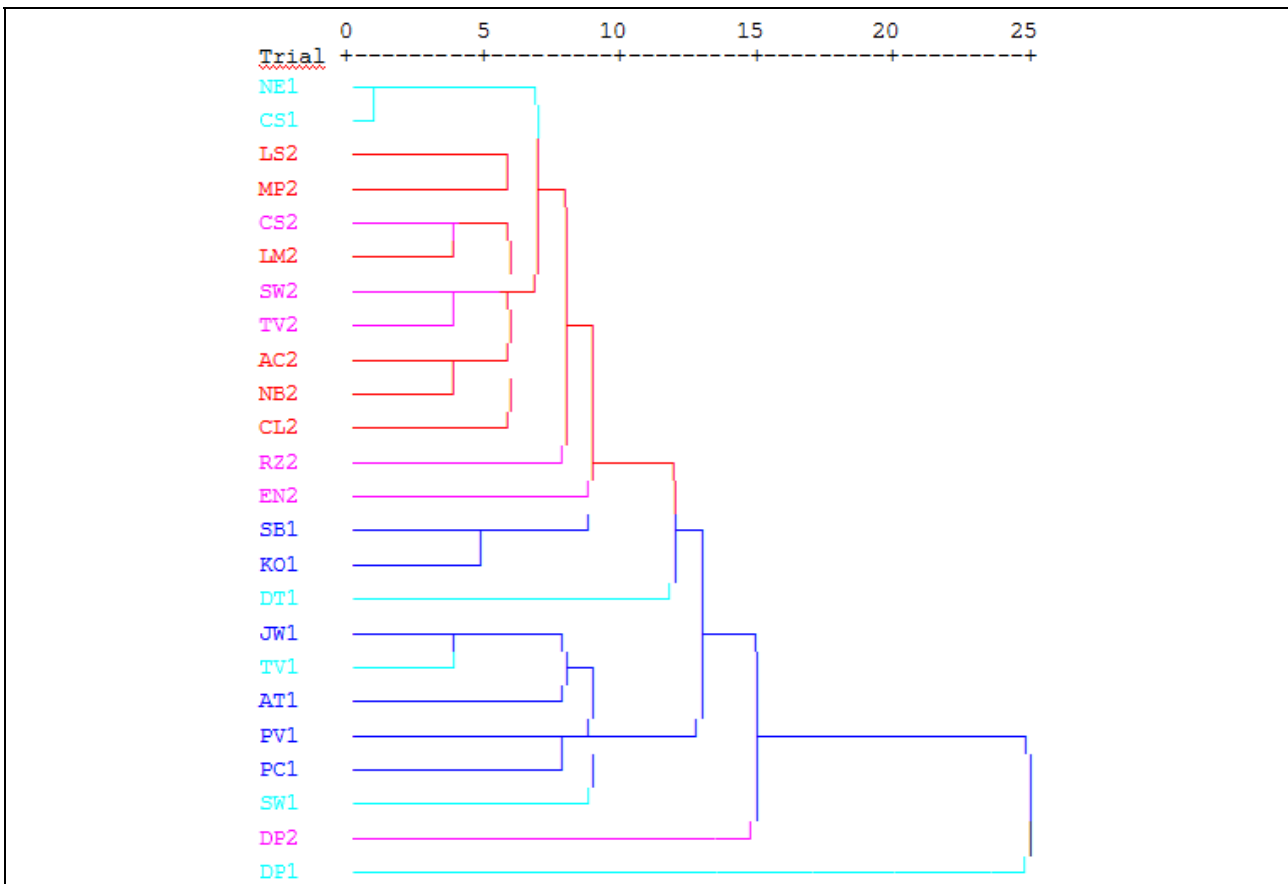


Abb. 13. Clustereinteilung der Sprünge beim Stabhochsprung sowie Weitsprung anhand aller kinematischer Merkmale. blau=Stabhochsprung; rot=Weitsprung; helle Farbtöne=Zehnkämpfer (Jaitner, 2002a, S. 134)

Bei einem Expertisevergleich untersuchte Jaitner (2007) die Absprungbewegung von sieben Spezialisten (SP), sechs Zehnkämpfern (DC) und sieben Studenten (ST) im Weitsprung. In die Untersuchung gingen insgesamt 20 Sprünge ein. Die Bestimmung der Ähnlichkeit von Bewegungsmustern wurde über die Winkel-Verläufe und Winkelgeschwindigkeiten der Sprung-, Knie-, Hüft-, Schulter- und Ellbogengelenke sowie dem Rumpflagewinkel berechnet. Die Clusteranalyse bildete zwei große Gruppierungen, in denen keine Trennung der Sprünge nach der Expertise bzw. der persönlichen Sprungweite vorlag. Die Versuche von den Probanden CL (Spezialist) und MA (Student) wurden in ein Cluster zusammengefügt, was eine hohe Ähnlichkeit in den Bewegungsmustern andeutete (vgl. Jaitner, 2007, S. 468). Darüber hinaus konnte festgehalten werden, dass in Bezug auf die Ähnlichkeit der Bewegungsmuster eine größere Übereinstimmung zwischen verschiedenen Expertiseniveaus (CL und MA) vorlag als innerhalb eines Expertiseniveaus (CL und LM). Somit interpretierte Jaitner (2007), dass eine große Sprungweite mit unterschiedlichen Bewegungsmustern gesprungen werden kann.

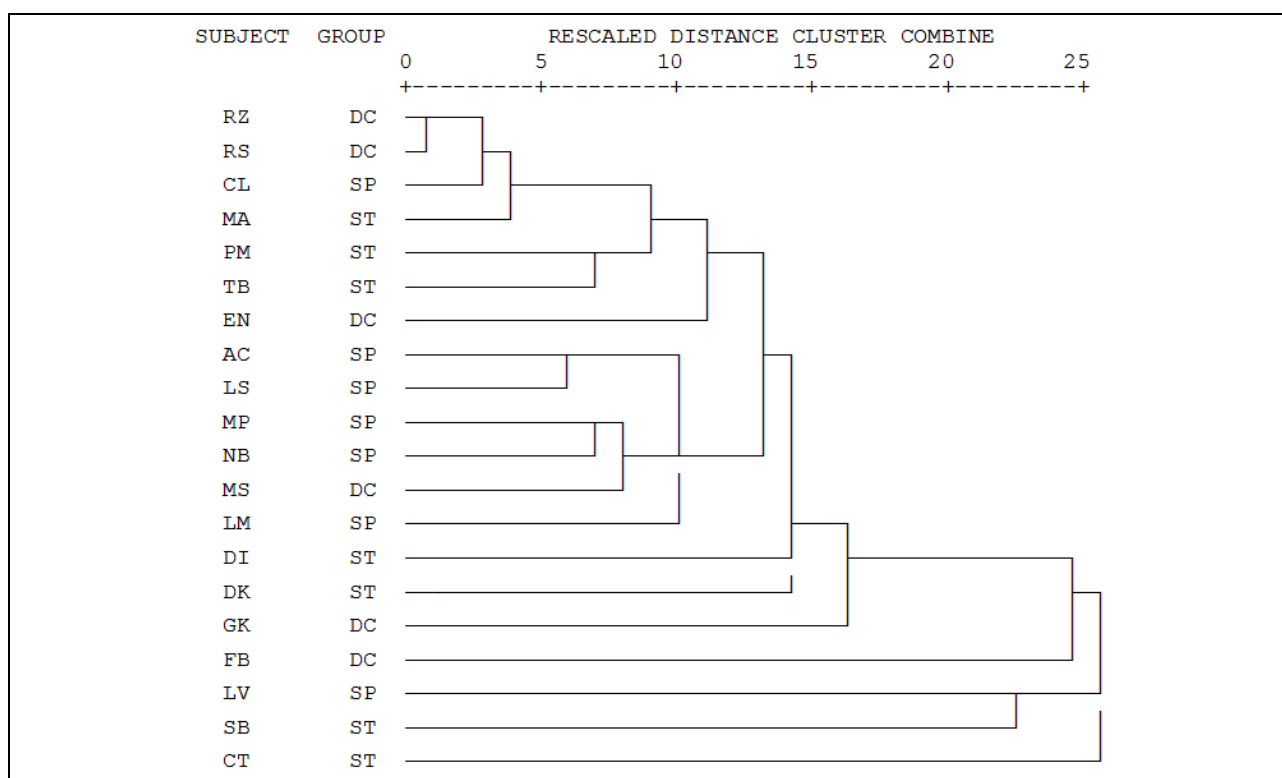


Abb. 14. Clustereinteilung der Sprünge beim Weitsprung anhand zeitkontinuierlicher Daten (Jaitner, 2007, S. 467)

Den Einfluss von zwei unterschiedlichen Lehrkonzepten auf die Hürdentechnik untersuchten Jaitner et al. (2003) bei einer Gruppe mit zehn jugendlichen Frauen. Ein Teil der Gruppe führte über einen Zeitraum von zwei Monaten wöchentlich zwei Einheiten über 45 Minuten mit differentiellen Übungen aus. Das restliche Trainingsprogramm unterschied sich zwischen den Gruppen nicht. Über einen Pre- und Posttest wurde die Hürdenüberquerung dreidimensional erfasst. Das zeitkontinuierliche Bewegungsmuster für die Hürdenüberquerung umfasste die Winkel-Verläufe

und Winkelgeschwindigkeiten der Körpergelenke. Die Analyse bezog intra- und interindividuelle Vergleiche der Bewegungsmuster mit ein. Die Clusteranalyse ordnete beim inter-individuellen Vergleich die Versuche den Individuen mit einer Erkennungsrate von 70,9% zu. Die intra-individuelle Separierung von Versuchen aus dem Pre- und Posttest lag nur teilweise im Dendrogramm vor. Bei Betrachtung der intra-individuellen Clusterbildung nach dem Kriterium Pre- oder Posttest, konnte für die traditionelle Gruppe eine unveränderte Zuordnungsrate für die Individuen über beide Messzeitpunkte festgestellt werden (Pre: 53,3%; Post: 60%). Im Gegensatz dazu zeigte die Clusteranalyse für die differentielle Gruppe mit 40% eine deutliche Abnahme in der inter-individuellen Separierung der Versuche (Pre: 86,7%; Post: 46,7%). Die Autoren verwiesen bei dieser Veränderung auf den Effekt des differentiellen Trainings und vermuteten, dass die Probandinnen der differentiellen Gruppe nach der Trainingsphase „perform better with less similar or less stable movement patterns“ (Jaitner et al., 2003) und somit geringere Separierungsquoten aufwiesen. Eine prozessorientierte Bewegungsanalyse in der Sportart Volleyball führten Jaitner und Schack (2002) bei 17 Männern und 15 Frauen durch. Im Verlauf einer Saison wurden bei Probanden aus Bundes- und Oberliga 90 Angriffsschläge sowie bei den Probandinnen 102 Angriffsschläge aufgenommen. Exemplarisch zeigten die Autoren für drei Bundesligaspieler eine Clusteranalyse, in welche die Winkel- und Winkelgeschwindigkeits-Merkmale aller Körpergelenke eingegangen sind. Im Dendrogramm (Abbildung 15) ist eine klare inter-individuelle Trennung für die Probanden EB und MP zu sehen. 80% der Versuche fallen bei MP in ein Cluster, EB wies eine individuelle Zuordnungsrate von 75% auf. Für den Proband BM war keine klare Separierung zu erkennen. Bei BM bildeten 3 von 4 Angriffsschlägen ein Einzelcluster. Im intra-individuellen Vergleich zeigten die Distanzen für MP die höchste Stabilität. Dagegen deuteten die großen Distanzen bei BM auf eine vermehrte Variabilität im Bewegungsmuster und eine wenig stabile Technikausführung hin (vgl. Jaitner & Schack, 2002, S. 241).

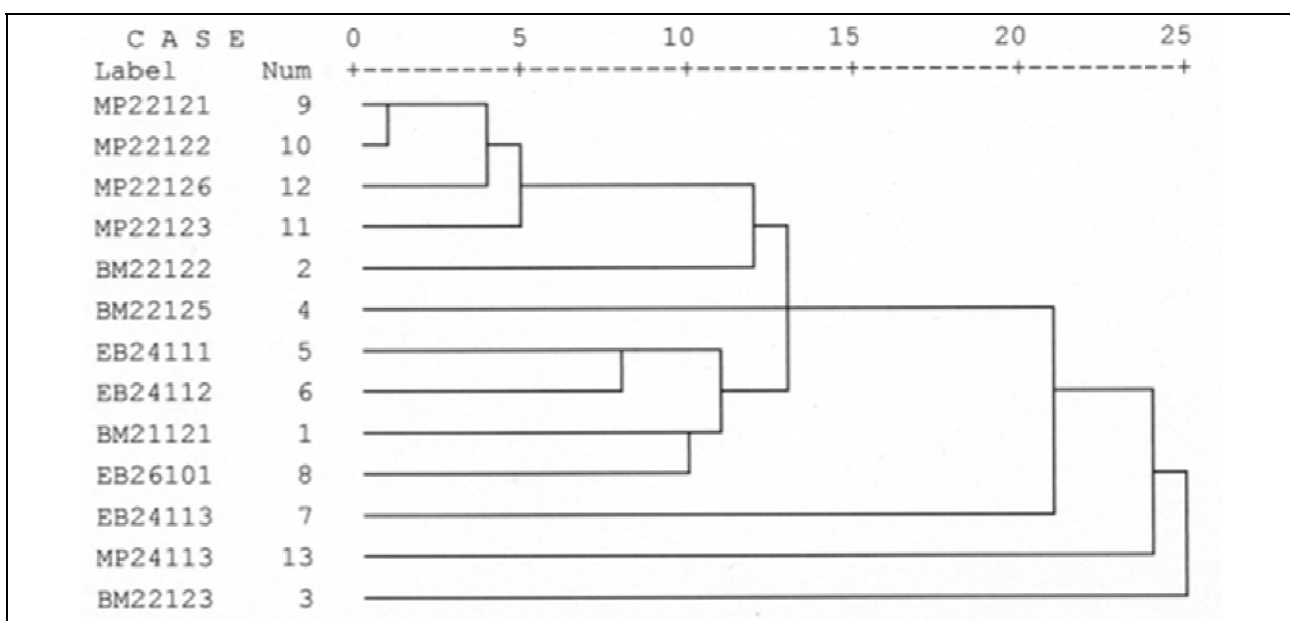


Abb. 15. Clustereinteilung der Angriffsschläge dreier Bundesligaspieler (Jaitner & Schack, 2002, S. 241)

In der Sportart Handball erforschten Schorer et al. (2007) die Bewegungsmuster von fünf Probanden beim Siebenmeterwurf. Das Leistungsniveau der Teilnehmer reichte vom Status Experte (Nationalspieler) bis zu Novize (Freizeitsportler). Die dreidimensionalen Bewegungsmuster umfassten die Trajektorien der rechten Hüfte sowie der linken Schulter, des linken Ellbogens und des linken Handgelenks. Die Merkmalsauswahl sollte die biomechanische Kette beim Werfen abbilden. Eine Bewegungsmustererkennung wurde sowohl für inter-individuelle als auch intra-individuelle Vergleiche durchgeführt. Der inter-individuelle Vergleich für alle Probanden basierte auf einer 302x302 großen Distanzmatrix, welche die Ähnlichkeiten der Würfe zueinander anhand der euklidischen Distanz enthielt. Graphisch dargestellt in einem ‚surface plot‘ zeigt die Abbildung 16 das Ergebnis des inter-individuellen Vergleichs. Die Graustufen geben die Größe der Distanzen zwischen den einzelnen Versuchen an. Je dunkler der Grauton, desto geringer sind die Distanzen zwischen den Versuchen und desto ähnlicher sind die Würfe in ihren Verläufen. Die Würfe der Novizen sind von 0-45 (weiblich) und 46-91 (männlich), den Fortgeschrittenen von 92-176 (weiblich) und 177-238 (männlich) sowie dem Experten von 239-302 aufgetragen. Der Experte wies hohe Distanzkoeffizienten in seinen Versuchen auf (Bereich A). Die Abgrenzung seiner Würfe zeigte sich deutlich im Vergleich zu den Würfeln der Fortgeschrittenen (Bereich B). Dagegen deutete die dunkelgraue Färbung in den Bereichen C (Fortgeschrittene) und D (Novizen) auf geringe Distanzen innerhalb eines Leistungsniveaus und somit ähnlichere Bewegungsmuster hin. Auch zwischen den Fertigungsniveaus Fortgeschrittene und Novizen konnten klare Distanz- bzw. Farbunterschiede erkannt werden (Bereich E). Die Clusteranalyse für den inter-individuellen Vergleich führte zu drei großen Gruppen. In die erste Gruppierung wurden 96,2% aller Versuche des Experten eingeordnet. In das zweite Cluster fielen 100% bzw. 97,4% der Würfe beider Novizen. Innerhalb des Novizen-Clusters trennte die Clusteranalyse auf der zweiten Ebene die Versuche der Probandin von den Würfeln des Probanden. Zu 94% bzw. 97,2% konnten die Würfe der Fortgeschrittenen von den anderen Probanden separiert werden. Die Abgrenzung der Würfe erreichte somit für das Kriterium Expertise eine Zuweisungsrate von 96,7%. Die Zuordnung der Würfe zu den Individuen war durchschnittlich zu 83,2% möglich. Der intra-individuelle Vergleich von Würfeln mittels Clusteranalysen führte zu unterschiedlichen Gruppierungen für die einzelnen Probanden.

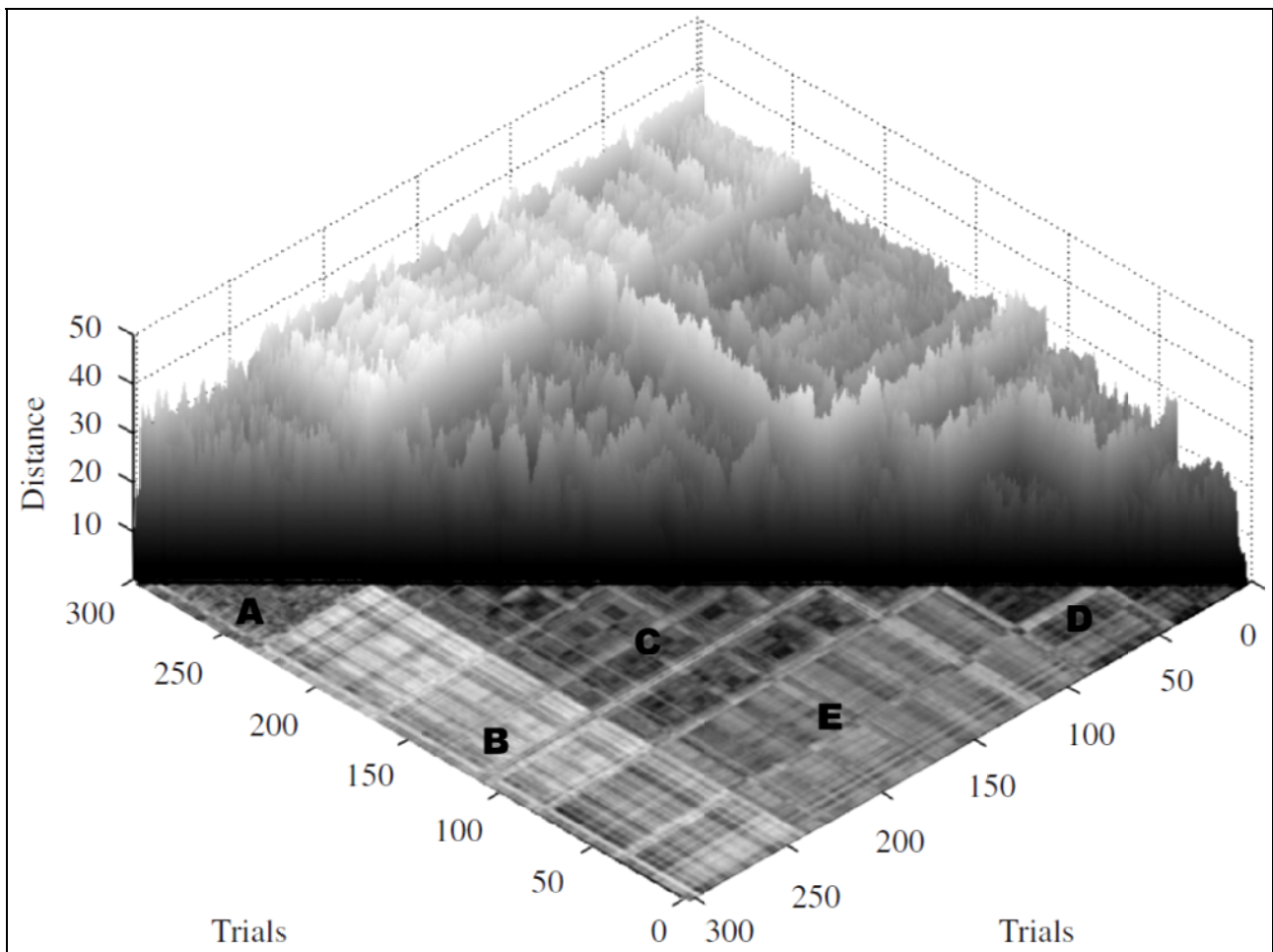


Abb. 16. Surface Plot über alle Würfe der Probanden (Schorer et al., 2007, S. 414)

Am Beispiel des weiblichen Novizen wurden die Würfe im Dendrogramm in zwei Cluster separiert (Abbildung 17). Innerhalb der Cluster wurden auf der zweiten Ebene weitere Trennungen vorgenommen. Bei näherer Betrachtung der Wurfrichtungen schien auf den ersten Blick keine deutliche richtungsspezifische Trennung vorzuliegen. Über die graphische Aufarbeitung der Wurfrichtungen konnten Schorer et al. (2007) zwei Bewegungsmuster feststellen (Abbildung 18, A), die diagonal zueinander die Zonen im Tor ansteuerten.

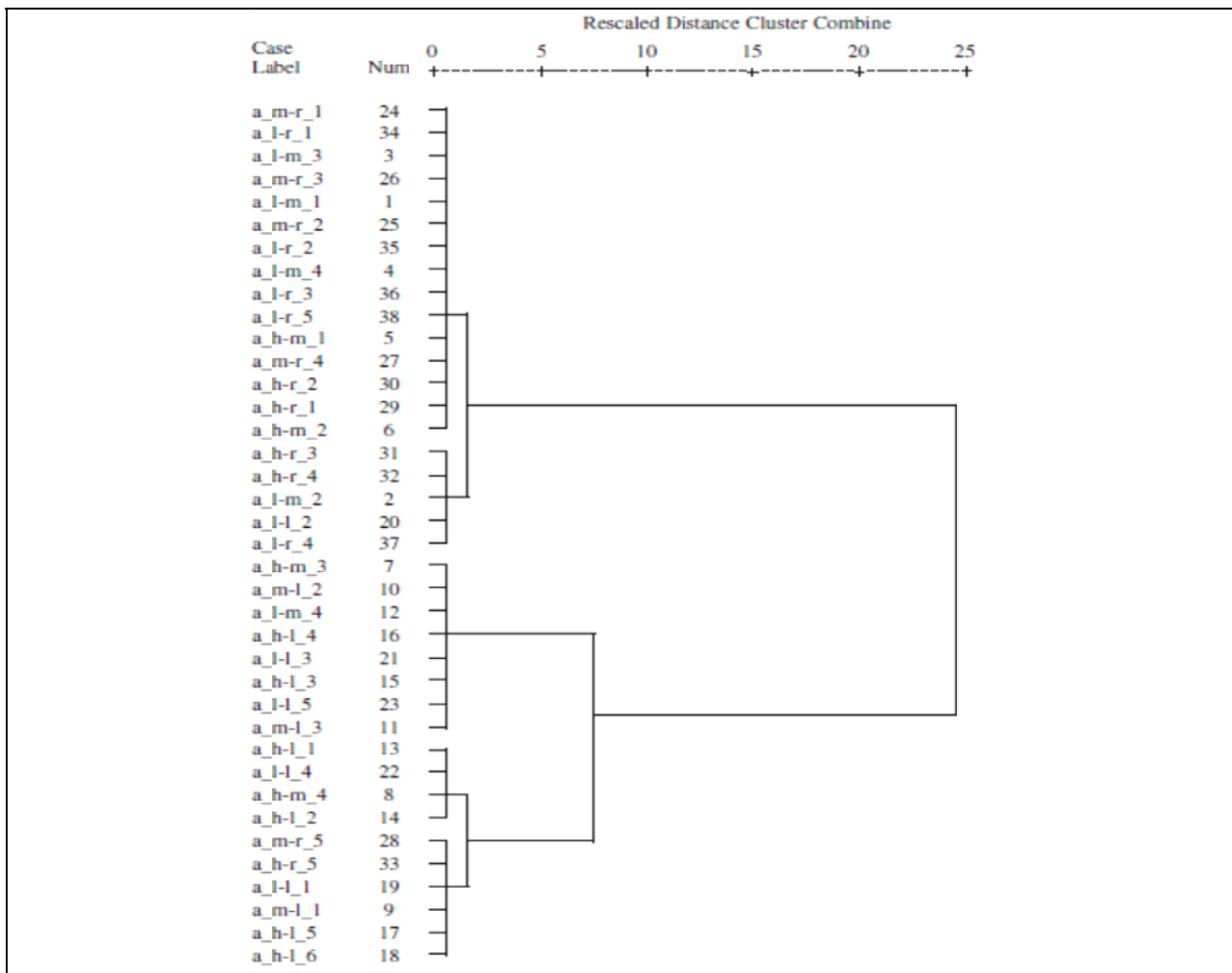


Abb. 17. Dendrogramm über den intra-individuellen Vergleich der Würfe eines weiblichen Novizen (Schorer et al., 2007, S. 416). 1. Buchstabe: a = Proband; 2. Buchstabe: l = low, m = middle, h = high; 3. Buchstabe: l = left, m = middle, r = right

In gleicher Weise wurden die Wurfrichtungen für die anderen Probanden ausgelesen (Abbildung 18). Der männliche Novize und beide Fortgeschrittene zeigten drei Gruppierungen in der Clusteranalyse. Die Würfe des Experten wurden in vier Gruppen separiert. Beispielsweise zeigte die Trennung der Bewegungsmuster für die fortgeschrittene Probandin stabile Wurfmuster für hohe, halbhoch und flache Würfe auf (Abbildung 18, C). Der Experte zeigte sehr stark streuende Zielbereiche bezüglich der Trennung seiner Bewegungsmuster. Als eine mögliche Erklärung für die Ergebnisse des Experten nannten Schorer et al. (2007) eine funktionale Variabilität. „The increased active functional variability suggests that the expert in the current study demonstrated a skill that we refer to as deceptive motor expertise – a term that reflects the performers` skill in concealing the intent of their forthcoming action through a more variable movement pattern“ (Schorer et al., 2007, S. 419). Auf der höchsten Fertigungsstufe im Lernprozess ist neben der stabilen Ausführung einer Bewegung gerade in Sportarten mit direktem Kontrahenten die variable Anwendung zur Verschleierung der Aktionen ein Gütekriterium. Diese Verschleierung fordert ein erhöhtes Maß an Variabilität im Bewegungsmuster, das der Exper-

te über die größte Anzahl an Clusterbildungen im Vergleich zu niedrigeren Expertisen andeutete.

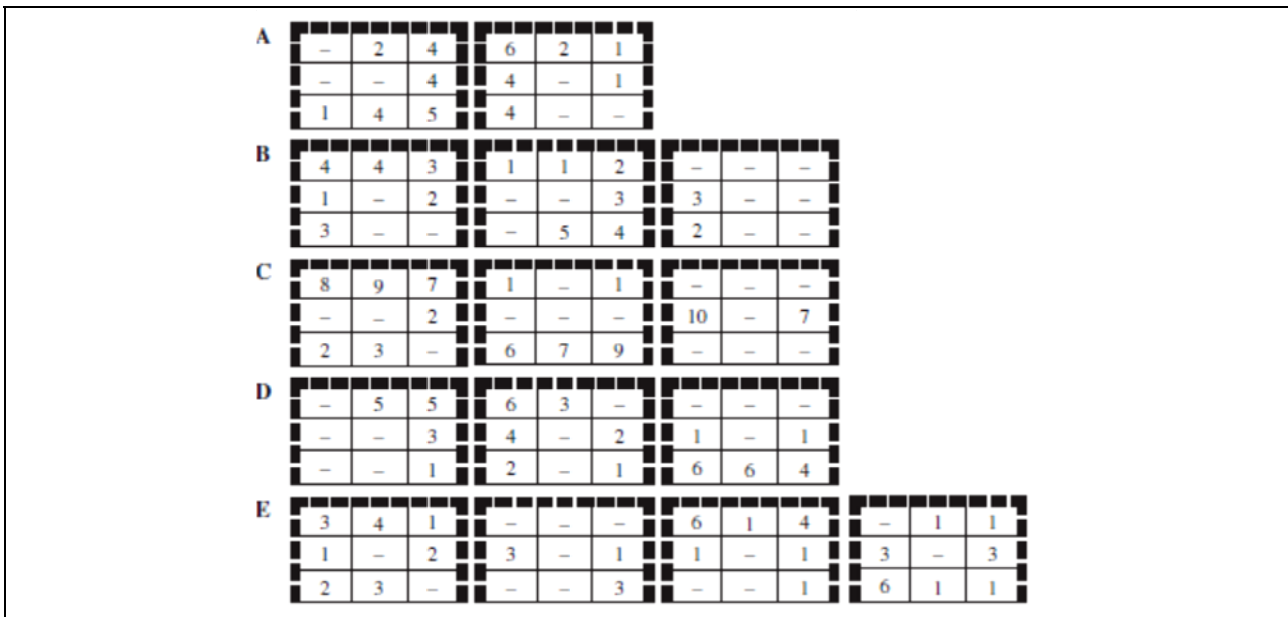


Abb. 18. Anzahl der Würfe bezogen auf eine Richtung bei den intra-individuellen Clusterbildungen (Schorer et al., 2007, S. 417)

### 2.1.2.3 Support Vector Machine

Ein Verfahren zur Klassifizierung und Regression von Daten stellt eine Support Vector Machine (SVM) dar. SVMs können sowohl als lineares und nicht-lineares Verfahren eingesetzt werden. Das Ziel dieses Verfahrens ist die Bildung von Klassen innerhalb eines Datensatzes, so dass ein großer Abstand zwischen den Klassen besteht. Die Einteilung der Klassen erfolgt durch aufspannende Hyperebenen, die ein möglichst breites datenfreies Band zwischen den Klassen konstruieren soll (vgl. Byun & Lee, 2002, S. 571). In der Regel ist bei komplexen Datensätzen eine lineare Trennung nicht möglich und die Hyperebene wird mit Hilfe von Kernelfunktionen (z.B. Polynomfunktionen) aufgespannt, so dass eine eindeutige Klassifizierung gegeben ist (Abbildung 19). Die Anwendung der SVM findet im medizinischen Bereich zur Erkennung und Abgrenzung von pathologischen Verhaltensweisen oder zur Überprüfung von Interventionen statt (vgl. Wu et al., 2007), im sportwissenschaftlichen Bereich beispielsweise zur Klassifizierung und Unterscheidung von Geh- und Laufmustern bei Individuen (vgl. Begg & Kamruzzaman, 2005; Begg, Palaniswami & Owen, 2005; Fukuchi, Eskofier, Duarte & Ferber, 2011; Janssen et al., 2011). Das Verfahren setzt zur Erkennung von Bewegungsmustern sowohl kinematische als auch dynamometrische Merkmale ein.

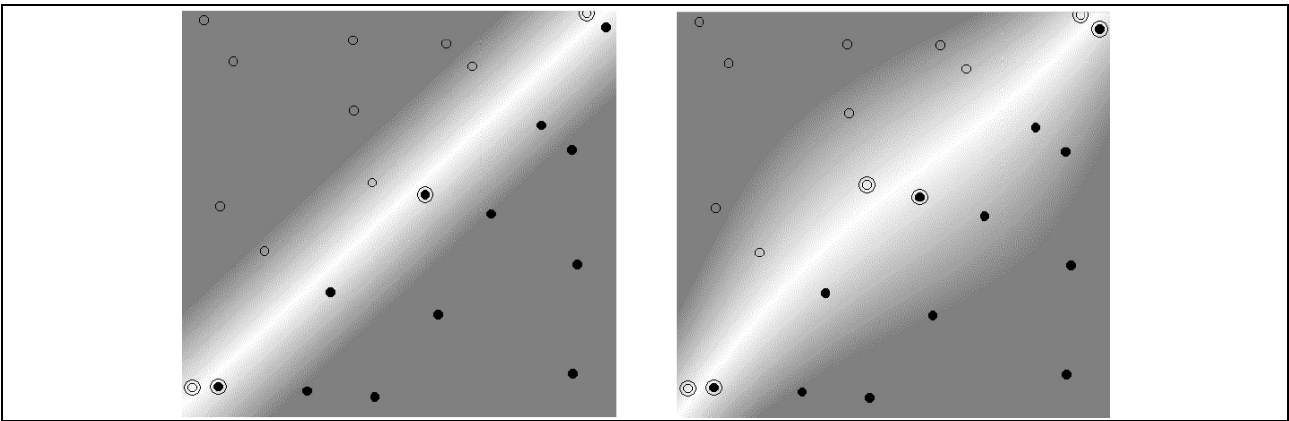


Abb. 19. Lineare Trennung (links) und nicht-lineare Trennung (rechts) der Daten (Burges, 1998)

Begg und Kamruzzaman (2005) untersuchten mittels einer SVM die Erkennung von Gehmustern von 24 jungen ( $28,1 \pm 5,6$  Jahre) und alten Menschen ( $68,8 \pm 4,6$  Jahre). Sie erfassten zur Beschreibung der Bewegung vier kinematische Merkmale: Winkel im Sprung- und Kniegelenk zum Zeitpunkt des Fußaufsatzes bzw. dem Lösen des Fußes vom Boden sowie die Bewegungsreichweite der Winkel-Verläufe von Sprung- und Kniegelenk für die Stand- und Schwungphasen. Zur Berechnung wurden die Mittelwerte der drei erfassten Versuche verwendet. Die Erkennungsrate anhand der Variablen zwischen jungen und älteren Menschen lag bei 91,7%. Eine weitere Studie zur Unterscheidung von jungen und älteren Personen wurde in Bezug auf das Laufen von Fukuchi et al. (2011) durchgeführt. 31 kinematische Merkmale der unteren Extremität für fünf zusammenhängende Schritte wurden von jeweils 17 jungen und alten Probanden in die Analyse aufgenommen. Die Klassifizierung erzielte eine Trennungsrate von 91% bei Berücksichtigung aller kinematischen Merkmale. In einem zweiten Schritt konnten die Autoren durch sukzessives ergänzen von kinematischen Merkmalen als Grundlage für das Verhalten der SVM mittels sechs Variablen eine Erkennungsrate von 100% erreichen. Die Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Erkennungsrate über Hinzunehmen weiterer Merkmale. „The features containing the most discriminative information were the knee flexion excursion angle (KFLXRoM), knee abduction angle at IC (ICKABD), ankle peak dorsiflexion angle (PEAKAnkDF), peak knee abduction angle (KABDPEAK), tibial rotation excursion (TibRotRoM), and toe-out angle at IC (ICToeOut)<sup>1</sup> (Fukuchi et al., 2011, S. 541).

<sup>1</sup> Abkürzung IC = initial contact



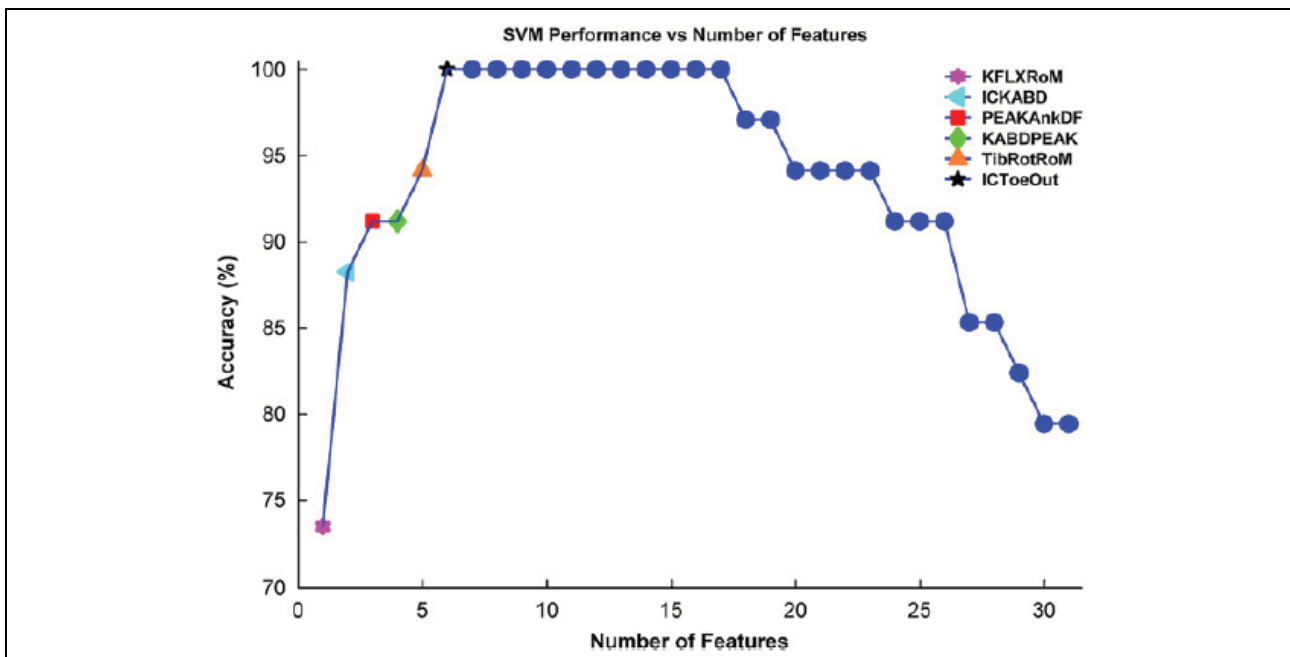


Abb. 20. Entwicklung der Erkennungsrate mittels der SVM durch sukzessives Hinzufügen kinematischer Merkmale (Fukuchi et al., 2011, S. 541)

In einer Studie von Begg et al. (2005) gingen 58 gesunde Personen mit individuell gewähltem Tempo für jeweils 20 Minuten auf einem Laufband. Die Gruppe der jungen Personen umfasste 30 Teilnehmer mit einem durchschnittlichen Alter von  $28,6 \pm 6,4$  Jahren. Die Gruppe der älteren Personen enthielt 28 Teilnehmer, die durchschnittlich  $69,2 \pm 5,1$  Jahre waren. Zur Erfassung der Gehschritte wurden die reflektierenden Marker am großen Zeh und am fünften Mittelfußknochen angebracht, um daraus 24 Merkmale des Gehens abzuleiten und zu berechnen. Die Berechnung der Merkmale erfolgte anhand der Größe ‚minimum foot clearance‘ (MFC), welche den kürzesten Abstand zum Boden während der Schwungphase angab (Abbildung 21).

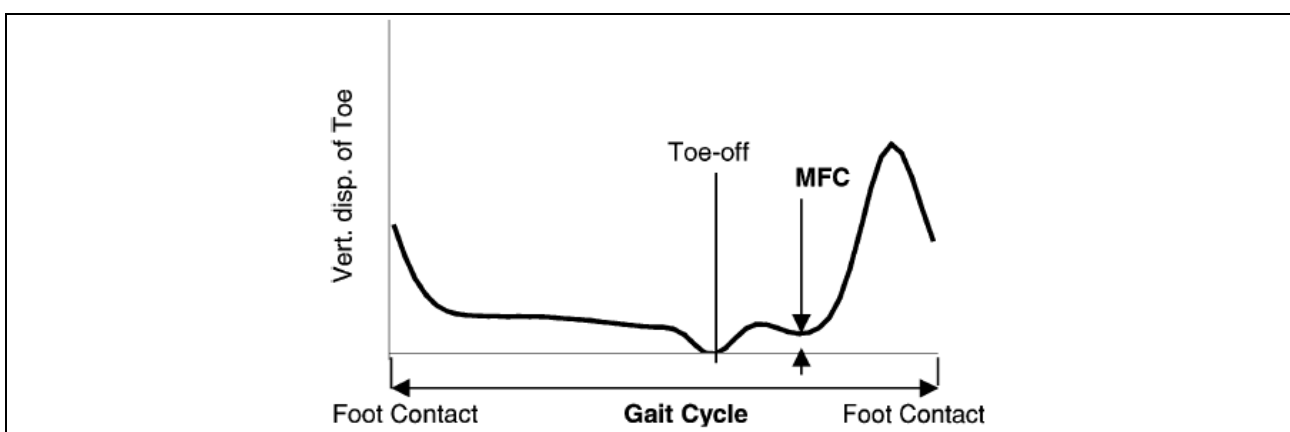


Abb. 21. Definition des Merkmals Minimum Foot Clearance (MFC) (Begg et al., 2005, S. 828)

Die Variablen wurden über MFC-Histogramme und Poincaré Plots generiert (Abbildung 22). Darüber wurden beispielsweise die Merkmale  $MFC_{max}$ , Range ( $MFC_{max} - MFC_{min}$ ), Mean, Median und StD von  $\Delta MFC_n$  oder Quartilswerte bestimmt. Die

Klassifizierung der Personen über die SVM in die Gruppe jung und alt anhand der Gehmuster konnte mit einer Erkennungsrate von 83,2% ausgeführt werden (Begg et al., 2005, S. 833).

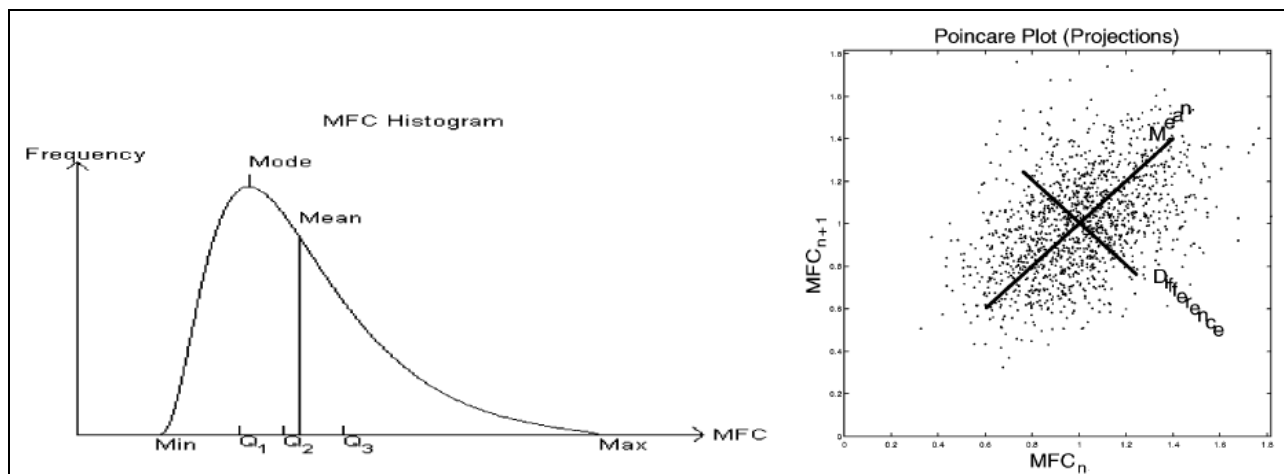


Abb. 22. MFC-Histogramm (links) und Poincaré Plot (rechts) zur Bestimmung der Merkmale für die SVM (Begg et al., 2005, S. 831)

In einer weiteren Studie zum Gehen untersuchten Janssen et al. (2011), inwiefern sich Ermüdungserscheinungen über kinetische Merkmale zeigen und klassifizieren lassen. An der Untersuchung nahmen neun männliche Probanden mit einem durchschnittlichen Alter von  $25,9 \pm 3,14$  Jahren teil, welche Erfahrungen aus dem Bereich der Leichtathletik aufweisen konnten. Die Probanden liefen eine Strecke von 7m jeweils sechs Mal vor, während und nach einer Ermüdung. „Während der Ermüdung“ beinhaltete, dass vor jedem Versuch mit einem durch die Probanden eigenständig festgelegten Gewicht die Wadenmuskulatur über die Übung Fersenheben bis zur vollständigen Ermüdung trainiert werden sollte. Nach der Ermüdungsserie wurde eine Pause von drei Minuten eingehalten, bis die dritte Serie absolviert wurde. Für die Analyse wurden die vertikalen Bodenreaktionskräfte des dritten Schritts mit dem rechten Fuß erfasst. Die inter- und intra-individuellen Vergleiche wurden zum einen direkt über die erfassten verlaufsorientierten vertikalen Bodenreaktionskräfte durchgeführt (signal approach). Zum anderen bestimmten Janssen (2011, S. 970) für jeden Probanden ein synthetisch modelliertes Gangmuster. Dieses durchschnittliche Gangmuster berechnete sich aus den gemittelten Versuchen jedes Probanden. Durch Subtraktion des synthetischen Gangmusters von allen Versuchen wurde für jeden Versuch eine Abweichungskurve zum synthetischen Gangmuster bestimmt (deviations approach). Die Erkennungsrate der Personen über die vertikalen Bodenreaktionskräfte vor und während der Ermüdung lag bei 100%. Die Klassifizierung der Versuche mit Ermüdung konnte für den inter-individuellen Vergleich mit einer Erkennungsrate von 96,3% festgehalten werden. Im Vergleich dazu lagen die Zuordnungsraten über das modellierte Gangmuster für die personenbezogene Erkennung der Versuche vor und während der Ermüdung bei 65,7% und für die Erkennung der Ermüdung bei 98,1%. Die intra-individuelle Auswertung für alle Probanden über die drei Serien ergab für die Erkennung der

Personen vor der Ermüdung 100%, während der Ermüdung 96,3% und nach der Ermüdung 98,1% (vgl. Janssen et al., 2011, S. 970). Die sehr hohen Erkennungsraten über die vertikalen Bodenreaktionskräfte zeigten nach Janssen et al. (2011) die hohe Individualität in menschlichen Bewegungen.

#### 2.1.2.4 Künstliche Neuronale Netze

Ein nicht-lineares Verfahren zur Transformation und Kompression der Daten stellen Künstliche Neuronale Netze (KNN) dar. Das Anwendungsfeld KNN ist in der Sportwissenschaft vielseitig. Mit Hilfe von überwachten und selbstorganisierten neuronalen Netzen lassen sich individuelle Bewegungstechniken und -varianten (vgl. Schmidt, Schöllhorn & Bauer, 1997; Schöllhorn & Bauer, 1998) oder Spielmuster in den Mannschaftssportarten (vgl. Grunz, Memmert & Perl, 2012; Jäger & Schöllhorn, 2012; Perl, 2009; Pfeiffer & Perl, 2006) aufdecken, Entwicklungen im Trainingsprozess sowie Einflüsse von Trainingsmaßnahmen auf das Bewegungsmuster festhalten oder anhand physikalischer und disziplinspezifischer Trainingsmodelle Leistungen vorhersagen (vgl. Maier, Meier, Wagner & Blickhan, 2000; Schöllhorn, Janssen & Jäger, 2010). Neuere Entwicklungen von selbstorganisierten neuronalen Netzen (SOM) ermöglichen einen flexibleren Einsatz der Netzkonstruktionen, so dass bei neuen Fragestellungen kein erneutes Lernen des Netzes anhand des vorliegenden Datensatzes notwendig ist. Dynamisch kontrollierte Netzwerke (DyCoN) von Perl (2001) besitzen die Eigenschaft, sich an neue Daten selbst anzupassen und mit Hilfe des zu Grunde liegenden Leistungs-Potential-Metamodells qualitative Lern- und Adaptationsprozesse abzubilden (vgl. Schöllhorn et al., 2010, S. 73). Der Einsatz von KNN in konkreten Fragestellungen wird im Folgenden an Studienbeispielen erläutert.

Lamb, Bartlett und Robins (2011) analysierten den ‚chip shot‘ im Golf mit einem SOM. Die Betrachtung der Bewegungsmuster über verschiedene Distanzen sollte Aufschluss darüber geben, inwiefern Anpassungen im Bewegungsmuster eines Spielers zur Realisierung unterschiedlicher Präzisionsaufgaben eintreten. Vier Probanden mit einem Handicap von  $2,2 \pm 2,7$  nahmen an der Untersuchung teil und führten jeweils 60 Annäherungsschläge aus.

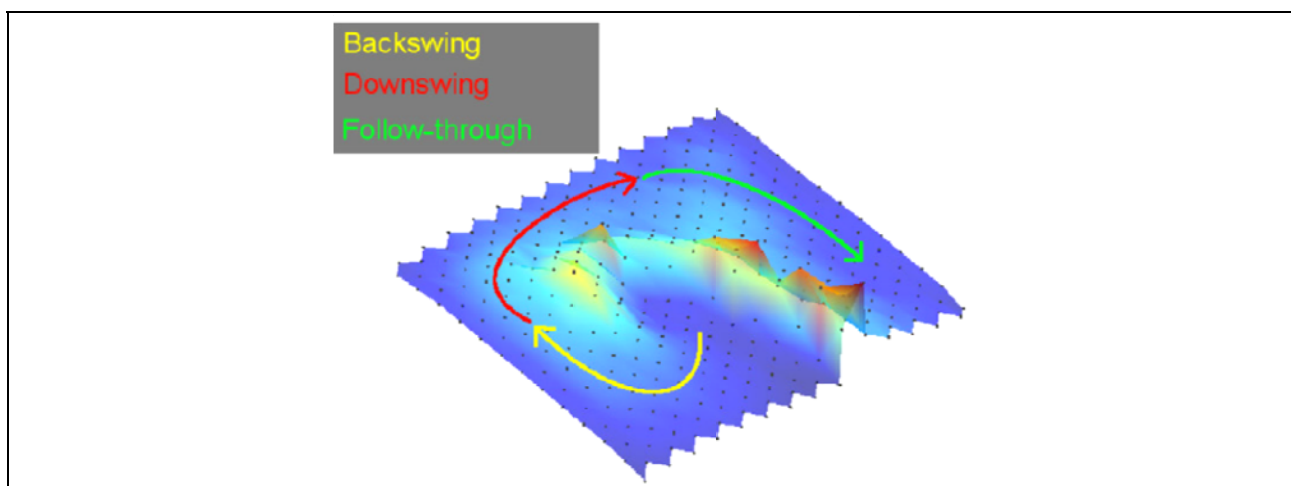


Abb. 23. Zuordnung der Netzbereiche zu den Phasen des Annäherungsschlags (Lamb et al., 2011, S. 1135)

Die Schläge wurden randomisiert auf Ziele durchgeführt, welche in einer Entfernung von 4-24m platziert und mit einem konstanten Abstand von 4m aufgestellt waren. Die Bewegungen sind zeitkontinuierlich über 56 Körpermarker sowie fünf Schlägermarker erfasst worden. Aus den Körpermarkern wurde ein Körpermodell mit 16 Segmenten bestimmt. Die Messreihen, welche einen 24-dimensionalen Datensatz bildeten, umfassten u.a. Oberkörperrotation, Ab- und Adduktion beider Arme, Ortskoordinaten vom Kopf des Probanden und des Schlägerkopfes. Die Datensätze jedes Probanden analysierte ein separates SOM, um intra-individuelle Erkenntnisse über die Bewegungsmuster zu erhalten. Die intra-individuellen Ergebnisse veranschaulichten die Veränderungen in den Bewegungsmustern bei unterschiedlichen Annäherungsdistanzen. Die projizierten Trajektorien für unterschiedliche Annäherungsschläge auf den SOMs für einen Probanden wechselten zum Beispiel von zentralen Bereichen bei kurzen Distanzen auf die Randbereiche bei großen Distanzen. Die SOMs eines anderen Probanden veranschaulichten den Übergang im Schlagmuster bei einer Distanz von 12m (Abbildung 24). Bei Distanzen unterhalb von 12m trafen die Trajektorien für die Rückschwungphase Knoten am Rand des SOM und für die Vorschwung- sowie Ausschwingphase zentrale Regionen des Netzes. Bei einer Distanz von 12m streuten die Trajektorien zu Beginn der Bewegung vom Rand in das Zentrum des SOM (Abbildung 24c). Die räumliche Verschiebung der Trajektorie deutete sich auch für die Vorschwung- und Ausschwingphase an. Ab einer Distanz von 16m verliefen die Trajektorien in der Rückschwungphase über Knoten im Zentrum und für die Vorschwung- und Ausschwingphase entlang des Netzrandes (Abbildung 24d-f) (vgl. Lamb et al., 2011, S. 1138). Somit ist eine Veränderung bei den Probanden in der Bewegungskoordination bei unterschiedlichen Distanzen festzuhalten.

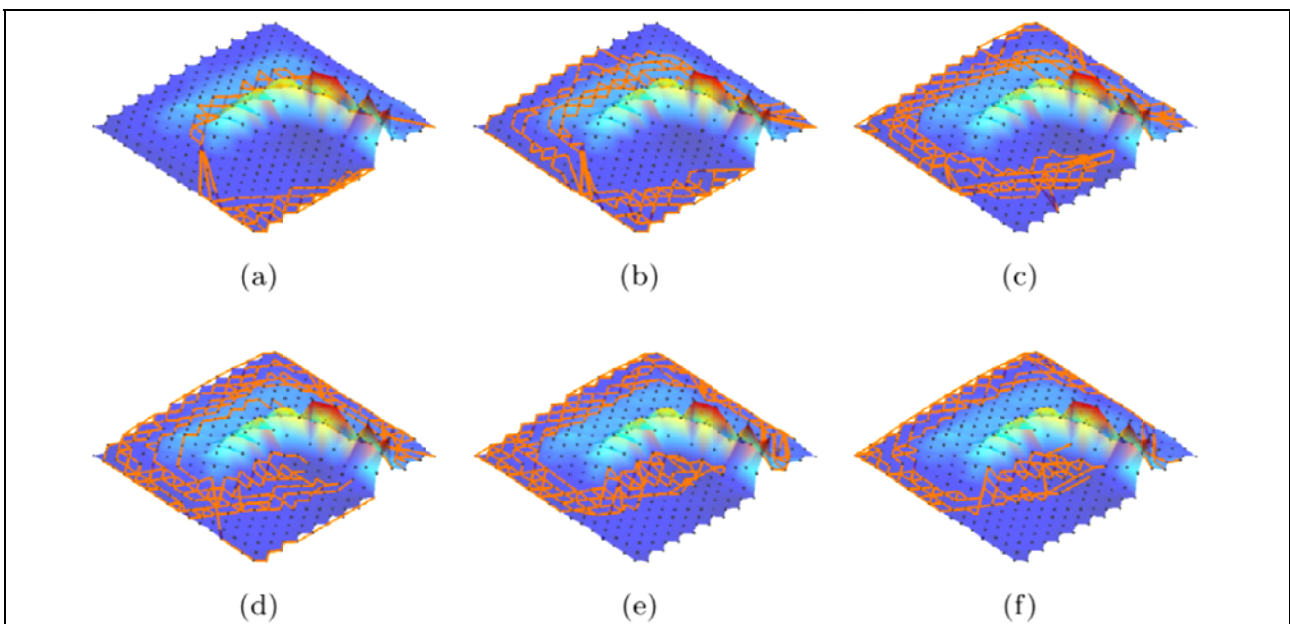


Abb. 24. Trajektorien der Annäherungsschläge des Probanden PB für die Distanzen 4m (a), 8m (b), 12m (c), 16m (d), 20m (e) und 24m (f) (Lamb et al., 2011, S. 1139)

Die gezeigten distanzspezifischen Differenzen in den Trajektorien von Annäherungsschlägen wurden anhand der personenbezogenen ‚best-matching nodes‘ der intra-individuellen Analyse von den Autoren in einem zweiten SOM, welche eine Clusterbildung der Versuche vornahm, begutachtet, um Aussagen zur Stabilität in der Bewegungsausführung treffen zu können. Die resultierenden Attraktor-Diagramme geben Auskunft über alle möglichen dynamischen Zustände des Systems. In diesem Zustandsraum bestehen Attraktorzustände, zu denen das System tendiert und die graphisch als Mulden zu erkennen sind. Eine tiefe und schmale Mulde deutet auf einen sehr stabilen Attraktor hin (vgl. Lamb et al., 2011, S. 1136; Schmidt, 2010, S. 25). Abbildung 25 stellt die Attraktor-Diagramme für die vier Probanden dar. Eine Steigerung der Annäherungsdistanz führte bei allen Probanden zu einer Veränderung der Attraktorzustände. Proband AW zeigte im Vergleich zu den anderen Spielern zwei stabile Attraktoren sowohl für kurze als auch lange Annäherungsdistanzen. Lediglich bei Distanzen über 12m traten drei Mulden geringer Tiefe auf.

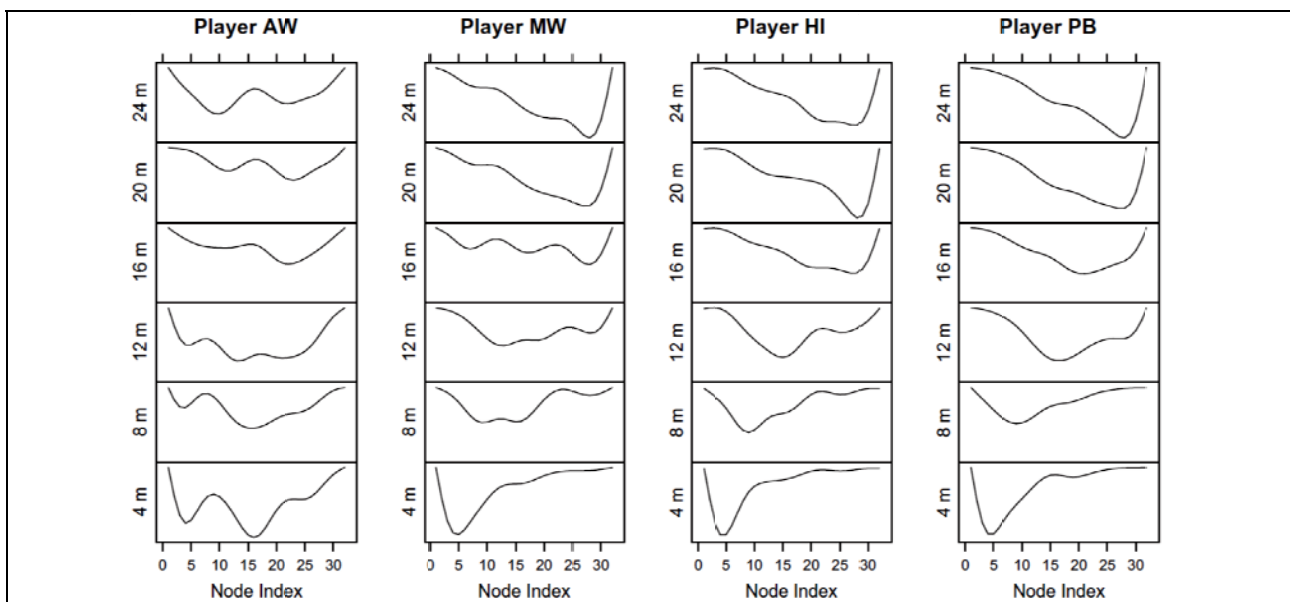


Abb. 25. Attraktor-Diagramme der Probanden für Annäherungsschläge aller Distanzen (Lamb et al., 2011, S. 1139)

Die Diagramme für die Probanden MW, HI und PB zeigten eine Verschiebung des Attraktors von links (kurze Distanz) nach rechts (lange Distanz). Bei mittleren Distanzen ist ein Phasenübergang zwischen den beiden stabilen Attraktoren für kurze und lange Distanzen zu erkennen. Die weniger ausgeprägten Attraktoren für mittlere Annäherungsdistanzen bei Proband MW stellten für Lamb et al. (2011, S. 1141) nicht zwingend größere Schwankungen bei einem Bewegungsmuster dar, sondern könnte auf die Nutzung mehrerer Bewegungsmuster hindeuten, die sowohl für Schläge auf kurze als auch lange Distanzen eingesetzt werden.

Eine Studie im Fußball über Vollspannstöße führten Lees und Barton (2005) mit sechs Probanden aus. Die Spieler schossen aus einem individuell gewählten Anlauf mit maximaler Geschwindigkeit auf ein Tor. Die Analyse erfolgte anhand der

Winkelmerkmale der Sprung-, Knie-, Hüft-, Ellbogen- und Schultergelenke beider Körperseiten sowie zweier Rumpflagewinkel. Die Bewegung umfasste für jeden Versuch den zeitlichen Umfang vom Lösen des letzten Schritts bis zum Ende der Ausschwingphase. Die Auswertung über das SOM ergab eine klare Trennung der Schüsse in Bezug auf das Schussbein der Schützen. Die Trajektorien wurden in unterschiedlichen Bereichen des neuronalen Netzes aufgetragen (Abbildung 26).

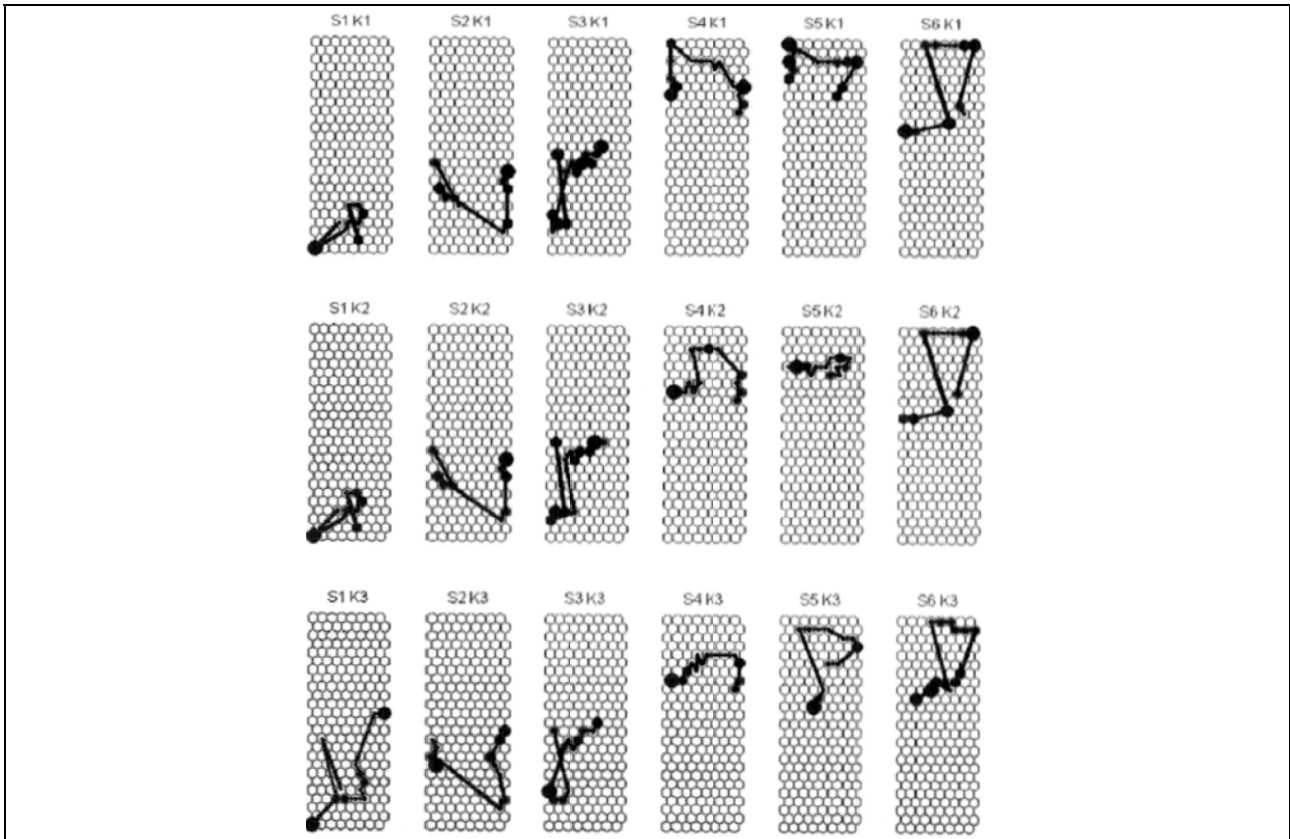


Abb. 26. Abbildung von 3 Schüssen mit dem rechten (Spalte 1-3) und linken Fuß (Spalte 4-6) der 6 Probanden (Lees & Barton, 2005, S. 86)

Für eine detailliertere Analyse wurden speziell für die unterschiedlichen Schussbeine zwei separate SOM trainiert. Beide SOM zeigten Unterschiede im Verlauf der Trajektorien zwischen den Probanden. Im intra-individuellen Vergleich waren ähnliche Projektionen zwischen den Schüssen eines Probanden zu erkennen. Aufgrund fehlender Zuordnung von Netzarealen zu Bewegungsabschnitten konnten keine weitergehenden Aussagen getroffen werden (vgl. Lees & Barton, 2005, S. 86-87).

Eine semantische Beschreibung der Netzbereiche wurde in der folgenden Untersuchung von Schmidt (2010; 2012) bei der Analyse der Bewegungsmuster im Basketball-Freiwurf angewandt. Schmidt (2010; 2012) führte die Analyse der Bewegungsmuster bei verschiedenen Expertiseniveaus über das neuronale Netz DyCoN durch. Das von Perl (2001; 2004) entwickelte dynamische Kohonennetz verfügt über ein Lern-Gedächtnis und „benötigt keine externen Steuerungen oder Optimierungen“ (Perl, 2001, S. 1). Somit werden die für den Trainingsprozess erforderlichen Größen Lernrate und Aktivierungsradius nicht fest vorgegeben, sondern passen sich an veränderte Lernsituationen an. Der dynamische Lernprozess

ist im Vergleich zu üblichen Netzen über sehr wenige Lernschritte abzuschließen, da die Lerneffizienz unabhängig von der Dimension der gelernten Objekte sehr hoch ist (vgl. Perl, 2001, S. 1). Darüber hinaus ist ein Übertraining durch mehrmaliges oder ausführliches Lernen des Netzes fast auszuschließen (vgl. Schmidt, 2010, S. 77). Das Ziel der Untersuchung war die Prüfung der Aussagekraft des Bewegungsmusters in Bezug auf den entwickelten Fertigungsgrad und die Individualität der Teilnehmer. Das Bewegungsmuster definierte sich über die Winkel-Verläufe und Winkelgeschwindigkeiten des Hand-, Ellbogen-, Schulter-, Hüft-, Knie- und Sprunggelenks der rechten Körperseite. Durch die Kombination des Verlaufs von Trajektorien im DyCoN mit den Videoaufnahmen des Wurfes konnte eine Zuordnung der Netzknoten zu Bewegungsabschnitten vorgenommen werden (Abbildung 27). Somit repräsentierten Netzbereiche Bewegungsphasen wie ‚Ausgangsstellung‘, ‚Stärkere Knieflexion und Ball hochführen‘ und ‚Ball in die Wurfphase bringen und zielen‘ (vgl. Schmidt, 2010, S. 125).

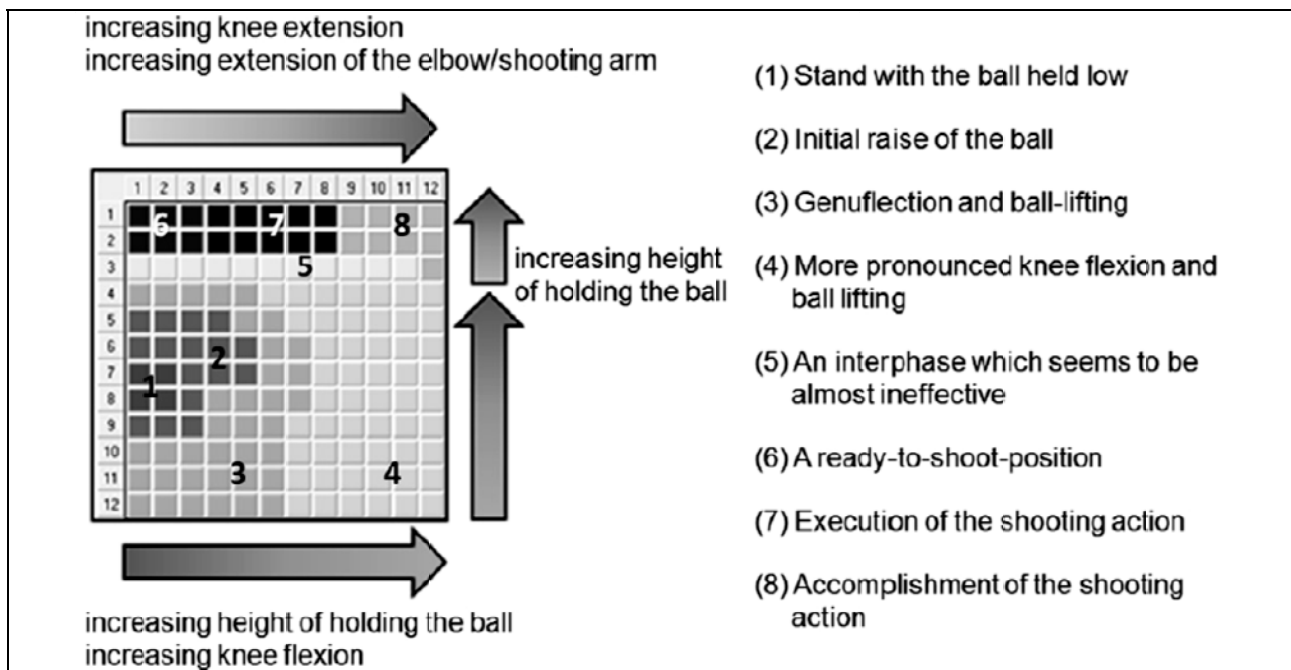


Abb. 27. Semantik von DyCoN für den Freiwurf im Basketball (Schmidt, 2012, S. 368)

Anhand dieser semantischen Zuordnung waren detailliertere Informationen der Bewegungsmuster gegeben und es konnten Aussagen über die intra-individuelle Stabilität sowie die Abgrenzung der Phasenverläufe in Bezug auf das Fertigungs-niveau getroffen werden.

Abbildung 28 zeigt die intra-individuellen Vergleiche von fünf Würfen eines Probanden jedes Fertigungs-niveaus. Die Verläufe des Experten (Proband 17) sahen sehr stabil aus und es waren nur leichte Unterschiede beim vierten Wurf (T84) zu erkennen. Der Proband 13 aus der Gruppe Fortgeschrittene zeigte größere Unterschiede in seinen Wurftrajektorien. Die Trajektorien der Würfe der Novizin (Proband 3) deuteten ein klares Muster im Wurfdaten-Netz an, jedoch mit den größten Schwankungen im Verlauf. Die Ähnlichkeit der Würfe für drei beispielhafte Probanden veranschaulichen die Phasendiagramme in Abbildung 28.

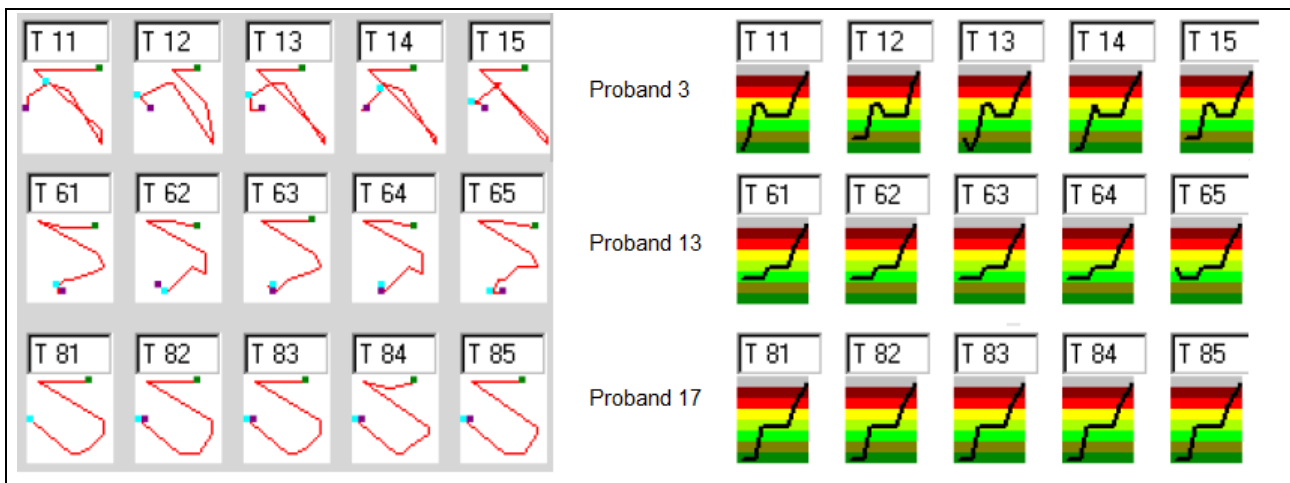


Abb. 28. Wurftrajektorien (links) und Phasendiagramme (rechts) eines Novizen (Proband 3), Fortgeschrittenen (Proband 13) und Experten (Proband 17) (mod. nach Schmidt, 2010, S. 124 und 130)

„Sind diese über alle fünf Würfe identisch, weist das auf eine hohe Stabilität des Bewegungsmusters hin“ (vgl. Schmidt, 2010, S. 123). Ein Test über die Stabilität der Wurfmuster dieser drei Probanden ergab für die Novizin eine minimale, den Fortgeschrittenen eine mittlere und den Experten eine maximale Stabilität im Wurfmuster. Der Experte durchlief bei jedem Wurf in gleicher Form die Phasen des Freiwurfs (Abbildung 28, rechts; Proband 17). Im Vergleich hierzu zeigte die Novizin variierende Anfangsbedingungen in ihren Würfeln (Proband 3). Bei Betrachtung der gesamten Gruppe von 21 Probanden konnte ein Ansteigen der Stabilität über die Fertigniveaus erkannt werden. Eine submaximale und maximale Stabilität war auf jedem Fertigniveau bei einzelnen Probanden festzustellen. Die Probanden mit den höchsten Trefferquoten wiesen eine mittlere oder submaximale Stabilität auf (vgl. Schmidt, 2010, S. 134). Die in den Trajektorien erkennbaren Unterschiede bedingten nicht umgehend eine unterschiedliche Zuteilung zu den Bewegungsphasen des Wurfs. Die Autorin kam zu der Annahme, „dass hier eine intern variabel gestaltete/organisierte Ordnung beobachtet werden konnte, die sich in mehr oder weniger geordneten dynamischen Mustern auf der Makroebene arrangiert“ (vgl. Schmidt, 2010, S. 187). Mittels der DyCoN konnte Schmidt (2010, S. 132) aus allen erfassten Wurfmustern eine Typisierung von sieben Wurfmustern extrahieren. Das in Abbildung 29 aufgeführte Wurfmuster 7 war das am häufigsten verwendete Wurfmuster über alle Fertigniveaus, wobei die Experten vermehrt auf dieses Freiwurfmuster zurückgriffen. Eine sehr hohe Ähnlichkeit mit dem Wurfmuster 7 zeigte Wurfmuster 6, das ebenso von zwei Experten und zwei Fortgeschrittenen angewendet wurde. Mit Abnahme des Fertigniveaus wurden von den Probanden häufiger die Wurfmuster 3 und 4 eingesetzt. „Entscheidend für die Interpretation dieser Darstellung ist zu bemerken, dass die darin verwendeten Farben (Schattierungen) zwar jeweils für ein bestimmtes Muster stehen, die Farbbereiche an sich jedoch zunächst keine Aussagen über die Qualität der Wurfmuster, die sie repräsentieren, zulassen“ (vgl. Schmidt, 2010, S. 132).



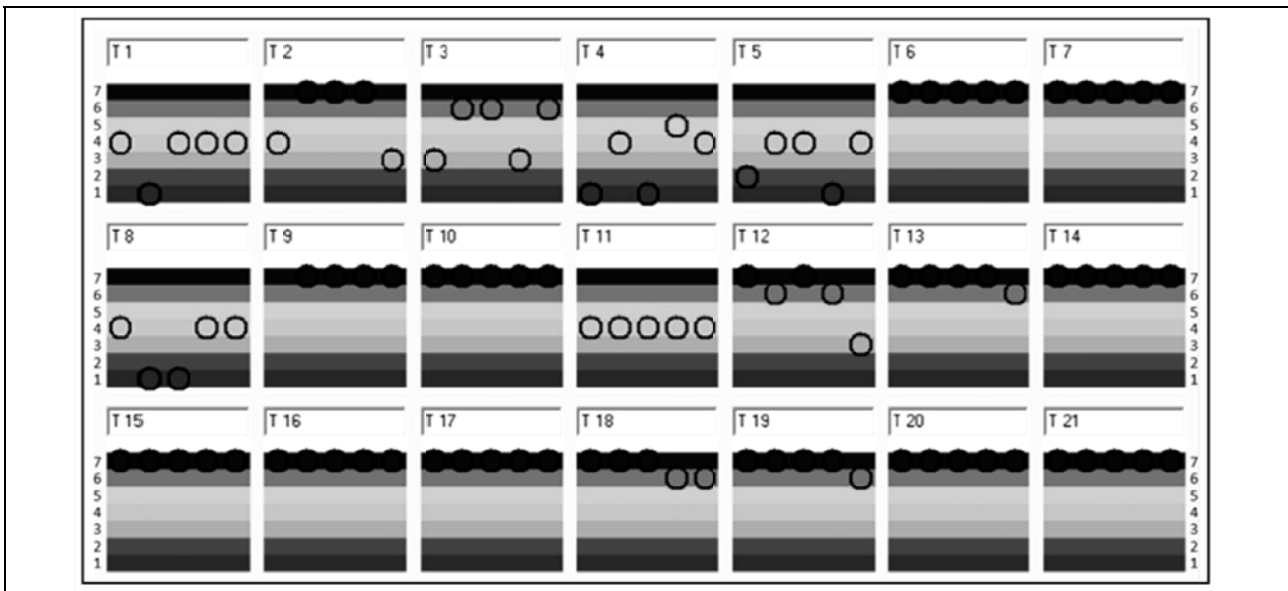


Abb. 29. Typisierung der Freiwurfmuster von Probanden T1 bis T21 (vgl. Schmidt, 2012, S. 371)

Eine weitere Studie, in der das von Perl (2001, 2004) entwickelte DyCoN eingesetzt wurde, befasste sich mit dem Zielvorgang in der Sportart Biathlon (vgl. Baca & Kornfeind, 2012). Neun österreichische Athleten, alles Mitglieder aus den beiden höchsten Kadern, schossen jeweils vier Serien mit fünf Schuss in zwei Bedingungen. In Bedingung 1 wurden die Schüsse alle auf eine Zielscheibe ausgeführt. In Bedingung 2 schossen die Probanden jeweils einen Schuss auf nebeneinander hängende Zielscheiben. Die Zeitdauer jedes Schusses (vom Repetieren bis zum Auslösen des Schusses) wurde in zehn gleichgroße Intervalle unterteilt und die Beschreibung des Zielvorgangs über acht Variablen entsprechend zeitnormiert. Der Zielvorgang mit dem Gewehr wurde über folgende Merkmale des Laufs erfasst: absolute Bewegungsreichweite in horizontaler/vertikaler Richtung, Gesamtstrecke des Laufs in horizontaler/vertikaler Richtung, horizontale/vertikale Abweichung der Laufposition zu Beginn und am Ende des Zeitintervalls sowie horizontale/vertikale Distanz zwischen der durchschnittlichen horizontalen/vertikalen Position des entsprechenden Zeitintervalls und der finalen Position beim Schießen.

Die Betrachtung der eindimensionalen Phasendiagramme, welche die Zuordnung der zehn Teilphasen des Zielvorgangs zu Neuronenclustern auf dem Netz darstellten, lieferte Informationen über den Verlauf der Zielbewegung (Abbildung 30). Zur Interpretation der Phasen konnten Baca und Kornfeind (2012, S. 299) aus den Merkmalsausprägungen herauslesen, dass die Variablen in ihrer Größe von den unteren zu den oberen Phasen zunahmen, so dass die Projektion im Phasendiagramm beim Durchlaufen der unteren Phasen eine geringere Geschwindigkeit des Laufs beim Zielen andeutet. Die untere Phase zeichnete sich zudem mit einer geringeren räumlichen Abweichung des Laufs zur finalen Schussposition aus.

Die Probanden A und B durchliefen beim Zielen im Phasendiagramm fast ausschließlich die unteren Phasen, dagegen zeigten die Phasenverläufe der Probanden F und I viele verteilte Treffer auf dem SOM. Proband F ließ eine Tendenz im Zielmuster von oberen zu unteren Phasen erkennen. Kein eindeutiges Muster beim

Zielen konnte für Proband I festgehalten werden. Somit ist für die Probanden A und B eine hohe intra-individuelle Stabilität festzuhalten. Das Aufzeigen von geringer Geschwindigkeit und kleinen räumlichen Abweichungen beim Zielen schien eine bessere Kontrolle über den motorischen Prozess des Zielens darzustellen (vgl. Baca & Kornfeind, 2012, S. 300).

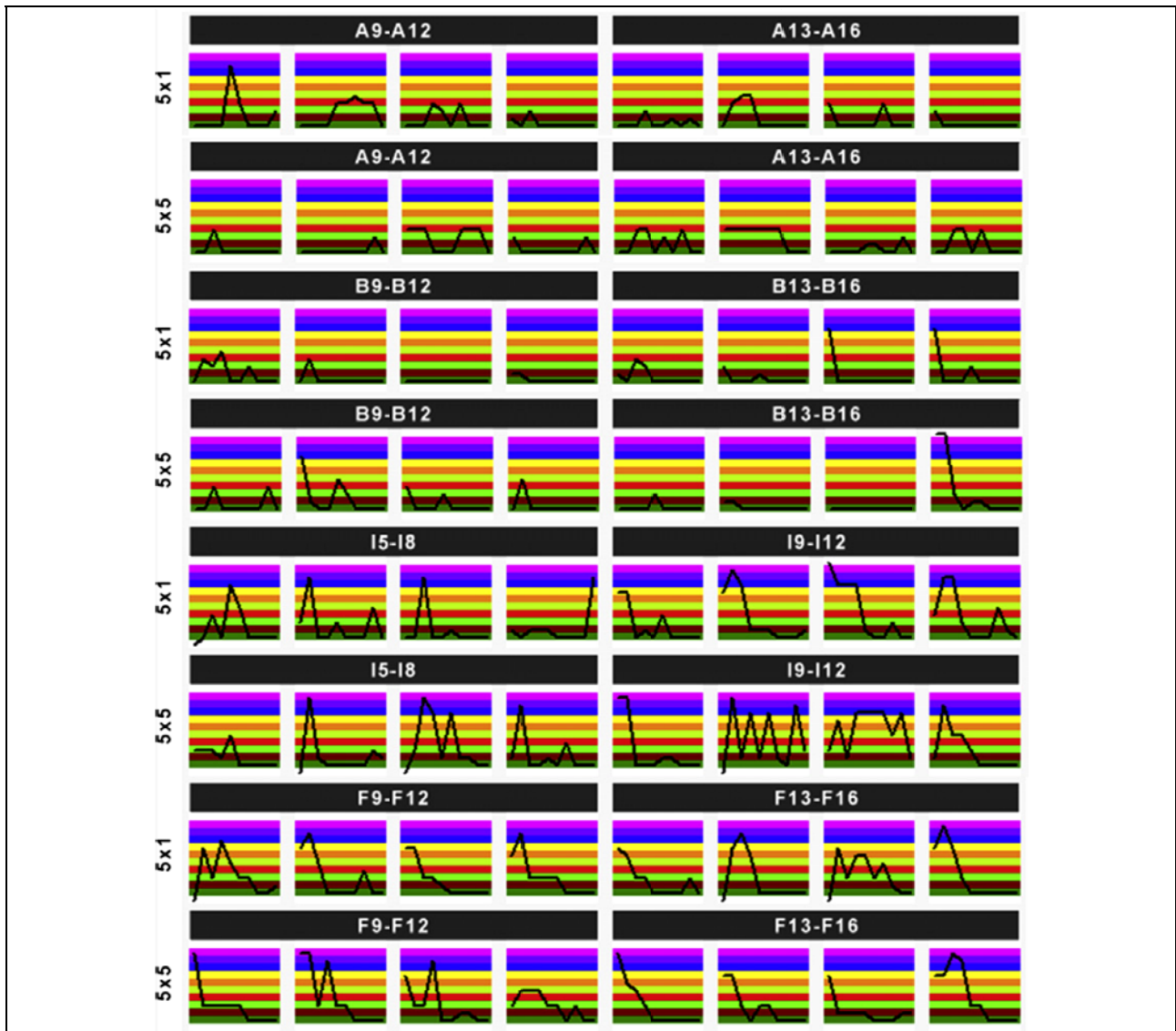


Abb. 30. Phasendiagramme von Schuss 2-5 für 4 Athleten (A, B = Nationalkader; F, I = A-Kader) (Baca & Kornfeind, 2012, S. 299)

In einem weiteren Schritt wurden alle Zielmuster unabhängig von der Bedingung für ein zweites DyCoN als Trainingsdatensatz verwendet, um unterschiedliche Zielmuster der Biathlonathleten festzuhalten. Das Ergebnis des Ähnlichkeitsvergleichs von Zielmustern durch DyCoN resultierte in einer Klassifizierung der Zielmuster nach acht Typen. Eine erneute Betrachtung der typisierten Zielmuster für einen Probanden und zwischen den Athleten zeigte deutlicher das Zielverhalten der Probanden an (Abbildung 31). Die Probanden A bis D aus dem Nationalkader wiesen im Vergleich zu den A-Kaderathleten E bis I eine höhere Stabilität in ihrem Zielverhalten auf. Sie zeigten sehr häufig das Zielmuster der untersten Ebene. Einen Ef-

fekt der Bedingung auf die Verwendung von Zielmustern konnte nicht eindeutig festgestellt werden. Proband H hatte ein stabileres Zielmuster beim Schießen von fünf Schüssen auf eine Scheibe. Andere Probanden waren sehr ähnlich in ihren Zielmustern (vgl. Baca & Kornfeind, 2012, S. 300).

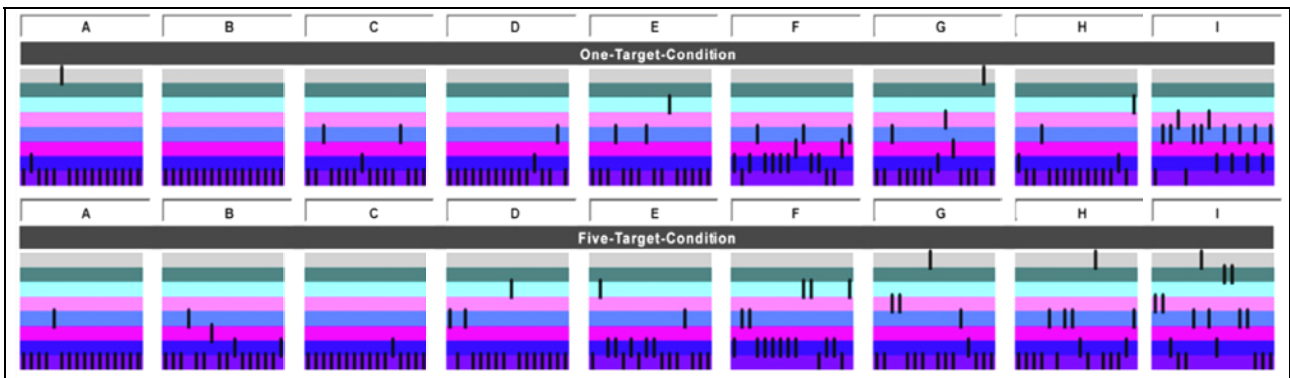


Abb. 31. Vergleich der Ähnlichkeit beim Zielen anhand von 8 Zielmustertypen (Baca & Kornfeind, 2012, S. 300)

### 2.1.3 Zusammenfassung

Die Messung von sportlichen Bewegungen kann über einen resultat- oder prozessorientierten Ansatz erfolgen. Die zeitdiskrete Analyse eines Bewegungsablaufes entspricht einer stroboskopischen Erfassung von Merkmalszuständen. Es wird die Merkmalsausprägung zu bestimmten Knotenpunkten einer Bewegung erfasst. Um Aussagen über den Verlauf und die Struktur einer sportlichen Bewegung treffen zu können, sind Merkmale zeitkontinuierlich über den gesamten Bewegungsablauf zu messen. Somit zeigen die prozessorientierten Ansätze den Vorteil, neben quantitative auch qualitative Eigenschaften einer Bewegung über Bewegungsmuster zu erfassen. Nach Schorer et al. (2007) stellen Zeitreihen von ausgewählten bewegungsrelevanten Variablen ein Bewegungsmuster dar. Für Schmidt (2010) beschreibt ein Bewegungsmuster die Grundstruktur einer Bewegung und enthält die vollständige kinematische Kette. Die Analyse von prozessorientierten Bewegungsmustern unter Verwendung des Ansatzes ‚coordination profiling‘ zielt auf eine individuelle Auswertung der Bewegungsmuster ab, um eine persönliche Profilierung bei einer gestellten motorischen Aufgabe im Bewegungsmuster erkennen zu können. Vergleiche zwischen gruppen- und Individuen bezogenen Analysen zeigen, dass Ergebnisse anhand von Gruppenmittelwerten oder -streuungen detailliertere Erkenntnisse verdecken, die mittels einer individuellen Datenanalyse erkannt werden können (vgl. Button et al., 1998). Aufgrund der größeren Aussagekraft in Bezug auf individuelle Ergebnisse ist dieser Analyseansatz einer generalisierenden Auswertung vorzuziehen.

Zur verlaufsorientierten Analyse von Bewegungsmustern stehen elementaristische und holistische Verfahren zur Verfügung. Die Unterscheidung in den Verfahren liegt in der Anzahl der Merkmale, die bei einer Messung erfasst werden und für die Datenauswertung zur Verfügung stehen. Aufgrund der kleinen Anzahl an Merkmalen sind die elementaristischen Verfahren in ihrer Aussagekraft gegenüber holistischen

Verfahren begrenzt. Bei Verwendung holistischer Verfahren sind dagegen durch die große Anzahl der Variablen körpersegmentübergreifende bzw. ganzheitliche Analysen möglich.

Bei näherer Betrachtung der holistischen Verfahren ist bei Künstlichen Neuronalen Netzen und Support Vector Machines festzuhalten, dass diese Verfahren einen großen Datenumfang benötigen und somit sehr aufwendig sind. Um diese Verfahren einzusetzen, müssen im ersten Schritt mit einem Teil der erhobenen Daten Trainingsphasen durchlaufen werden, bevor eine Analyse mit dem restlichen Datenbestand durchführbar ist.

Bei den selbstorganisierenden Netzen ist durch Vorgabe von Lernraten und Aktivierungsradien der Einsatz nach der Trainingsphase auf das spezielle Anwendungsfeld beschränkt, so dass bei neuen Fragestellungen kein weitertrainieren möglich ist und wiederum ein neues Netz trainiert werden muss. Ein zu intensives Training des Netzes kann zu einer Überanpassung führen, das aufgrund mangelnder Generalisierung schlechte Ergebnisse zur Folge haben kann. Das entwickelte Netz DyCoN von Perl (2001) reduziert oder löst die genannten Probleme. DyCoN ermöglicht einen flexiblen Einsatz auch über die Trainingsphase hinaus, indem es dynamisch Informationen akkumulieren kann. Der Trainingsaufwand kann dadurch erheblich reduziert werden und ein Übertraining ist kaum noch möglich (vgl. Perl, 2001). Die Anwendung Künstlicher Neuronaler Netze in Bewegungsanalysen unterstützt eine Individuen bezogene Auswertung.

Support Vector Machines besitzen den Vorteil, dass es die Prinzipien strukturelle und empirische Risikominimierung der statistischen Lerntheorie integrieren, somit ein Überlernen verhindern und bessere Generalisierungen für neue Datensätze realisieren (vgl. Begg & Kamruzzaman, 2005, S. 402). Nachteilig sind die langsame speicherintensive Lernphase sowie die Auswahl der Kernel-Funktionen, die subjektiv über Probieren und Erfahrungswerte festgelegt werden. Support Vector Machines erzielen in vergleichbaren Studien höhere Erkennungsraten als Künstliche Neuronale Netze (vgl. Begg, Palaniswami & Owen, 2005).

Bei den Methoden Hauptkomponentenanalyse und Verfahren linearer Distanzmaße liegen nur lineare Zusammenhänge vor. Dem gegenüber steht aber der weitaus geringere Umfang an Daten für den Analyseprozess im Vergleich zu nicht-linearen Verfahren. Die Hauptkomponentenanalyse zielt auf das Auffinden struktureller Gemeinsamkeiten in den Daten bzw. sportlichen Bewegungen ab. Die hier vorgestellten Verfahren linearer Distanzmaße verfolgen individuelle Unterschiede bei sportlichen Bewegungen. Diese Unterschiede können beispielsweise in einem Vergleich zwischen mehreren Versuchen einer Person, mehreren Personen, unterschiedlichen Disziplinen oder einzelnen Bewegungsphasen einer Bewegung liegen.

## 2.2 Merkmale der Strafstoßsituation

„Begeht ein Spieler bei laufendem Spiel eines der zehn Vergehen, die mit direktem Freistoß zu bestrafen sind, innerhalb des eigenen Strafraums, wird gegen das Team des fehlbaren Spielers ein Strafstoß ausgesprochen“ (Deutscher Fußball-Bund, 2010, S. 99).

In dieser Standardsituation spielt sich aus mathematischer Betrachtung ein ungleiches Duell zwischen Schütze und Torwart ab. Ludwig (2008a) zeigt sowohl über den Flächenansatz als auch das Glückspielmodell, dass der Schütze eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 75% besitzt ein Tor zu erzielen, im Gegensatz der geringen Chance des Torwarts (25%) einen Ball in der Strafstoßsituation abzuwehren. Eine weitere Diskrepanz in der Strafstoßsituation führt der Vergleich zwischen der benötigten Flugzeit des Balles und der Torwartabwehrhandlung auf. Der Ball fliegt bei Berücksichtigung der längsten Flugbahn und einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 80km/h in die oberen Torecken 525ms bis zum Überschreiten der Torlinie. Die Abwehrhandlung eines Torhüters dagegen benötigt mit Reagieren, Abspringen und Fliegen zum Ball etwa 700-900ms (vgl. Franks, McGarry & Hanvey, 1999, S. 25; Kollath, 1998, S. 30), bei der Untersuchung von Graham-Smith, Lees und Richardson (1999) bei einem Abwehrhecht in die obere Ecke sogar über eine Sekunde. Beide situativen Beschreibungen zeigen ein sehr klares Missverhältnis zugunsten des Schützen an. Bei Betrachtung der statistischen Erfolgswahrscheinlichkeit in der Bundesliga von 1987 bis 2007 zeigt sich ein Mittelwert von etwa 75%. Lediglich bei Welt- und Europameisterschaften wurde eine höhere Trefferquote von 75% bis 85% registriert (vgl. McGarry & Franks, 2000, S. 401). „Therefore despite the relative simplicity of this seemingly rudimentary aiming task, a large proportion of penalty kicks are missed” (Wood, 2010, S. 13).

### **2.2.1 Strategien beim Strafstoß**

Nach Kuhn, Lees, Davids und Murphy (1988) wenden Strafstoßschützen entweder die Strategie ‚keeper-independent‘ (torwartunabhängig) oder ‚keeper-dependent‘ (torwartabhängig) an, um ihre Entscheidung über die zu wählende Schussrichtung vorzunehmen. Bei der torwartunabhängigen Strategie legt der Schütze vor der Durchführung fest, in welche Ecke des Tores der Ball geschossen werden soll. Somit richtet der Schütze seine visuellen Ressourcen auf den Zielbereich und den Ball aus. Entgegengesetzt agieren Schützen mit der torwartabhängigen Strategie. Die Entscheidungsfindung des Schützen über die Schussrichtung basiert auf der bewussten Wahrnehmung des Torwarts und seiner Handlungen. Die zweite Strategie kann weiter in eine Durchführung ohne und mit Eckenvorauswahl differenziert werden (vgl. Bowtell, King & Pain, 2009, S. 94). Dies bedeutet, dass der Schütze entweder eine Torecke vor dem Anlauf zum Ball festlegt und an dieser festhält, bis die Torwartaktion in die gleiche Richtung erfolgt oder ohne Predeterminierung den Anlauf startet und flexibel in Abhängigkeit der Abwehrhandlung des Torhüters seine Schussrichtung anpasst. Kuhn et al. (1988, S. 490) ermittelte in seiner Untersuchung durch Auswertung von 66 Strafstoßen der 1. Bundesliga, dass die Spieler einen Strafstoß zu 78% torwartabhängig und nur zu 22% torwartunabhängig ausführten. Es ist aber anzumerken, dass die Kategorisierung in eine torwartabhängige und -unabhängige Strategie über die Auswertung von Videomaterial durchgeführt wurde. In einer objektiven Wahrnehmungsstudie von Wood und Wilson (2010a) mit 12 Universitätsfußballern wurden über ein mobiles ‚eye-tracking-system‘ die Blickrichtungen erfasst. Die Erfassung der Blickrichtung erfolgte bei Ausführung von Strafstoßen auf ein 1,2x3,6m großes Tor aus fünf Meter Entfernung. Bei jedem

Strafstoß wurden die visuellen Fixierungen des Auges sowie der Treffpunkt des Balles im Tor erfasst, um Aussagen über die verwendeten Strategien treffen zu können. Das Ergebnis von Kuhn et al. (1988) in Bezug auf die verwendeten Strategien konnte durch Wood und Wilson (2010a) bestätigt werden. Die Autoren grenzten darüber hinaus noch eine dritte Strategie ab, die sie mit ‚opposite-independent‘ bezeichneten. Die Auswertung der Blickrichtungen belegte, dass zur Verschleierung der Schussrichtung die Schützen bewusst in eine Torecke schauten, aber daraufhin in die gegenüberliegende Ecke schossen. Die Abgrenzung zwischen den Strategien erfolgte über die letzte Fixierung der Augen. Wenn die letzte Fixierung von der Tormitte weniger als  $\pm 60\text{cm}$  streute, wurde der Strafstoß mit der Strategie ‚keeper-dependent‘ ausgeführt. Sobald beim Strafstoß die außerhalb des Torwartbereiches erfasste letzte Fixierung ( $>\pm 60\text{cm}$ ) und die Schussrichtung übereinstimmten, schoss der Schütze mit der Strategie ‚keeper-independent‘. Die Strategie ‚opposite-independent‘ charakterisiert dagegen eine entgegen der Blickrichtung gerichtete Schussrichtung. Für die 146 berücksichtigten Strafstöße in der Auswertung konnte eine Verteilung für die drei Strategien von 52% (keeper-dependent), 26% (opposite-independent) und 22% (keeper-independent) festgehalten werden.

„The keeper-independent strategy, however, neither curbs the spatial location of gaze fixations nor their timing. It permits an optimal pattern of gaze fixations for accurate aiming of the kick” (van der Kamp, 2006, S. 469). Visuelle Informationen über das anvisierte Ziel sind für eine qualitativ hochwertige Bewegungsausführung in einer Präzisionsaufgabe sehr bedeutsam. Um ein fernes Ziel präzise zu treffen, ist eine ausreichend lange letzte Fixierung auf das vorgegebene Ziel notwendig, ansonsten ist mit einer Abnahme der Treffergenauigkeit zu rechnen (vgl. Causer, Bennett, Holmes, Janelle & Williams, 2010; Oudejans, van de Langenberg & Hutter, 2002). Genau diese Voraussetzungen erzielt der Schütze bei der Wahl der torwartunabhängigen Strategie. Mehrere Studien zeigen einen positiven Effekt auf die Präzision der Schüsse bei einem Vergleich zur torwartabhängigen Strategie (vgl. van der Kamp, 2006; Wood & Wilson, 2010a).

Neben dem Vorteil eines optimalen Zielvorgangs besteht der Nachteil, dass der Schütze keine Bewegungshinweise des Torhüters aufnehmen kann und die Schussrichtung sowie die Abwehrhandlung in die gleiche Torecke gerichtet sein können. Die Gefahr eines Fehlschusses durch eine erfolgreiche Abwehrhandlung steigt. Dieser möglichen Tatsache sind Erkenntnisse aus zwei Strafstoßstudien entgegen zu setzen. Kerwin und Bray (2006) bestimmten in ihrer Untersuchung ‚unsaveable zones‘, in dem sie mit einer Ballmaschine Fußbälle mit einer Geschwindigkeit von  $21\text{m/s}$  flach, halbhoch und hoch in die linke sowie rechte Ecke schossen. Über die Videoaufnahmen und Abdruckkräfte während der Abwehrhandlung sowie den anthropometrischen Daten von zwei erfahrenen Torhütern erstellten die Autoren ein Torwartmodell. Die Simulation der Abwehrhandlung über das Torwartmodell ergab unter Berücksichtigung der Flugzeiten des Balles eine Fläche von 28% des gesamten Tores, welche der Torwart nicht absichern kann (vgl. Kerwin & Bray, 2006, S. 326).

Einen weiteren Vorteil, den sich der Schütze bei der Strategie ‚keeper-independent‘ zu Nutzen machen kann, um den Nachteil einer nicht wahrgenommenen gleichgerichteten Abwehrhandlung zu minimieren, ist das Wissen über eine schwache Seite des Torwarts. In einer biomechanischen Untersuchung von Spratford, Mellifont und Burkett (2009) wurden sechs professionelle Torhüter in ihren Abwehrreaktionen dreidimensional über Kameras erfasst sowie die Bodenreaktionskräfte mittels Kraftmessplatte erhoben. Die Ergebnisse veranschaulichten, dass ein Torwart bei seiner weniger favorisierten Seite eine unpräzisere Flugbahn zum Ball ausführt und eine langsamere Fluggeschwindigkeit aufweist. Dies hat zur Folge, dass der Torwart im Vergleich zu seiner favorisierten Seite bei einer Parade von hohen (+9cm), halbhohen (+31cm) und flachen Bällen (+34cm) mehr Weg absolviert, bis der Ball mit den Händen berührt wird (vgl. Spratford et al., 2009, S. 243).

Nach Auswertung von 422 Strafstoßen kamen Zhou und Inomata (2009) zu dem Ergebnis, dass bei der Wahl einer torwartunabhängigen Strategie zwei optimale Ausführungsvarianten bestehen:

- 1) Anlauf in einem Winkel von 15-45° und Schuss mit dem Innenspann hoch in die linke Ecke
- 2) Anlauf in einem Winkel von 15-45° und Schuss mit dem Innenspann hoch in die Mitte des Tores

Die erste Variante begünstigt die Trefferwahrscheinlichkeit des Schützen positiv, weil das gewählte Ziel am weitesten vom Torwart entfernt ist und somit zu einer langen Flugzeit beim Abwehrverhalten führt. Darüber hinaus ist es sehr wahrscheinlich, dass dieser Bereich zu den ungesicherten Zonen des Tores zu zählen ist (vgl. Kerwin & Bray, 2006). Für die zweite Variante könnte als Begründung die Befangenheit eines Torhüters herangezogen werden, bei einem Strafstoß nicht untätig in der Mitte des Tores stehen bleiben zu wollen, da normalerweise von außenstehenden Akteuren eine Abwehrhandlung erwartet wird. Eine Befragung von Torhütern bestätigte, dass die Durchführung einer Sprungaktion in der Situation Strafstoß als Norm angesehen wird (vgl. Bar-Eli, Azar, Ritov, Keidar-Levin & Schein, 2007, S. 615). Anhand von empirischen Daten aus Spielen der Bundesliga und europäischen Wettbewerben belegte Loy (1996, S. 71), dass bei lediglich 9 von 500 Strafstoßen der Torwart keine Abwehrhandlung ausgeführt hatte. Eine weitere Überprüfung dieses Phänomens in der Praxis erfolgte bei Spielen aus der 1. Bundesliga sowie der Serie A (Italien) und Ligue 1 (Frankreich) durch Berger (2010), der festhalten konnte, „dass die Schützen eine weit höhere Wahrscheinlichkeit haben in die Mitte zu schießen, als die Torwarte dort stehen zu bleiben“ (Berger, 2010, S. 148).

Die Strategie ‚opposite-independent‘ verbindet Eigenschaften der Strategien ‚keeper-independent‘ und ‚keeper-dependent‘. Zum einen blickten die Probanden nie ins Zentrum auf den Torwart (keeper-independent), zum anderen fixierten sie aber auch nicht den Zielbereich (keeper-dependent). Überraschenderweise konnten Wood und Wilson (2010a) in ihrer Untersuchung aufzeigen, dass im Vergleich zur

torwartunabhängigen Strategie die Präzision der Schüsse kaum schlechter gewesen ist, obwohl die letzte Fixierung für die entgegengesetzte Richtung registriert wurde. Auch bei näherer Betrachtung der vier Strafstöße des erfolgreichsten Probanden, bei denen diese Strategie angewendet wurde, zeigte sich kein einheitliches Bild beim Einbeziehen der vorherigen Fixierungen. Bei zwei von vier Strafstößen erfolgte eine vorherige Fixierung auf den Torwart mit der letzten Fixierung deutlich außerhalb des Torzentrums. Bei den beiden anderen Strafstößen waren die vorherigen Fixierungen gleich der letzten Fixierung außerhalb des Torwartbereichs. Die Erweiterung der möglichen Strategien durch Blicktäuschung im Interaktionsprozess zwischen Torwart und Schütze ist nach Aussage von Bakker, Oudejans, Binsch und van der Kamp (2006) nicht notwendig, da Torhüter für die Antizipation der Schussrichtung nicht die Blickrichtungen des Schützen berücksichtigen.

Im Gegensatz zur torwartunabhängigen werden in der torwartabhängigen Strategie viele Hinweisreize und situative Informationen wahrgenommen, die sich auf die Entscheidungsfindung, die Bewegungsausführung und schließlich auf das Resultat des Strafstoßes auswirken können. Im folgenden Kapitel werden diese Einflüsse der torwartabhängigen Strategie über Wahrnehmungsstudien aufgezeigt.

## **2.2.2 Wahrnehmungsaspekte beim Strafstoß**

### *2.2.2.1 Einflussnahme des Torwarts*

Die Beobachtung des Torwarts kann auf unterschiedliche Weise den Schützen beeinflussen. Alleine eine nicht bewusst wahrnehmbare Verschiebung der Position des Torwarts auf der Torlinie lässt den Schützen intuitiv die größere ungeschützte Torecke wählen. Dies belegt eine Auswertung von 200 Videoaufnahmen von Strafstoßsituationen, bei denen in 190 Fällen der Torwart nicht mittig im Tor platziert war ( $\pm 9,95\text{cm}$ ) und die Schützen mehrheitlich die größere Fläche im Tor als Schussrichtung wählten. Bei einem durchgeführten Test am Computer stellten Masters, van der Kamp und Jackson (2007) zudem die Situation eines Strafstoßes nach, bei der der Torhüter 14 von der Tormitte abweichende Stellungen einnehmen konnte. In der Studie sahen die Probanden ein projiziertes Tor mit Oliver Kahn auf einer Leinwand und mussten den Ball stets in die größere Torhälfte schießen. Im Anschluss der Versuche wurden die Probanden gefragt, wie sicher sie sich in ihrer Entscheidung fühlten, die größere Torecke ausgewählt zu haben. Die Überzeugung über die richtige Wahl stieg ab einer Flächendifferenz von 3% zwischen den Torhälften signifikant an. In einer Folgestudie sollten die Probanden den Strafstoß nur ausführen, wenn sie der Meinung waren, dass der Torwart im Zentrum des Tores stand. Die Schussrichtung konnte durch die Probanden frei gewählt werden. Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass trotz der Wahrnehmung, der Torhüter stünde mittig im Tor, bei einer Flächendifferenz von 1,6-3% über 50% der Strafstöße ausgeführt und die Bälle in die Ecke mit der größeren Torfläche geschossen wurden. Erst ab 3% Flächenverschiebung sank die Anzahl der durchgeführten Strafstöße stark ab und die Probanden konnten die Abweichung der Torwartposition vom



Zentrum erkennen. Somit halten die Autoren fest, dass in realen Strafstoßsituationen eine Verschiebung der Torwartposition von 6-10cm optimal wäre, um die Wahrscheinlichkeit um 10% zu erhöhen, dass der Schütze den Ball auf die Seite des Tores mit der größeren Fläche platziert (vgl. Masters et al., 2007, S. 222-223). Neben der räumlichen Stellung kann auch die Körperhaltung des Torwarts auf den Schützen Einfluss nehmen. In einer Studie von van der Kamp und Masters (2008) wurden verschiedene Körperhaltungen eines Torwarts miteinander verglichen, um einen Effekt basierend auf optischen Täuschungen der Müller-Lyer-Illusion festzustellen. Den Probanden wurden Bilder eines Torwarts mit beispielweise erhobenen oder abgesenkten Armen gezeigt, die eben diesen klassischen Müller-Lyer-Illusionen entsprachen. Das Resultat lieferte einen Nachweis, dass bestimmte Körperhaltungen die Größe eines Torwarts aus Sicht der Schützen vergrößern oder verkleinern konnten. Ableitend daraus könnte in der Realität ein Torwart seine Körperhöhe um 3-5% vergrößern, wenn er die Arme schräg über Kopf halten würde (Y-Position). In einer Folgestudie mussten Probanden auf ein Handballtor einen Siebenmeter ausführen. Die Entfernung der Wurfweite war der Torgröße von 68% angepasst. Zusätzlich zur Projektion des Tores wurde wiederum der Torhüter mit unterschiedlichen Körperhaltungen auf einer Leinwand dargestellt. Die Auswertung der Würfe ergab, dass die Probanden bei einer groß wirkenden Körperhaltung in horizontaler Achse den Ball näher zum Pfosten platzierten und in vertikaler Achse den Ball flacher warfen (vgl. van der Kamp & Masters, 2008, S. 952-953). Aus ihren Ergebnissen folgern die Autoren, dass ein Torwart in einer Strafstoßsituation mit einer T-Position, „which make the goalkeeper look smaller are likely to result in the penalty-taker aiming the ball nearer to the body (extrapolation to real life sizes indicates that the difference amounts to 5,7cm), which may increase the likelihood of a save“ (van der Kamp & Masters, 2008, S. 953).

Den Einfluss von Störbewegungen untersuchten bereits Hoppstädter und Kohl (1984) vor der Einführung der heute gültigen Torwartregel, die besagt, dass der Torwart sich vor dem Ballkontakt auf der Linie nach links und rechts bewegen darf. In ihrer Untersuchung verglichen sie regelkonforme und regelwidrige Abwehrverhalten der Torhüter in Bezug auf ihren Erfolg Schüsse abzuwehren. Bei Gegenüberstellung der beiden Torwartverhalten zeigte sich ein signifikanter Unterschied. Das damals regelwidrige Torwartverhalten erreichte eine höhere Anzahl an gehaltenen (27,2%) und verschossenen Bällen (41,7%) im Vergleich des regelkonformen Agierens (16,4% bzw. 31,4%). „Ursache dafür könnte sein, daß der Schütze durch das Torwartverhalten irritiert war. Aufgrund der Finte entschließt er sich dazu, eine eventuell schon vorher getroffene Entscheidung zu ändern“ (Hoppstädter & Kohl, 1984, S. 243). Ähnliche Erkenntnisse erhalten Nunez, Ona, Bilbao und Raya (2005) in ihrer Untersuchung über Antizipationsmerkmale im Abwehrverhalten von Torhütern. Die Erfolgswahrscheinlichkeit bei Schüssen ohne vorherige Bewegungen lag mit 4,54% deutlich unter der Erfolgsquote von 21,36% für Schüsse mit sogenannten Antizipationsbewegungen. Anzumerken ist jedoch, dass die Anzahl der Schüsse mit regungslosem Torwartverhalten bis zum Ballkontakt nur 22 von 222 Strafstöße umfasste. In einer aktuelleren Studie von

Wood und Wilson (2010b) wurden in zwei unterschiedlichen Druckbedingungen Strafstöße von 18 Universitätsfußballern absolviert. In jeder Bedingung schossen die Probanden fünf Strafstöße, davon drei mit still stehendem und zwei mit einem sich bewegendem Torhüter. Wood und Wilson (2010b) konnten anhand der Untersuchungsergebnisse unabhängig von der geringen und hohen Drucksituation einen Abfall der Trefferquote bei Strafstößen mit „störendem“ Torwart registrieren. Die geringere Trefferanzahl resultierte nicht durch Fehlschüsse neben und über das Tor, sondern durch eine signifikant größere Anzahl gehaltener Bälle. Im Durchschnitt waren die Trefferbereiche der Schüsse um 32cm näher am Torwart, wenn dieser sich bewegte.

#### 2.2.2.2 *Einfluss der Blickrichtung*

In der Untersuchung von van der Kamp (2006) wurden die unterschiedlichen Strategien miteinander verglichen und die Schusspräzision anhand der Abweichung von einem Zielfeld (60cm<sup>2</sup>) bestimmt. Bei der Registrierung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die predeterminierte torwartabhängige Strategie weiter in eine Ausführung „kein Schussrichtungswechsel“ und „Schussrichtungswechsel“ differenziert wurde. Erstgenannte Situation war gegeben, wenn kein Wechsel zwischen den mittig im Tor auf Bodenniveau angebrachten Lampen während des Anlaufes eintrat. Van der Kamps (2006) Untersuchung zeigte die Abnahme der Schussgenauigkeit und die Erhöhung der Fehler bei den bestehenden Strategien in der Reihenfolge „torwartunabhängig“, „torwartabhängig-kein Schussrichtungswechsel“ und „torwartabhängig-Schussrichtungswechsel“. Unterschiede wiesen die Ergebnisse schon bei der Präzision der Schüsse im Vergleich der torwartabhängigen Strategie ohne Schussrichtungswechsel mit der torwartunabhängigen Strategie auf. Bereits die Beobachtung einer möglichen Bewegung des Torwarts und das Berücksichtigen einer Bewegungsalternative könnten einen negativen Einfluss auf die Bewegungsausführung bzw. das Bewegungsergebnis herbeigeführt haben (vgl. van der Kamp, 2006, S. 472).

Eine weitere experimentelle Studie von Wood und Wilson (2010a) erfasste Strafstöße von Fußballspielern aus 5m auf ein entsprechend großes Tor (1,2x3,6m) über Videokamera und mobilem ‚eye-tracking-system‘, um Aussagen über die Präzision bei verschiedenen Handlungsstrategien zu treffen. Die Probanden schossen 14 Strafstöße mit einem Schritt Anlauf in einer torwartunabhängigen und torwartabhängigen Strategie auf das Tor. Dem entsprechend wurden als Fixierungspunkte beim Anlauf der optimale Trefferbereich nahe dem Pfosten (keeper-independent) und ein markiertes Kreuz in der Mitte des Tores (keeper-dependent) vorgegeben. Zur Bestimmung der Blickrichtung war die letzte Fixierung auf das Tor mit einer Mindestlänge von 120ms vor dem Ballkontakt entscheidend.

Der Vergleich der beiden Merkmale letzte Fixierung und Treffpunkt des Balles ergab für die Bedingung ‚keeper-independent‘ eine signifikante Korrelation ( $R^2=0,62$ ,  $p<0,1$ ) zwischen den Messwerten. „This indicated that participants looked where they wanted to hit and hit where they were aiming for“ (Wood & Wilson, 2010a, S. 299). Die sehr geringe Korrelation in der Bedingung ‚keeper-dependent‘

( $R^2=0,13$ ,  $p=0,306$ ) stärkt dagegen die korrekte Durchführung und Einhaltung der Blickrichtung im Zentrum des Tores. In Bezug auf die Präzision der Schüsse in den Bedingungen ist festzuhalten, dass die fehlende Zeit zur visuellen Aufnahme von relevanten Zielparametern eine Verschiebung der Treffpunkte zur Mitte des Tores um 17cm und zudem eine signifikant größere Streuung innerhalb der Strafstoßserie verursachte (Abbildung 32).

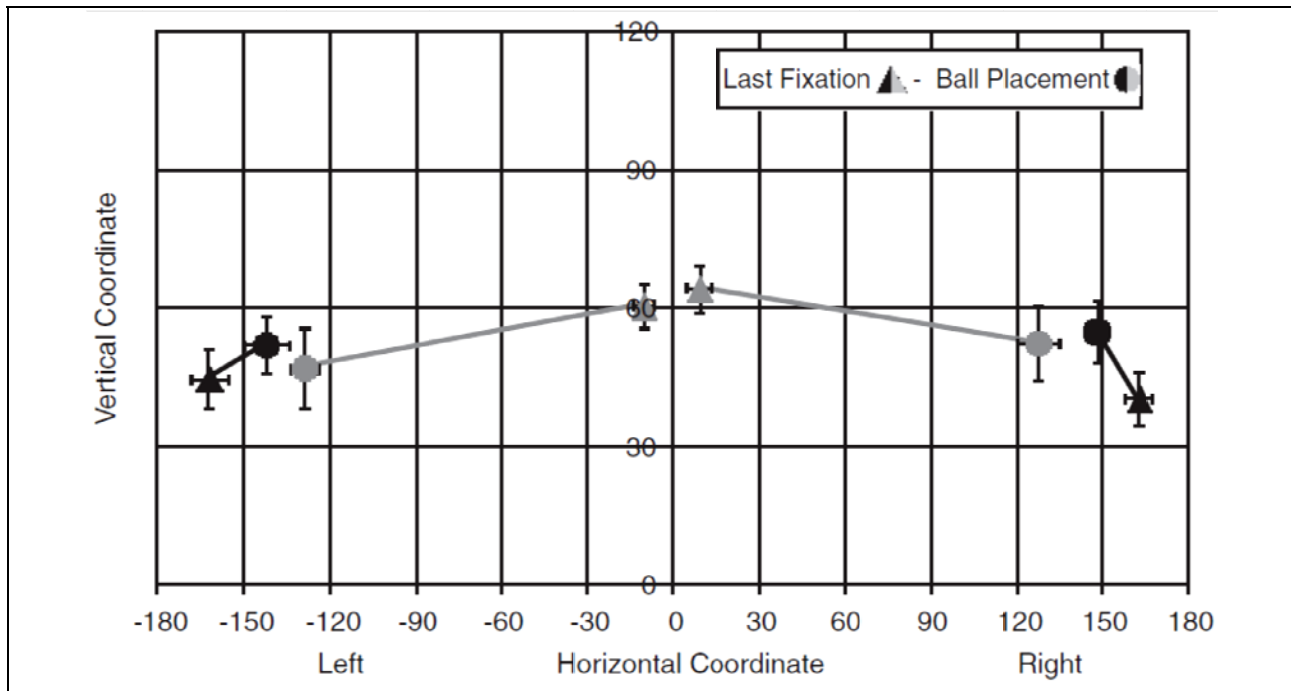


Abb. 32. Schusspräzision für Bedingungen ‚keeper-independent‘ und ‚keeper-dependent‘ (Wood & Wilson, 2010a, S. 298)

In einer Folgestudie wurden mit dem gleichen Versuchsaufbau Strafstöße gegen einen Torhüter ausgeführt. Der Torwart wurde angewiesen, eine standardisierte Körperhaltung einzunehmen und sich erst ab dem Ballkontakt zu bewegen. Die 12 Universitätsfußballer schossen wiederum 14 Strafstöße mit der Aufgabe, maximal viele Bälle erfolgreich im Tor zu platzieren. Die gruppenbezogene Auswertung der Schusspräzision zeigt für die drei Strategien den aufgezeigten Effekt der vorherigen Studie (siehe Tabelle 1). Wenn der Schütze sich für die torwartabhängige Strategie entschieden hatte, war die Distanz zwischen Auftreffpunkt des Balles und der Mitte des Tores geringer. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen Bakker et al. (2006) in ihrer Strafstoßuntersuchung, in der sie durch Vorgabe der Blickrichtungen ‚Torwart‘ und ‚Freiraum‘ für die Schützen die Strategie festlegten. Über alle Schüsse gesehen konnte resümiert werden, dass Schüsse mit einem ersten Blick auf den Torwart in der Regel erfolgloser waren (64% Fehler) als Schüsse mit einem ersten Blick auf den freien Raum (25% Fehler). Erfolgreiche Strafstöße wiesen hier zu 82% einen Treffpunkt innerhalb der Reichweite des Torwarts, über oder neben dem Tor auf. Bei den Ergebnissen ist jedoch zu beachten, dass ein Anlauf mit einem Schritt und eine zugelassene maximale Bewegungsrealisierung von einer Sekunde sowie

kein Interaktionsprozess zwischen Schütze und Torwart durch die Projizierung eines still stehenden Torhüters gegeben waren.

Tab. 1. *Durchschnittliche Schusspräzision (Standardabweichung) und Blickverhalten bei Strafstoßen mit Torwart (Wood & Wilson, 2010a, S. 304)*

	<b>Keeper-dependent</b>	<b>Keeper-independent</b>	<b>Opposite-independent</b>
Accuracy (cm)	104,3 (39,2)	116,0 (38,1)	114,0 (28,0)
Location of Last Fixation (cm)	15,8** (18,8)	124,4 (28,6)	122,8 (40,3)
Number of Fixations	2,6 (1,4)	2,2 (1,0)	2,2 (1,1)
Duration of Last Fixation (ms)	328,8 (237,9)	223,3 (83,9)	316,8 (123,5)

\*\*p<0,001

### 2.2.2.3 *Bewegungserkennung durch Hinweisreize*

Ein entscheidendes Ziel der Strategie ‚keeper-dependent‘ ist das Erkennen von Bewegungshinweisen. Für den Schützen ist es wichtig, vor der Ausführung des Strafstoßes genügend visuelle Hinweisreize zu erfassen, um die Abwehrhandlung des Torwarts zu antizipieren und so die Erfolgswahrscheinlichkeit zu erhöhen. Welche Hinweisreize des Torwarts der Schütze verwenden kann und wann diese spätestens vorliegen sollten, um sie rechtzeitig vor dem Ballkontakt nutzen zu können, werden im Folgenden geklärt.

Die Untersuchung von Bewegungshinweisen bei Torhütern ist von Nunez et al. (2005) anhand eines 15-Segmenten-Modells vorgenommen worden, welches auf Basis von 240 Torwartaktionen erstellt wurde. Die Auswertung der Torwartbewegungen ergab einen deutlichen Hinweis, ob der Torhüter seinen Sprung in die linke oder rechte Ecke ausführte. Als Merkmal mit der größten Signifikanz stellte sich der Kniewinkel des Beines heraus, das zur Sprungrichtung abgewandt war. Wenn die Stellung des Knies innerhalb des letzten Schritts beim Anlauf einen Winkel von mehr als 150° überschritt, also nahezu gestreckt war, zeigte das Modell mit einer Wahrscheinlichkeit von 98,2% einen Sprung in die vom Knie gegenüberliegende Ecke an. Somit kann der Schütze seine Aufmerksamkeit auf die Beinregion richten und andere Körperregionen bei der torwartabhängigen Strategie vernachlässigen. Gleichmaßen beobachtet der Torwart die Ausführungen des Schützen während der Anlauf- und Schussbewegung, um ebenfalls richtungsspezifische Hinweise wahrzunehmen. Aus der Sicht des Torwarts liegen zahlreiche Studien vor, welche die Bewegung des Schützen in einer Strafstoßsituation über Expertenbefragungen, unter Einsatz von Okklusionstechniken und durch Blickrichtungserfassung untersuchten (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997; Keller, Hennemann & Alegria, 1979; Kim & Lee, 2006; McMorris & Colenso, 1996; McMorris, Copeman, Corcoran, Saunders & Potter, 1995; Savelsbergh, van der Kamp, Williams & Ward, 2005; Savelsbergh, Williams, van der Kamp & Ward, 2002; Williams & Burwitz, 1995).

Der gewählte Startpunkt des Anlaufes legt den Laufweg zum Ball fest und stellte den ersten Bewegungshinweis des Schützen dar (vgl. Franks & Harvey, 1997;

Neumaier, Poel & Standtke, 1987; Williams & Burwitz, 1995). In der Endphase, also dem Übergang von Anlauf- zur Schussbewegung, ermittelten die Studien die Oberkörperneigung (vgl. Franks & Harvey, 1997), den Schwungbogen des Schussbeins (vgl. Williams & Burwitz, 1995), die Ausrichtung des Schuss- und Standfußes, Unterschenkels und der Hüfte (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997; McMorris & Colenso, 1996; Neumaier et al., 1987; Williams & Burwitz, 1995) sowie die Stellung der Arme (vgl. Keller et al., 1979) als richtungsspezifische Merkmale. Die Wahrscheinlichkeit, richtige Entscheidungen auf Basis dieser Merkmale zu antizipieren, nahm zum Ballkontakt hin zu (siehe Abbildung 33).

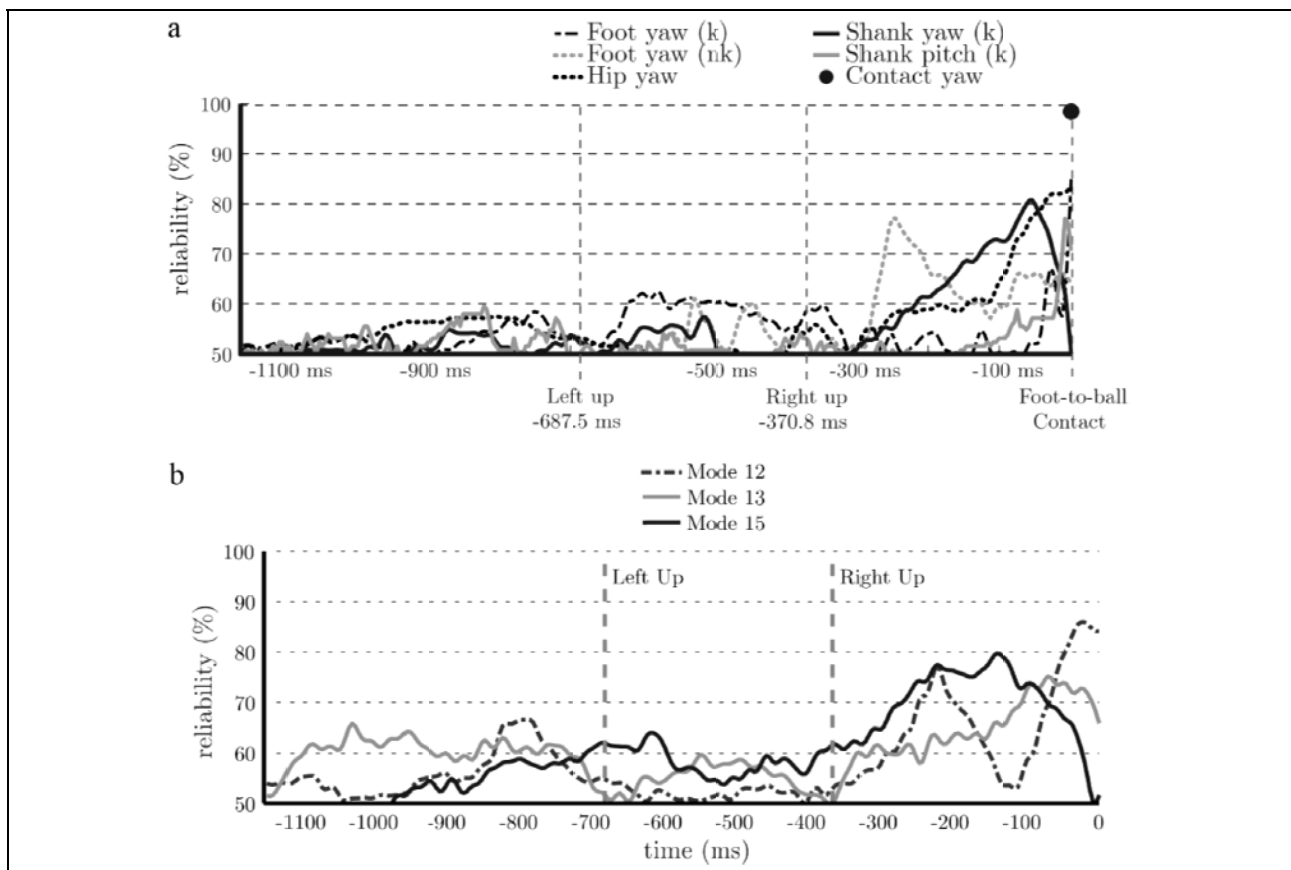


Abb. 33. Reliabilität von lokalen (a) und verteilten (b) Hinweisreizen im Bewegungsverlauf zur Erkennung von Schussrichtungen (Diaz et al., 2012, S. 6)

Das bedeutendste Merkmal zur Erkennung der Schusshöhe stellte die Neigung des Oberkörpers dar, wobei aus der Perspektive des Torwarts die Bestimmung der Höhe im Vergleich zur Seitigkeit geringere Erfolgswahrscheinlichkeiten aufwies (vgl. Savelsbergh et al., 2005; Savelsbergh et al., 2002; Williams & Burwitz, 1995). Savelsbergh et al. (2002, S. 283) bestimmten in ihrer Studie mit Torhütern, die als Experten einzustufen waren, für die Schussrichtung sowie Schusshöhe eine Antizipationsleistung von 84% bzw. 43%. „Ein besonderes Merkmal des Schützen stellt die Öffnung der Arme dar, die sich während der letzten Aufsetzbewegungen des Torschützen entgegengesetzt zur Schußrichtung ausstrecken“ (Keller et al., 1979, S. 398). Bei Betrachtung des Standbeins erschien die Ausrichtung des Fußes (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997; Keller et al., 1979) neben dem Ball etwa

150-250ms als deutliches Merkmal, weil dieser Hinweis in den Untersuchungen von Diaz et al. (2012) sowie Franks und Harvey (1997) mit etwa 80% die Schussrichtung vorhersagen konnte. Die Ausrichtung des Fußes nach rechts deutete auf einen Schuss in die rechte Ecke und umgekehrt. Bei neutraler Fußposition resultierten die beiden Schussrichtungen Tormitte oder rechte Torecke bei Schüssen mit dem rechten Fuß und linke Torecke bei Schüssen mit dem linken Fuß (vgl. Harvey, 1999, S. 11). Der letzte richtungsspezifische Hinweis aus der Bewegung des Schützen zeigt sich beim Ballkontakt. Neben den genannten Hinweisen der Schussbewegung konnten anhand des Merkmals Treffpunkt Fuß-Ball (vgl. Franks & Harvey, 1997; Kuhn et al., 1988; McMorris & Colenso, 1996; Williams & Burwitz, 1995) Informationen über die Schussrichtung gewonnen werden. Eine Übersicht über das Auftreten der Bewegungshinweise ist in Tabelle 2 geben (vgl. Dicks, Button & Davids, 2010).

Tab. 2. Chronologie von Bewegungshinweisen des Strafstoßschützen zur Antizipation der Schussrichtung (mod. nach Dicks et al., 2010, S. 1114)

<b>Zeitpunkt des Auftretens vor Ballkontakt</b>	<b>Hinweise zur Bewegungserkennung</b>
1452ms	Anlaufwinkel
465ms	Hüftwinkel während des Anlaufs
252ms	Oberkörperneigung Winkel des Schussfußes und -beines während der Schussphase Hüftwinkel kurz vor dem Ballkontakt Standbein Armhaltung Blickfeld zwischen Ball und Beine
155ms	Platzierung des Standbeins Knierotation Schussfuß zum Zeitpunkt des Ballkontakts Hüftposition beim Ballkontakt

Neben den bislang lokalen Hinweisreizen konnten Diaz et al. (2012) in ihrer Studie zusätzlich verteilte Hinweisreize feststellen. Die Zusammensetzung der Hinweismuster verteilte sich entweder auf mehrere Körpersegmente oder sogar über den gesamten Körper. In einem Fall zeigten sich Hinweise an den Armen, Händen, Beinen und Füßen beider Körperseiten. Das verteilte Hinweismuster erreichte erstmalig etwa 200ms vor dem Ballkontakt eine Reliabilität von 75% und steigerte sich 137ms vor dem Ballkontakt auf einen maximalen Wert von 79,7%. Die Erkenntnisse über die lokalen und verteilten richtungsspezifischen Hinweise wurden in einer Studie mit 17 Probanden geprüft. Die Probanden sollten von 126 Schüssen die Schussrichtung erkennen. Die gezeigten Strafstöße enthielten unveränderte und manipulierte Schüsse. Die manipulierten Strafstöße beinhalteten Schüsse, bei denen entweder nur Informationen über die Schussrichtung aus dem Merkmal Hüfte

zu entnehmen waren und alle anderen Merkmale neutralisiert wurden (hip-only) oder bei unveränderten Stimuli das Merkmal Fuß-Ball-Kontakt neutralisiert wurde (ball-unreliable). Die schlechte Leistung im Erkennen der Schussrichtung mit dem Stimuli ‚hip-only‘ im Vergleich zu ‚ball-unreliable‘ und unveränderten Stimuli, ließ Diaz et al. (2012, S. 12) die Vermutung aufstellen, dass die Antizipation der Schussrichtung auf verteilten Bewegungshinweisen beruht, da zum einen das lokale Merkmal Hüftposition deutlich schlechtere Erfolgsquoten bewirkte (~50%) und zum anderen das Entfernen des lokalen Merkmals Fuß-Ball-Kontakt nur eine geringe Reduzierung der Erfolgswahrscheinlichkeit verursachte (74,3%).

Zu berücksichtigen ist bei den gegebenen Antizipationsmerkmalen für Schützen und Torhüter das zeitliche Auftreten in Bezug auf die eigene Bewegungsausführung, denn im Verlauf jeder sensomotorisch gesteuerten Bewegung gibt es einen Zeitpunkt, zu dem die Bewegung nicht mehr aktiv unterbrochen oder verändert werden kann. Dieser Zeitpunkt ist der sogenannte ‚point of no return‘ (vgl. De Jong, Coles, Logan & Gratton, 1990). Der Begriff wird von De Jong et al (1990) bei Aufgabenstellungen von Start-Stop-Stimuli verwendet. Die Aufgabenstellungen verlangen eine motorische Handlung, z. B. das schnellstmögliche Drücken eines Knopfes, welche durch ein Startsignal ausgelöst wird. Nach einer kurzen Verzögerung erscheint jedoch ein Stop-Signal, woraufhin die Ausführung der Bewegung unterbrochen werden soll. Die Unterbindung der Bewegung ist umso unwahrscheinlicher, desto mehr Zeit zwischen Start- und Stop-Signal liegt. Die Entscheidung darüber, ob eine Bewegung ausgeführt oder noch rechtzeitig gehemmt werden kann, lässt sich gut an einem Wettrennen der zwei parallel ablaufenden Prozesse in einer Reaktionsaufgabe veranschaulichen. Prozess 1 umfasst die Abschnitte von Erkennung des Start-Signals, Auswahl der Antwort und Vorbereitung bis Ausführung der Antwort. Prozess 2 beinhaltet die Erkennung des Stop-Signals sowie die Hemmung der Antwort und tritt in das Rennen ein, wenn ein Stop-Signal erscheint. Die Entscheidung über eine Antwort durch den Probanden fällt bei diesem Modell mit dem Ausgang des Rennens. Gewinnt Prozess 1, so kann der Proband trotz eines Stop-Signals die eingeleitete Bewegung nicht mehr unterbinden und die Bewegungsantwort wird ausgeführt (vgl. De Jong et al., 1990, S. 164; Logan & Cowan, 1984).

Mehrere Untersuchungen über den ‚point of no return‘ zeigten dieses Phänomen auch in der Strafstoßsituation. Durch Vorgabe der Schussrichtung erst während des Anlaufes mussten die Schützen spontan auf eine Richtungsänderung reagieren. Laut Bowtell et al. (2009) und van der Kamp (2006) traten ab einer Zeitspanne von weniger als 600ms bis zum Ballkontakt bereits Fehler auf und die Schützen konnten nicht 100% der ausgeführten Strafstöße in die torwartfreie Ecke platzieren. Die Studie von van der Kamp (2006, S. 473) konnte bei dieser Verarbeitungszeit sogar nur 75% korrekte Strafstöße aufweisen. Weniger als 50% erfolgreiche Treffer konnten etwa 350-400ms vor dem Ballkontakt festgehalten werden (vgl. Bowtell et al., 2009, S. 97; van der Kamp, 2006, S. 473). Im Vergleich zu den aufgeführten Studien, welche ihre Ergebnisse mittels im Feld realisierter Strafstöße erzielten, weist die Laborstudie von Morya, Ranvaud und Pinheiro (2003, S. 92) für die 75% Schwelle mit 240-245ms einen späteren ‚point of no return‘ auf. Die Probanden

sollten die Anlaufbewegung des Schützen sowie die Abwehrhandlung des Torwarts beobachten, die gleichermaßen als schwarzer Punkt auf dem Bildschirm dargestellt waren und sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegten. Bei der torwartabhängigen Strategie war die Aufgabe der Probanden, die Richtung des Torwarts vor dem Ballkontakt wahrzunehmen und einen Joystick in die entgegengesetzte Ecke zu bewegen.

Die Gegenüberstellung der zeitlichen Hinweisreize zeigt, dass für den Torwart bereits sehr früh richtungsspezifische Informationen vorlagen, die aber erst kurz vor dem Ballkontakt eine ausreichende Reliabilität aufwiesen. Die Analyse über die Initialisierung der Abwehrhandlung von Torhütern ergab einen Startpunkt zwischen 500ms und 50ms vor dem Ballkontakt (vgl. Dicks, Davids & Button, 2010; Nunez et al., 2005; Savelsbergh et al., 2002). Somit könnten beispielsweise nicht alle Torhüter die Ausrichtung des Standfußes (-250ms) als deutliches Antizipationsmerkmal in den Entscheidungsprozess einfließen lassen. Die Auswertungen von über 500 Strafstoßen durch Loy (1996, S. 71) zeigten auf, dass sich 65,6% der Torhüter deutlich vor dem Ballkontakt bewegten und bei 29% die Abwehrhandlung kurz vor der Schussausführung erfolgte. Lediglich bei 5,4% der Strafstöße agierte der Torwart nach der Ballberührung. Die große Zeitspanne für die Initiierung der Sprungbewegung war laut Dicks et al. (2010) vom individuellen körperlichen Handlungsvermögen abhängig, welches sich in der Absprunggeschwindigkeit und der Flugpräzision ausdrückte. Ein schneller Torwart könnte seine Bewegung zeitlich näher am Ballkontakt ausführen und somit länger visuelle Hinweise über die Schussbewegung sammeln, aber trotzdem rechtzeitig den Ball abwehren. Darüber hinaus vermied eine späte Handlung des Torhüters klare Bewegungshinweise für den Schützen vor dem ‚point of no return‘. Ein sich spät bewegnender Torwart zeigte somit nach den Erkenntnissen der Studien während des letzten Schritts eines Schützen zum Ball seine wahrnehmbaren Bewegungshinweise. Zum Zeitpunkt 350-100ms vor dem Ballkontakt war aber das adäquate Reagieren für den Schützen bereits stark eingeschränkt und die Wahrscheinlichkeit erfolgreich den Strafstoß auszuführen nahm ab (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997; Lees & Owens, 2011; Savelsbergh et al., 2005).

### **2.2.3 Kinematische Analyse des Strafstoßes**

Neben der zu wählenden Strategie muss sich ein Schütze vor dem Anlauf auch Gedanken über Anwendung der Schusstechnik machen. Dem Schützen stehen mit dem Vollspannstoß, Innenspannstoß und Innenseitstoß drei unterschiedliche Techniken zur Verfügung, die in der Regel zur Realisierung des Schusses verwendet werden. Der Vollspannstoß ist die Technik, welche die größten Schussgeschwindigkeiten erzielen kann. Dagegen weisen der Innenspannstoß und der Innenseitstoß eine größere Präzision auf (vgl. Sterzing, Lange, Wächtler, Müller & Milani, 2009). Die videobasierte Auswertung von Strafstoßen in der Untersuchung von Loy (1996, S. 72) ergab nur einen geringen Anteil an sogenannten Gewaltschüssen (10%). Harte Schüsse als zweite Kategorie traten mit einer Häufigkeit von 21,4% auf. Der größte Anteil aber fiel den weichen Schüssen mit 68,6% zu. Der Autor trifft



keine detailliertere Abgrenzung bei der Erfassung der Schusshärten und weist diesen keine Stoßtechniken zu (vgl. Loy, 1996). Festzuhalten bleibt aber, dass ein weicher Schuss mit den Techniken Innenspannstoß und Innenseitstoß realisiert werden würde. Kellis und Katis (2006, S. 161) zeigten in einem Übersichtsartikel zu biomechanischen Eigenschaften der Spannstoßtechniken auf Basis von 27 Studien eine Variation der Schussgeschwindigkeiten von 14,9-35,0m/s. Die Leistungsniveaus der Probanden streuten von trainierten Sportlern über Amateurspieler bis zu professionellen Fußballern. Im Vergleich berichteten Neilson und Jones (2005) bei professionellen Spielern aus englischen Ligen sowie Sterzing et al. (2009) bei Spielern aus der 4.-6. deutschen Liga Geschwindigkeiten bei Vollspannstößen von 25,5-33,1m/s. Innenspannstöße erreichten ähnliche Schussgeschwindigkeiten im Vergleich zu Vollspannstößen (vgl. Sterzing et al., 2009). Innenseitstöße streuten stark bei Messungen der Geschwindigkeit zwischen 14,1-28m/s (vgl. Kawamoto, Miyagi, Ohashi & Fukashiro, 2007, S. 190; Lees & Owens, 2011, S. 129; Sterzing et al., 2009).

Der Zusammenhang von Schusstechnik und Präzision zeigt, dass Vollspannstöße unplatziertes waren als die Gruppe der „platzierten“ Schüsse (vgl. Loy, 1996, S. 76). Beim Vergleich von Schüssen mit den drei Schusstechniken aus sechs Meter Entfernung fanden Sterzing et al. (2009) bei Amateurfußballern einen signifikanten Unterschied bei der Präzision von Innenseitstößen ( $28,83 \pm 7,90\text{cm}$ ) zu Voll- ( $45,93 \pm 9,90\text{cm}$ ) und Innenspanntechnik ( $39,65 \pm 11,02\text{cm}$ ) heraus (Abbildung 34). Dieser Unterschied war unabhängig von den Vorgaben in der Studie, entweder einen möglichst präzisen oder einen maximal schnellen Schuss auszuführen (vgl. Sterzing et al., 2009).

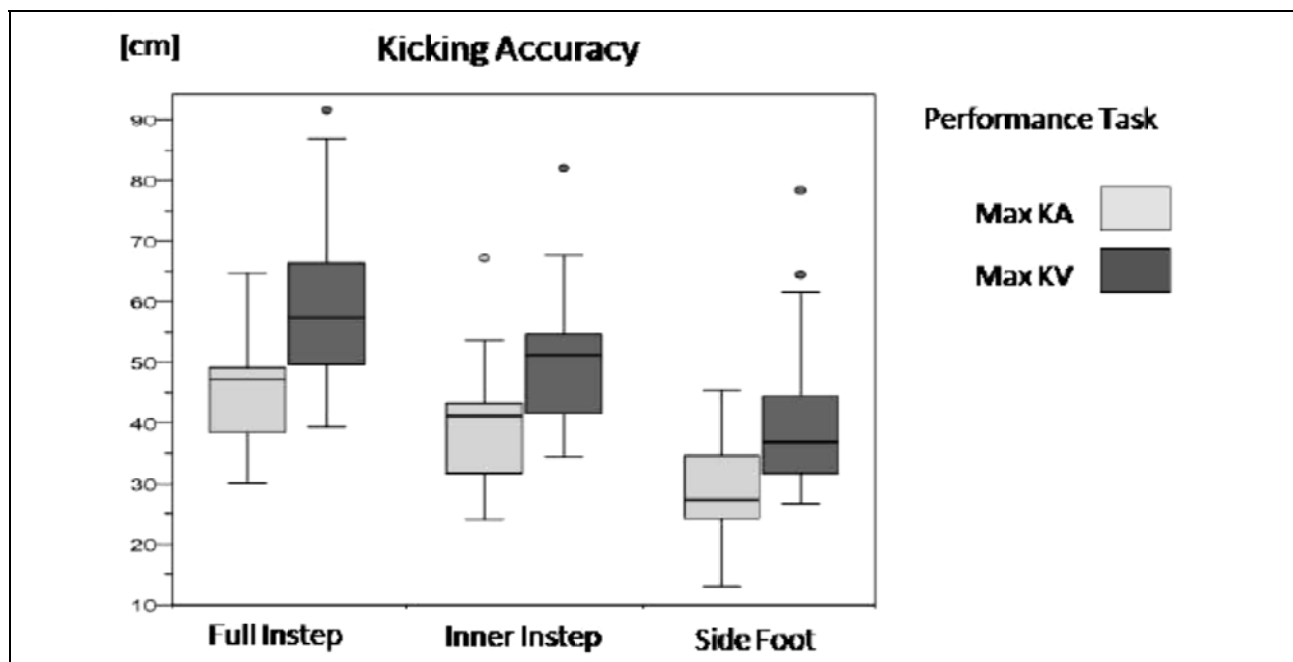


Abb. 34. Schusspräzision von Schusstechniken in Abhängigkeit der Aufgabenstellungen Schusspräzision (Max KA) und Schussgeschwindigkeit (Max KV) (Sterzing et al., 2009)

Ein Einfluss des Anlaufwinkels auf die Präzision oder Geschwindigkeit des Schusses konnte bei der Untersuchung von Scurr und Hall (2009) nicht nachgewiesen werden. Sieben Amateurspieler führten Vollspannstöße mit einem individuell gewählten Anlaufwinkel sowie den Vorgaben 30°, 45° und 60° auf ein 0,6x0,6m großes Zielfeld in der rechten unteren Ecke aus. Die Ergebnisse in Bezug auf die untersuchten Merkmale Schusspräzision und Schussgeschwindigkeit ergaben für alle Bedingungen ähnliche Werte. Letztendlich konnte festgehalten werden, dass die Veränderung eines individuellen Anlaufes – zumindest bei nicht-professionellen Spielern – einen sehr leichten Rückgang bei Präzision und Geschwindigkeit verursachte (vgl. Scurr & Hall, 2009). Im Gegensatz dazu stellten Isokawa und Lees (1988) bei einem Anlaufwinkel mit 45° die höchste Schussgeschwindigkeit fest. Der Zusammenhang mit der Genauigkeit des Schusses wurde aber in dieser Studie nicht untersucht. Williams und Griffiths (2002) analysierten die Anlaufbewegung in Bezug auf die Schussrichtung links und rechts. Schüsse eines Rechtsschützen in die rechte Ecke waren mit einem größeren Anlaufwinkel verbunden (35°) und Schüsse in die linke Ecke wiesen einen kleineren Anlaufwinkel auf (23°). In Abhängigkeit der persönlichen Fertigkeiten muss ein Schütze folglich abwägen, welche Technik günstig ist. Bei einer torwartunabhängigen Strategie wäre ein harter und platzierter Schuss empfehlenswert, wobei die Strategie ‚keeper-dependent‘ auch mit langsameren Schussgeschwindigkeiten zum Erfolg führen kann, wenn der Schütze die torwartfreie Seite des Tores rechtzeitig erkennen kann.

Neben den resultatbezogenen Merkmalen Schussgeschwindigkeit und Trefferpräzision, untersuchten mehrere Forschungsarbeiten die körperbezogenen Merkmale der Schussausführung. Die Variabilität in der Bewegungsausführung beim Strafstoß prüften Sforza, Dugnani, Mauro, Torri und Ferrario (1997) anhand von 150 Strafstoßen dreier Probanden, die mit dem rechten Fuß in die rechte untere Ecke auf ein Zielfeld mit den Maßen 60x60cm schossen. Die Schüsse wurden mit 4m Anlauf sowie einem Anlaufwinkel von 30° einheitlich durchgeführt. Die Analyse erfolgreicher Schüsse (62-68%) wurde mittels einer Morphologischen Variationsanalyse (MVA) mit 16 Körpermarkern und einem Ballmarker vorgenommen. Die Datenverarbeitung berücksichtigte alle zweidimensionalen euklidischen Distanzen zwischen den 17 Orientierungspunkten. Nach der Bestimmung der Variabilitätskoeffizienten für die entsprechenden Distanzen von Markerpaaren berechneten Sforza et al (1997, S. 243) die globale Variabilität des diskreten Bewegungsmusters über den Morphologischen Variationsfaktor (MVF), der den durchschnittlichen Wert aller Variabilitätskoeffizienten eines Probanden darstellt. Die Probanden wiesen mit einem durchschnittlichen MVF zwischen 4,05 und 5,21 über die Messreihe hinweg alle eine hohe intra-individuelle Wiederholbarkeit in ihren Bewegungsmustern auf (vgl. Sforza et al., 1997, S. 244). Die Probanden zeigten höhere Variabilität beim Abstand des Standbeines zum Ball sowie bei der relativen Kopf- und Armhaltung bezogen auf den Rumpf. Die Autoren deuteten diese Variation als kompensatorische Anpassungen zur Erhaltung des Gleichgewichts. Eine hohe Konstanz in den Abstandsberechnungen dagegen wiesen die Probanden zwischen den Kniemarkern von Schuss- und Standbein auf.

Richtungsspezifische Unterschiede im Knie- und Sprunggelenk des Schussbeines untersuchten Goktepe et al. (2008) in der Strafstoßsituation. Fünf Probanden schossen jeweils fünf Strafstöße in vier Zielfelder, die mit einer Größe von 50cm<sup>2</sup> in den Ecken des Tores markiert waren. Die Bewegung wurde über fünf reflektierende Marker am Hüft-, Knie- und Sprunggelenk, der Ferse sowie dem fünften Mittelfußknochen durch zwei Videokameras (60Hz) erfasst. Die Bewegungsanalyse umfasste die Schwungphase, den Zeitpunkt des Ballkontakts sowie die Ausschwingphase des Schussbeines. Die Ergebnisse für den Winkel-Verlauf im Kniegelenk zeigten in keiner Phase einen signifikanten Unterschied bei Schüssen in die vier Zielfelder. „Players tend to use the similar knee flexion strategy for all targets“ (Goktepe et al., 2008, S. 46). Der Winkel-Verlauf im Sprunggelenk dagegen unterschied sich signifikant beim Ballkontakt sowie in der Ausschwingphase. Paarweise Vergleiche des Sprunggelenkwinkels von Schüssen in unterschiedliche Zielfelder zum Zeitpunkt des Ballkontakts ergab eine größere Streckung im Sprunggelenk, wenn die Strafstöße in die rechte untere ( $\bar{x}=77,6 \pm 10,5^\circ$ ) und rechte obere Ecke ( $\bar{x}=84,4 \pm 10,1^\circ$ ) geschossen wurden. Im Vergleich wiesen Schüsse in die linke untere ( $\bar{x}=56,2 \pm 9,6^\circ$ ) sowie linke obere Ecke ( $\bar{x}=59,6 \pm 4,2^\circ$ ) einen geringen durchschnittlichen Winkel im Sprunggelenk auf. Ähnliche Ergebnisse lagen für den Vergleich der Strafstöße in die rechte untere ( $\bar{x}=66,8 \pm 7,1^\circ$ ) und linke untere Ecke ( $\bar{x}=56,2 \pm 6,0^\circ$ ) der Ausschwingphase vor.

Eine Studie von Lees und Owens (2011) untersuchte neben den Unterschieden verschiedener Stoßtechniken ebenfalls richtungsspezifische Merkmale bei Schüssen in der Strafstoßsituation, auf die im Folgenden eingegangen wird. Acht semi-professionelle Spieler führten Strafstöße mit immer gleichem Anlaufwinkel und -weg (2 Schritte) auf ein aufgehängtes Netz aus. Aufgrund der geringeren Größe des Zieles im Vergleich zu einem regelkonformen Tor wurde die Entfernung des Strafstoßpunktes verringert, um bei einem Schuss in die Ecke den gleichen Winkel aufzuweisen. Die Schüsse sollten mit Vollspann- und Innenseitstoß geradlinig sowie mit Innenseitstoß in die linke Ecke des Netzes geschossen werden. Die Bewegung wurde über reflektierende Marker an den Beinen und der Hüfte über acht Hochgeschwindigkeitskameras (240Hz) erfasst. In die Analyse gingen 10 Strafstöße für jede Schussvorgabe ein. Die Merkmalsstichprobe umfasste die Ausrichtung des Sprunggelenks (foot progression angle), die Beuge-Streckbewegung im Hüft-, Knie- und Sprunggelenk, die Ab-/Adduktion des Ober- und Unterschenkels des Schussbeines sowie die Rotation in der Hüfte. In Bezug auf richtungsspezifische Hinweise zeigte sich beim Vergleich der Mittelwerte von Strafstößen in das Zentrum ( $1,9 \pm 11,2^\circ$ ) und die Ecke ( $19,9 \pm 9,9^\circ$ ) mit der Innenseite, dass die Fußspitze in die Schussrichtung ausgerichtet war. Signifikante Unterschiede zwischen den Schussrichtungen ergaben sich auch bei den Mittelwerten des Merkmals Hüftrotation zum Zeitpunkt des Standbeinaufsatzes (Mitte:  $-22,7^\circ$ ; Ecke:  $-9,6^\circ$ ) sowie des Fuß-Ball-Kontaktes (Mitte:  $-28,0^\circ$ ; Ecke:  $-5,7^\circ$ ). Die Hüftstellung orientierte sich an der Schussrichtung.

In einer Studie von Egan, Verheul und Savelsbergh (2007) sollten Probanden mit unterschiedlichem Expertiseniveau präzise und feste Torschüsse in zwei Bedin-

gungen ausführen. Die Bedingungen beinhalteten eine Ausführung mit ruhendem und rollendem Ball. Ein möglicher Effekt der unterschiedlichen Bedingungen auf die Schussbewegung und deren Ergebnis sollte überprüft werden. Probanden mit mehr Erfahrung (Vereinsspieler) schossen genauer als Probanden mit weniger Erfahrung (keine Vereinsspieler). Vereinsspieler konnten sogar bei rollendem Ball präziser schießen als mit ruhendem Ball. Bei unerfahrenen Probanden nahm die Präzision der Schüsse mit rollendem Ball ab. Bei näherer Betrachtung der Bewegung in Bezug auf die Bedingungen zeigten die Ergebnisse, dass die Probanden eine schnellere Bewegungsausführung aufwiesen, wenn sie den ruhenden Ball spielen sollten (Tabelle 3). Die maximale Fußgeschwindigkeit ergab zwischen den Gruppen und auch für die Bedingungen keine Unterschiede und betrug im Durchschnitt  $13,4 \pm 1,8$  m/s. Im Vergleich der beiden Bedingungen konnte zudem festgehalten werden, dass Probanden mit ruhendem Ball eine größere und schnellere Kniebeugung ausführten. Dieser Unterschied stellte sich auch beim Vergleich der Bewegungsmuster beider Gruppen heraus. Erfahrene Probanden nahmen signifikant größere Beugungen im Knie ein als unerfahrene Probanden. Zudem führten Vereinsspieler die Beschleunigungsphase des Schussbeines in einer kürzeren Dauer durch.

Tab. 3. Mittelwerte (*M*) und Standardabweichungen (*SD*) der kinematischen Daten für beide Expertiseniveaus bei ruhenden und rollenden Bällen; *c* = signifikante Effekte zwischen Bedingungen; *g* = signifikante Effekte zwischen Gruppen (Egan et al., 2007, S. 429)

Variable	Less experienced				Experienced				CV
	Stationary		Moving		Stationary		Moving		
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	
Accuracy score <i>g</i>	1,9	4,7	1,7	7,2	2,9	3,7	3,2	5,5	
Max foot velocity (m/s)	13,1	1,5	12,9	7,2	14,5	2,7	13,4	1,8	0,15
Hip ROM (°)	48,1	11,4	50,6	1,6	53,3	14,4	46,4	16,2	0,19
Knee ROM (°) <i>g</i>	64,7	13,1	59,4	14,7	74,2	12,6	67,3	13,4	0,13
Time max hip angle (s) <i>cg</i>	0,25	0,05	0,27	0,04	0,21	0,03	0,24	0,03	0,18
Time min knee angle (s)	0,05	0,04	0,06	0,01	0,05	0,01	0,06	0,01	0,27
Time max hip velocity (s)	0,07	0,02	0,06	0,03	0,05	0,04	0,05	0,04	0,87
Timing of max hip angle relative to timing of min knee angle (s) <i>cg</i>	0,20	0,04	0,21	0,04	0,16	0,03	0,19	0,03	0,23

Die Größe der Variabilität für die beiden Gruppen und Bedingungen anhand des Variabilitätskoeffizienten war auf gleichem Niveau. Am deutlichsten variierte die zeitliche Kopplung des maximalen Hüftwinkels mit dem minimalen Kniewinkel. Aufgrund der beibehaltenen proximodistalen Bewegungsrealisierung vermuteten die Autoren, dass die zeitlichen Muster zwischen den Gelenken stabiler sind als die lokalen Merkmalsausprägungen (vgl. Egan et al., 2007). Die Autoren interpretierten die hohe Variabilität zwischen den Schüssen als ‚motor equivalence‘ (Egan et al., 2007, S. 431), d.h. unterschiedliche motorische Ausführungen können zum gleichen Ergebnis führen. Zudem deuteten Egan et al. (2007) die Veränderungen im

Koordinationsmuster als funktionale Variabilität, um die Anforderungen in den zwei Bedingungen optimal zu bewältigen.

Teixeira (1999) prüfte den Einfluss der Ballgröße (22cm vs. 11cm Durchmesser) und Zielvorgabe (3x4m vs. 40x40cm Trefferfläche) auf die Bewegungsausführung. An der Untersuchung nahmen fünf erfahrene Fußballer teil, die mit maximaler Geschwindigkeit die Schüsse aus etwa 1,5m Anlauf ausführen sollten. Die Bewegung wurde über drei Hochgeschwindigkeitskameras (180Hz) aufgenommen. Dabei wurde ein Körpermarker am Sprunggelenk erfasst, um die Merkmale Bewegungszeit, Verlauf des Sprunggelenks (Amplitude), Durchschnittsgeschwindigkeit, Geschwindigkeit beim Ballkontakt sowie Zeitspanne zwischen Geschwindigkeitsmaximum und Ballkontakt zu bestimmen (Tabelle 4). Signifikante Unterschiede konnten für die Merkmale Bewegungszeit und Zeit nach Geschwindigkeitsmaximum im Bewegungsvollzug festgestellt werden. Die Präzisionsaufgabe führte bei den Probanden zu einer Reduzierung der Ausführungsgeschwindigkeit. In beiden Bedingungen – kleiner Ball und Präzisionsaufgabe – konnte vor dem Ballkontakt eine längere Phase der Geschwindigkeitsabnahme bestimmt werden, um die Performance zu verbessern oder zumindest zu stabilisieren. Der Einfluss einer anspruchsvollen Präzisionsaufgabe hat einen höheren Effekt auf die Bewegung und zeigt größere Anpassungen als die Veränderung der Ballgröße.

Tab. 4. Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) der kinematischen Daten für die Untersuchungsbedingungen (Teixeira, 1999, S. 787)

Measure	Small Ball				Large Ball			
	Defined Target		Undefined Target		Defined Target		Undefined Target	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Movement time, msec	136,40	19,00	116,60	13,83	144,50	19,85	125,50	6,47
Amplitude, m	0,94	0,07	1,05	0,12	1,03	0,09	1,10	0,05
Average velocity, m/sec	7,04	1,30	9,07	0,24	7,30	1,43	8,89	0,70
Velocity at contact, m/sec	12,90	1,77	15,40	0,84	13,12	1,73	15,25	0,75
Time after peak velocity, msec	14,70	3,51	6,00	8,04	5,10	7,41	4,80	5,53

Harrison und Mannering (2006) verglichen acht Schüsse mit dem „starken“ und „schwachen“ Bein bei sieben erfahrenen Fußballspielern. Die Schussbewegung wurde dreidimensional mit 50Hz erfasst. Die Analyse umfasste als Merkmale den seitlichen Neigungswinkel der Hüfte, den individuellen Anlaufwinkel, Distanz zwischen Standbein und Ballzentrum und Kniegelenkwinkel des Stand- sowie Schussbeines beim Ballkontakt. Die Auswertung wurde über eine ANOVA durchgeführt und die Effektstärke über das partielle Eta-Quadrat angegeben. Bei Ausführungen mit dem bevorzugten Bein waren der Anlaufwinkel kleiner ( $p=0,034$ ;

$\eta_p^2=0,55$ ), der Standbeinaufsatz näher am Ball ( $p=0,001$ ;  $\eta_p^2=0,87$ ) und die Neigung im Oberkörper ( $p=0,002$ ;  $\eta_p^2=0,83$ ) sowie die Kniestreckung größer ( $p=0,009$ ;  $\eta_p^2=0,71$ ). Die Autoren wiesen dazu auf die Größe der Variabilität zwischen den Kniewinkeln hin. Das bevorzugte Knie zeigte 2,5 Mal mehr Variabilität im Kniewinkel des Schussbeines während des Ballkontakts als beim Kniegelenk des nicht-favorisierten Beines. Mit Bezug auf die Theorie dynamischer Systeme argumentierten Harrison und Mannering (2006), dass mit Zunahme des Fertigkeitserwerbs eine größere Variabilität in der Bewegungsausführung aufzufinden ist.

Die Studie von Amiri-Khorasani, Osman und Yusof (2009) untersuchte Unterschiede beim Schießen aus 11m auf ein 2x2m großes Zielfeld für verschiedene Spielerpositionen (15 Probanden). Dazu nahmen die Autoren die Bewegung über vier Kameras (60Hz) auf und bestimmten die dreidimensionalen Daten von zehn anatomischen Orientierungspunkten (Hüft-, Knie-, Sprunggelenk, fünfter Mittelfußknochen und Ferse beider Beine) sowie dem Ballzentrum. Daraus berechneten Amiri-Khorasani et al. (2009) die maximale Winkelgeschwindigkeit für den Ober- und Unterschenkel in der Schwungphase. Als resultatbezogenes Merkmal wurde die maximale Ballgeschwindigkeit bestimmt. Für die Analyse wurde jeweils nur ein Schuss für jeden Probanden berücksichtigt und der Schuss sollte aus 3m Entfernung sowie 0° Anlaufwinkel durchgeführt werden. Die Autoren konnten signifikante Unterschiede zwischen Angreifern und Verteidigern sowie zwischen Mittelfeldspielern und Abwehrspielern bei Winkelgeschwindigkeiten des Unter- und Oberschenkels sowie der resultierenden Ballgeschwindigkeit aufzeigen (Tabelle 5). Mittelfeldspieler führten die Spannstoße vor den Angreifern und den Verteidigern stets mit den größten Winkelgeschwindigkeiten aus (vgl. Amiri-Khorasani et al., 2009, 23).

Tab. 5. Unterschiede zwischen den Spielerpositionen für die bestimmten Merkmale (vgl. Amiri-Khorasani et al., 2009, 23)

Variable	Defender	Midfielder	Striker
max of thigh angular velocity (m/s)	1702,4 ± 114,3	2240,8 ± 29,0	994,0 ± 47,4
max of lower leg angular velocity (m/s)	780,85 ± 58,4	1055,2 ± 12,0	37,3 ± 1,75
max ball velocity	22,2 ± 2,8	30,1 ± 5,4	29,3 ± 1,6

Neben der Untersuchung auftretender Effekte durch unterschiedliche Aufgabenstellungen oder Bälle, verglich Potthast (2010) kinematische Merkmale bei Schüssen auf unterschiedlichen Spielflächen. Für den Vergleich von Naturrasen mit zwei Kunstrasen (mit Kunststoffgranulat oder Sand-Kunststoff-Gemisch) wurden von 17 Spielern der höchsten deutschen Amateurklasse fünf Vollspannstoße vom Zentrum des Strafraumes auf vorgegebene Zielfelder im Tor erfasst. Die dreidimensionale Bewegungsanalyse umfasste ein Bewegungsmodell über die anatomischen Orientierungspunkte Kopf sowie Hand-, Ellbogen-, Schulter-, Hüft-, Knie-, Sprunggelenke und Fußspitzen beider Körperseiten. Tabelle 6 zeigt die kinematischen und resultatbezogenen Ergebnisse der Bewegungsausführungen auf den drei Rasenplätzen

im direkten Vergleich. Es konnten keine Unterschiede zwischen den Merkmalen Anlaufwinkel und -geschwindigkeit bei den Plätzen festgestellt werden. Jedoch traten signifikante Unterschiede im Abbremsen der Bewegung nach dem Standbeinaufsatz, der maximalen Fußpronation sowie dem Neigungswinkel im Standbein zum Zeitpunkt des Ballkontaktes bei Bewegungen sowohl zwischen den Kunstrasen und dem Naturrasen als auch zwischen beiden Kunstrasenplätzen auf. Besonders das Abbremsen der Bewegung auf dem Kunstrasen mit Sand-Kunststoffgemisch wird vorsichtiger von den Spielern umgesetzt als bei den beiden anderen Plätzen. Zudem waren beim Standbein auf dem Kunstrasen mit gemischtem Granulat eine deutlich stärkere Pronationsbewegung sowie rückwärtige Neigung des Unterschenkels zu erkennen. Darüber hinaus wurden signifikante Differenzen für die Schüsse der Probanden bei den resultatbezogenen Merkmalen Ballgeschwindigkeit und Trefferquote im Vergleich aller Rasenplätze registriert.

Tab. 6. Durchschnittswerte und Standardabweichungen kinematischer und resultatbezogener Merkmale. TD = touch down; + = Signifikanz ( $p < 0,05$ ) zwischen Naturrasen und Kunstrasen (Gemisch); # = Signifikanz ( $p < 0,05$ ) zwischen Kunstrasen (Gemisch) und Kunstrasen (Granulat); n.s. = keine Signifikanz (Potthast, 2010, S. 32)

	Naturrasen	Kunstrasen (Granulat)	Kunstrasen (Gemisch)	
Run up direction	17,9 ± 8,0°	16,0 ± 2,2°	14,2 ± 8,4°	n.s.
Run up velocity	3,0 ± 1,7 m s <sup>-1</sup>	2,7 ± 1,4 m s <sup>-1</sup>	3,0 ± 1,4 m s <sup>-1</sup>	n.s.
Deceleration	13,0 ± 2,5 m s <sup>-2</sup>	12,3 ± 3,7 m s <sup>-2</sup>	10,6 ± 3,2 m s <sup>-2</sup>	+#
Maximal foot pronation	20,1 ± 12°	19,8 ± 14,1°	29,9 ± 18,4°	+#
Backwards inclination of leg at TD	23,3 ± 5,4°	26,6 ± 7,0°	30,4 ± 7,9°	+#
Ball velocity	99 ± 11 km h <sup>-1</sup>	103 ± 10 km h <sup>-1</sup>	95 ± 6 km h <sup>-1</sup>	+#
Good shots	36%	32%	16%	+#

Die Studien von Diaz et al. (2012) sowie Lees und Barton (2005), welche im Kapitel 2.1.2 bereits erläutert wurden, sind an dieser Stelle noch einmal zu erwähnen.

Diaz et al. bestimmten über eine Hauptkomponentenanalyse und einer logistischen Regression richtungsspezifische Körpermerkmale sowie deren Antizipationsvermögen. Die Ergebnisse führten beispielsweise die Ausrichtung des Standbeins (77,9%) als erster sichtbarer Hinweis oder den Fuß-Ball-Kontakt (98,4%) mit der höchsten Reliabilität auf. Die Erkenntnisse aus wahrnehmungsbasierten Studien wurden von Diaz et al. (2012) somit aus kinematischer Sicht belegt.

Anhand einer Analyse mit selbstorganisierenden künstlichen Netzen zeigten Lees und Barton (2005) individuelle Unterschiede in der Ausführung von Vollspannstößen zwischen Spielern, die rechts oder links die Schüsse ausführten. In einer weiterführenden Analyse jeweils für Spieler mit rechtem und linkem Schussbein waren deutliche inter-individuelle Unterschiede und intra-individuelle Ähnlichkeiten bei den Trajektorien zu erkennen (vgl. Lees & Barton, 2005, S. 87).

### **2.2.4 Zusammenfassung**

Schützen können den Strafstoß mit den Strategien ‚keeper-independent‘, ‚keeper-dependent‘ und ‚opposite-independent‘ ausführen (vgl. Kuhn et al., 1988; Wood & Wilson, 2010a).

Neben dem Vorteil eines optimalen Zielvorgangs besteht für die Strategie ‚keeper-independent‘ der Nachteil, dass der Schütze keine Bewegungshinweise des Torhüters aufnehmen kann und die Schussrichtung sowie die Abwehrhandlung in die gleiche Torecke gerichtet sein können.

Bei der Strategie ‚keeper-dependent‘ besteht für den Schützen die Möglichkeit auf die Abwehrhandlung zu reagieren, da er während des Anlaufes die Bewegungen des Torwarts wahrnimmt. Durch den in das Torzentrum ausgerichteten Blick leidet aber die Präzision des Schusses und Störbewegungen oder die Stellung des Torwarts können aus Sicht des Schützen einen nachteiligen Effekt haben. Ein Vorteil stellt das Beobachten von Hinweisreizen durch die Bewegung des Torwarts dar. Über den Kniegelenkwinkel des zur Sprungseite abgewandten Beins, könnte ein Schütze Abwehrfinten von der endgültigen Sprungrichtung unterscheiden. Im Gegensatz dazu muss sich ein Schütze im Klaren sein, dass durch seine Anlauf- und Schussbewegung ebenfalls richtungsspezifische Bewegungshinweise für den Torhüter zu erkennen sind. Beispielsweise können über die Stellung von Hüfte und Standbein oder auch verteilte Hinweismuster Torhüter die Schussrichtung antizipieren (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997; Keller et al., 1979; Kim & Lee, 2006; McMorris & Colenso, 1996; McMorris et al., 1995; Savelsbergh et al., 2005; Savelsbergh et al., 2002; Williams & Burwitz, 1995).

Die Strategie ‚opposite-independent‘ verbindet Eigenschaften der Strategien ‚keeper-independent‘ und ‚keeper-dependent‘. Zum einen blicken die Probanden nicht ins Zentrum auf den Torwart, zum anderen fixieren sie nicht den Zielbereich. Wood und Wilson (2010a) zeigen in ihrer Untersuchung auf, dass im Vergleich zur Strategie ‚keeper-independent‘ die Präzision der Schüsse kaum schlechter ist.

Die Abgrenzung der Strafstoßstrategien durch Blickrichtungsanalysen kann nicht aufzeigen, welche Informationen die Spieler über peripheres Sehen wahrnehmen. Die Aufnahme der Blickrichtungen über eine Frequenz von 25Hz erfasst zudem nur einen Ausschnitt. Eine Befragung der Probanden als methodische Erweiterung im Anschluss eines Schusses wäre eine Möglichkeit individuelle Strategien abzufragen. Die Bestimmung der Bewegungshinweise für den Antizipationsprozess erfolgt über videobasierte Strafstoßsequenzen (u.a. McMorris & Colenso, 1996; Williams & Burwitz, 1995), bei denen Schützen die Anlauf- und Schussbewegung ohne Torwart ausführen. Die Bewegung könnte bei Integration eines Torhüters aufgrund von Verschleierungen Veränderungen aufweisen, woraus eine weniger deutliche Erkennung der Schussrichtung folgen könnte.

Die Höhe der Schussgeschwindigkeit ist abhängig von den verwendeten Techniken Innenseit-, Innenspann- und Vollspannstoß und variieren zwischen 14m/s und 35m/s (vgl. Kawamoto et al., 2007; Kellis & Katis, 2006; Lees & Owens, 2011; Neilson & Jones, 2005; Sterzing et al., 2009). Die Präzision in Bezug auf die verwendete Technik zeigt, dass Innenseitstöße deutlich platzierter das Tor treffen als Straf-



stöße mit Innenspann- und Vollspannstoß (vgl. Loy, 1996; Sterzing et al., 2009). Dieser Unterschied ist unabhängig von den Vorgaben einen Schuss mit maximaler Präzision oder Geschwindigkeit auszuführen (vgl. Sterzing et al., 2009). Neben der Variabilität resultatbezogener Merkmale zeigen sich auch Veränderungen bei kinematischen Beschreibungsgrößen, wenn sich die Ausführungsbedingungen ändern oder Vergleiche zwischen unterschiedlichen Leistungsgruppen durchgeführt werden. Zum Beispiel ändern Spieler ihre Bewegungsausführung, wenn ein ruhender und rollender Ball geschossen wird oder unterschiedliche Präzisionsaufgaben mit verschiedenen Bällen ausgeführt werden sollen (vgl. Egan et al., 2007; Teixeira, 1999). Des Weiteren lassen sich Veränderungen in der Schussbewegung auch bezüglich der Schussrichtung über kinematische Merkmale aufzeigen (u.a. Goktepe et al., 2008; Lees & Owens, 2011).

Die Untersuchungen von Goktepe et al. (2008) sowie Lees und Owens (2011) führen aber zum einen die Bewegungsanalyse erst ab dem Lösen des Schussbeines vom Boden aus und beschränken die Merkmalsstichprobe auf das Schussbein. Zum anderen präsentieren die Studien die Ergebnisse über Gruppenmittelwerte für diskrete Zeitpunkte der Bewegung. Lees und Owens (2011) vergleichen nur flache Schüsse in das Zentrum und auf die linke Seite des Tores. Die signifikanten Erkenntnisse der Bewegungsanalyse von Goktepe et al. (2011) beziehen sich auf den Zeitpunkt des Fuß-Ball-Kontakts und auf die Ausschwingphase. Da 65,6% der Torhüter vor dem Ballkontakt ihre Abwehrhandlung initialisieren, sind die Erkenntnisse für die praktische Anwendung von geringer Relevanz. Eine Untersuchung, welche den ganzen Körper über kinematische Merkmale abbildet, liegt von Diaz et al. (2012) vor. Die Ermittlung von Hinweisreizen über einen kinematischen Zugang ist aber durch die Begrenzung des Anlaufs auf einen Schritt sowie die Ausführung der Strafstoße ohne Torwart nicht wettspielgemäß erfolgt. Die Realisierung eines Strafstoßes mit individuellem Anlauf und aktivem Torhüter können zum einen durch die Interaktion Veränderungen in der Bewegungsausführung hervorbringen und zum anderen frühzeitige Bewegungshinweise entdecken. Eine Studie, in der die kinematische Erfassung der Bewegung gekoppelt mit Handlungsstrategien von Schützen in einer wettspielgemäßen Strafstoßsituation untersucht wird, könnte detailliertere Informationen über Anpassungen oder Variationen in der Bewegung erschließen.

### 3 Problemstellung

Wie der aktuelle Forschungsstand zeigt, bestehen wenige objektive Ergebnisse aus biomechanischen Studien, welche Aufschluss über die Erkennung von Schussrichtungen geben. Die Untersuchungen von Goktepe et al. (2008), Lees und Owens (2011) sowie Diaz et al. (2012) führen aber zu einer Bewegungsanalyse nur für einen kurzen Zeitabschnitt aus, realisieren die Strafstöße mit einem Schritt Anlauf sowie ohne aktiven Torhüter, berücksichtigen nicht raum- und winkelbezogene Merkmale für die Beschreibung des Bewegungsmodells und präsentieren zumeist die Ergebnisse nicht verlaufsorientiert. Darüber hinaus werden keine spieltypischen Handlungsstrategien eingesetzt, die einen Einfluss auf die Bewegung des Schützen im Duell mit dem Torhüter haben und somit Einblick in die Variabilität von Bewegungsstrukturen geben könnten.

Aus methodischer Sicht ist der Einsatz von Hauptkomponentenanalyse (Diaz et al., 2012) und Künstlicher Neuronaler Netze (Lees & Barton, 2005) als holistische Verfahren im Bereich Fußball zu nennen, welche strukturelle Unterschiede bezüglich Schussrichtung und Schussbein analysierten. Darüber hinaus sind keine Analysen mit holistischen Verfahren über komplexe Bewegungsmuster der Strafstoßsituation bekannt.

Aus den erwähnten Forschungsarbeiten wird deutlich, dass ein klares Forschungsdefizit bezüglich Mustererkennungen mit verlaufsorientiertem Ansatz in wettkampfgerechten Strafstoßsituationen erkennbar ist. Somit entsteht das Forschungsinteresse, unter Einbezug der Strafstoßstrategien von Schützen mittels eines holistischen Verfahrens eine Mustererkennung über verlaufsorientierte komplexe Bewegungsmuster auszuführen. Die Analyse schließt die Bewegung des ganzen Körpers über die letzten zwei Schritte des Anlaufes ein und berücksichtigt dabei sowohl raum- als auch winkelbezogene Beschreibungsgrößen. Die Wahl für das holistische Verfahren linearer Distanzmaße begründet sich aus der Verwendung verlaufsorientierter Daten, dem geringeren Datenaufwand und der Möglichkeit, gemäß des Ansatzes ‚coordination profiling‘ verstärkt individuelle Ergebnisdarstellungen vorzunehmen. Das Verfahren erlaubt Aussagen über die räumlich-zeitliche Entwicklung von Bewegungsmustern, worüber richtungsspezifische Hinweise in verschiedenen Phasen des Anlaufes überprüft werden können. Als Erweiterung zur Erkennung von Schussrichtungen werden anhand von Bewegungsmustern Individuen separiert. Die Anwendung von torwartabhängigen und torwartunabhängigen Strategien bei der Realisierung der Strafstöße lässt im Weiteren einen Vergleich verschiedener Aufgabenstellungen zu, um bedingungs- bzw. handlungsabhängige Veränderungen zu prüfen.

Konkret werden folgende Fragestellungen im weiteren Verlauf der Arbeit behandelt:

- a) Können anhand einer verlaufsorientierten kinematischen Analyse der Strafstoßbewegung Individuen bezogene Bewegungsmuster identifiziert werden?

- 
- b) Können anhand einer verlaufsorientierten kinematischen Analyse der Strafstoßbewegung richtungsspezifische Bewegungsmuster identifiziert werden?
  - c) Können anhand einer verlaufsorientierten kinematischen Analyse der Strafstoßbewegung bedingungsabhängige Bewegungsmuster identifiziert werden?
  - d) Welche kinematischen Beschreibungsgrößen klassifizieren anhand einer verlaufsorientierten kinematischen Analyse der Strafstoßbewegung Bewegungsmuster am deutlichsten?
  - e) Können anhand einer verlaufsorientierten kinematischen Analyse der Strafstoßbewegung Ergebnisse aus vorliegenden kinematischen und wahrnehmungsbasierten Studien bestätigt werden?

## 4 Untersuchungsmethodik

### 4.1 Untersuchungsbedingungen

Die Durchführung der Strafstöße erfolgte in vier unterschiedlichen Situationen. Die quasi-experimentellen Rahmenbedingungen und Aufgabenstellungen sollen im Folgenden beschrieben werden.

#### *Baseline*

Zu Beginn der Untersuchung schoss jeder Spieler Strafstöße auf vier vorgegebene Zielfelder in einem leeren Tor. Die Reihenfolge der Zielfelder war stets linke untere (LU), linke obere (LO), rechte untere (RU) sowie rechte obere (RO) Ecke. Die Aufgabenstellung *Baseline* zielte auf die Erfassung der ungestörten Bewegung eines Spielers ab. Vor dem ersten Strafstoß erhielten die Spieler die standardisierte Anweisung, den Ball präzise und fest in das vorgegebene Zielfeld möglichst nah zum Pfosten zu schießen und während des Anlaufs zum Ball nicht abzustoppen. Nach Bestätigung des Spielers über Klarheit der Aufgabenstellung wurde die Strafstoßserie gestartet.

#### *Keeper-independent*

Bei der Aufgabenstellung *Keeper-independent* wurden die Strafstöße gegen einen Torhüter ausgeführt, so dass im Vergleich zur Bedingung *Baseline* der Einfluss des Torhüters auf die Bewegungsausführung untersucht werden konnte. Der Spieler schoss mit vorgegebenem Ziel und torwartunabhängiger Strategie auf die markierten Zonen im Tor. Die randomisierte Reihenfolge der Ziele wurde durch ein im Vorfeld erstelltes Strafstoßprotokoll abgehandelt, das als Drehbuch während der Untersuchung diente.

Die Aufgabe des Torwarts lag im Abwehren der Strafstöße. Es wurden keine Handlungseinschränkungen für den Torwart vorgenommen. Es blieb dem Torhüter überlassen, wann und wie er seine Abwehrhandlung leistete. Vor Beginn der Serie erhielt jeder Strafstoßschütze die Aufgabenstellung, dass er den Ball in das angesagte Zielfeld präzise und fest möglichst nah zum Pfosten platzieren und während des Anlaufs zum Ball nicht abstoppen sollte. Der Torwarthandlung sollte keine Beachtung geschenkt werden.

#### *Keeper-dependent*

Der Spieler schoss in der Bedingung *Keeper-dependent* mit torwartabhängiger Strategie auf zwei Zielfelder im Tor. Zum Einen wurde für die Zielfeldauswahl die favorisierte Schussrichtung (Primärfeld) des Schützen berücksichtigt, zum anderen das zur favorisierten Ecke diagonal markierte Zielfeld (Alternativfeld). Diese beiden Zielfelder sollte der Spieler ansteuern, so lang die Abwehraktion des Torhüters nicht in die gleiche Ecke gerichtet war. Sprang der Torwart in Richtung des vorgegebenen Zielfeldes, dann wechselte der Spieler die Schussrichtung in die beiden torwartfreien Zielfelder auf der Gegenseite (Wechselfeld). Der Ball sollte präzise und fest

möglichst nah zum Pfosten in den korrekten Torbereich gezielt werden, ohne dabei während des Anlaufes abzustoppen. Der Torwart erhielt vorab keine Informationen über die festgelegten Zielfelder des Strafstoßschützen.

#### *Point of no return*

Die Strafstöße wurden in der Bedingung *Point of no return* ohne Torwart ausgeführt. Stattdessen wurde die Interaktion zwischen Strafstoßschütze und Torwart durch eine im Tor installierte Lichtanlage übernommen (Abbildung 35). Der Spieler erhielt die Zielfeldvorgabe vor Beginn der Durchführung durch Aktivierung der entsprechenden LED-Lampe im Tor. Eine mögliche Torwartaktion wurde im Verlauf der Bewegungsausführung durch einen Wechsel der LED-Lampen angezeigt. Im Fall eines LED-Wechsels sollte der Spieler den Strafstoß auf das gegenüberliegende Zielfeld ausführen. Die Strafstöße sollten präzise und fest in das korrekte Zielfeld möglichst nah zum Pfosten platziert werden. Die Anlaufbewegung sollte nicht verzögert oder unterbrochen werden.



Abb. 35. Anzeige der Schussrichtung über LED-Lampen im Tor bei der Untersuchungsbedingung Point of no return

## 4.2 Versuchspersonen

An der Untersuchung nahmen 21 männliche Fußballspieler teil, die mindestens die Leistungsklasse Regionalliga vorweisen konnten. Bei der Spielerauswahl gab es neben der Partizipation in der vorgegebenen Spielklasse keine weiteren Selektionskriterien. Die Spieler wiesen ein durchschnittliches Alter von  $25,1 \pm 5,9$  Jahren, eine durchschnittliche Körpergröße von  $180,5 \pm 7,0$ m sowie ein durchschnittliches Gewicht von  $76,0 \pm 7,6$ kg auf. Die Probandengruppe setzte sich aus 16 Spielern zusammen, die mit dem rechten Fuß Strafstöße ausführen und fünf Spielern, die mit dem linken Fuß schießen. Keiner der Teilnehmer berichtete über körperliche Einschränkungen an den Untersuchungstagen. Die Tabelle 7 listet die berücksichtigten Spieler anhand ihrer Kodierung und ihren personenbezogenen Merkmalen

auf. Über das Merkmal „bevorzugte Ecke“ wurde der Torbereich des Schützen festgehalten, in den ein Schütze bei einem Strafstoß in der Regel schießen würde. Dieses Merkmal legte die Auswahl der Zielfelder in der Bedingung *Keeper-dependent* fest.

Tab. 7. Personenbezogene Informationen zu den Strafstoßschützen

Spieler	höchste Spielklasse	Alter	Körpergröße	Körpergewicht	bevorzugte Ecke	Schussbein
AM	Regionalliga	30	1,73	72	links unten	rechts
AZ	U19 Bundesliga	18	1,81	72	links unten	rechts
CS	2. Bundesliga	22	1,88	84	links unten	rechts
DH	U19 Bundesliga	18	1,71	69	rechts unten	rechts
DJ	2. Bundesliga	33	1,81	82	links unten	rechts
DR	2. Bundesliga	26	1,92	80	rechts unten	links
EH	Regionalliga	23	1,84	77	links unten	rechts
MB	Regionalliga	22	1,94	94	rechts oben	rechts
ML	Regionalliga	27	1,86	83	links unten	rechts
MM	Regionalliga	25	1,76	72	links unten	rechts
MR1	2. Bundesliga	34	1,79	79	links unten	rechts
MR2	Regionalliga	21	1,76	66	links unten	rechts
MV	U19 Bundesliga	18	1,68	65	links oben	links
NA	U19 Bundesliga	18	1,84	72	rechts unten	rechts
RP	1. albanische Liga	26	1,75	70	rechts unten	links
RS	Regionalliga	24	1,75	70	links oben	links
SE	1. Bundesliga	40	1,90	89	links unten	rechts
SW	Regionalliga	25	1,78	68	links oben	rechts
SZ	Regionalliga	30	1,79	81	rechts unten	links
TS	Regionalliga	28	1,76	75	links oben	rechts
UR	Regionalliga	20	1,85	76	rechts unten	rechts

### 4.3 Untersuchungsablauf

Die Untersuchung wurde im Zeitraum März und April 2010 in einer Halle mit Kunstrasen an insgesamt 7 Untersuchungstagen durchgeführt. Die Anzahl der Schüsse für jede Untersuchungsbedingung betrug 24, welche in zwei Blöcke mit jeweils 12 Schüssen aufgeteilt wurde. Die Spieler führten die Strafstöße wechselweise aus, um die physische Ermüdung und den Abfall der Konzentration während der Datenerfassung zu minimieren. Alle Spieler nahmen an mindestens zwei von vier Untersuchungsbedingungen teil. An der Untersuchungssituation *Baseline* nahmen alle Spieler teil. Aus den Untersuchungsbedingungen *Keeper-independent*, *Keeper-dependent* und *Point of no return* absolvierten die Spieler jeweils noch mindestens eine weitere Serie von Strafstößen. Die Gesamtdauer für beide Untersuchungsbe-

dingungen belief sich in der Regel für einen Spieler ohne die Präparierung des Probanden und die individuelle Erwärmungsphase auf etwa 60 Minuten.

Zu Beginn der Untersuchungen erfolgte die Vermessung der Spieler, um die individuelle Berechnung des Körpermodells in Vicon® Nexus durchzuführen. Hierzu wurden die Maße von Schulterabsatz (Abstand Schulterhöhe und Schultergelenkmittelpunkt), Handflächendicke sowie Handgelenks-, Knie-, Sprunggelenks-, Ellbogenbreite und Beinlänge erfasst. Während der manuellen Eingabe der ‚subject measurements‘ in die Software, wurden durch die Versuchsleiter die Körpermarker am Spieler mit doppelseitigem Klebeband fixiert. Der Spieler wurde im Vorfeld darauf hingewiesen, enganliegende Kleidung zu tragen, damit keine Marker bei Durchführung der Strafstöße verdeckt und ein Verschieben vermindert werden können. Im Anschluss erfolgte zur Kalibrierung des Spielers eine statische Aufnahme im Zentrum des Aufnahmebereichs in vorgegebener Körperhaltung. Danach wärmte sich der Spieler individuell auf und führte wenige Probeschüsse durch, auch um sich an den Marker auf dem Mittelfuß beim Schießen zu gewöhnen. Wenn der Spieler für die Datenerfassung bereit war, wurde ihm die Aufgabenstellung der Untersuchungsbedingung mitgeteilt und geprüft, ob diese verstanden worden war. Bei allen Versuchen während der Serie konnte der Spieler selbst entscheiden, wann er zum nächsten Strafstoß antrat.

Tab. 8. Verteilung der Spieler auf die Untersuchungsbedingungen

Spieler	Baseline	Keeper-independent	Keeper-dependent	Point of no return	Anzahl Strafstöße
AM	x			x	48
AZ	x	x			48
CS	x	x			48
DH	x	x			48
DJ	x			x	48
DR	x		x		48
EH	x			x	48
MB	x		x		48
ML	x		x		48
MM	x	x			48
MR1	x		x		48
MR2	x			x	48
MV	x	x			48
NA	x	x			48
RP	x		x		48
RS	x		x		48
SE	x	x			48
SW	x			x	48
SZ	x		x	x	72
TS	x		x		48
UR	x	x		x	72
<b>Anzahl</b>	<b>21</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>1056</b>

#### 4.4 Messaufbau

Die Strafstöße wurden auf ein regelkonformes Tor mit den Maßen von 7,32x2,44m ausgeführt. Für die Markierung der Zielfelder wurde ein rotes Band mit einer Breite von 5cm zum einen horizontal in einem Meter Höhe zwischen den Torpfosten und zum anderen vertikal auf beiden Seiten einen Meter von den Torpfosten entfernt an der Latte befestigt. Daraus resultierten die Zielfelder auf beiden Seiten mit den Größen von 1x1m in den unteren Ecken (LU, RU) und 1x1,44m in den oberen Ecken (LO, RO). Die Abgrenzung der Zielfelder wurde in Anlehnung an Morya, Bigatao, Lees und Ranvaud (2005), Hughes und Wells (2002, S. 71) und Loy (1996, S. 77) festgelegt.

Für die Erfassung der Anlauf- und Schussbewegung wurde ein Vicon® MX 3 Kamerasystem mit 8 Infrarotkameras eingesetzt. Die Positionen der Kameras wurden für alle Untersuchungstage festgelegt, so dass ein Aufnahmevervolumen von 6x6x2m erfasst werden konnte. Das Kamerasystem war über eine zentrale Kontrolleinheit mit einem ASUS Notebook F7F Serie verbunden (Prozessor Intel® Core™ Duo CPU T2250 mit 1,73 GHz, 2 GB Arbeitsspeicher). In Verlängerung des Elfmeterpunktes 17m vor dem Tor stand außerdem eine Videokamera (Canon GL1), um die Trefferbereiche der Strafstöße aufzunehmen.

Zusätzlich zu den Zielfeldern wurden für die Bedingung *Point of no return* zwei Stative mit jeweils zwei LED-Lampen mit einem halben Meter Abstand zueinander mittig in das Tor gestellt. Die Position der Lampen im Tor wurde so festgelegt, dass sie von der Höhe zwischen Knie- und Schulterachse eines Torhüters lagen und somit der Spieler seine Blickrichtung entsprechend einer torwartabhängigen Strategie wählen konnte (vgl. Nunez, Ona, Raya & Bilbao, 2009). Die Ansteuerung der Lampen erfolgte über einen Laptop mit der Software DASYLab® und in Verbindung einer Lichtschrankenanlage. Die auslösende Doppel-Lichtschranke stand 14m vor dem Tor, die Ziellichtschranke wurde 25cm hinter dem Ball (10,75m vor dem Tor) umgekehrt und leicht erhöht aufgebaut. Ein Kontaktfeld der Ziellichtschranke wurde abgeklebt, so dass der bewegte Ball die Zeitmessung stoppen konnte. Damit kein Spieler während der Bewegungsausführung durch die Lichtschranken gestört wurde, ist ein Durchlauf von sechs Meter Breite gewählt worden. Die Lichtschranke wurde zur Bestimmung der Anlaufgeschwindigkeit verwendet sowie zur Steuerung der LED-Lampen.



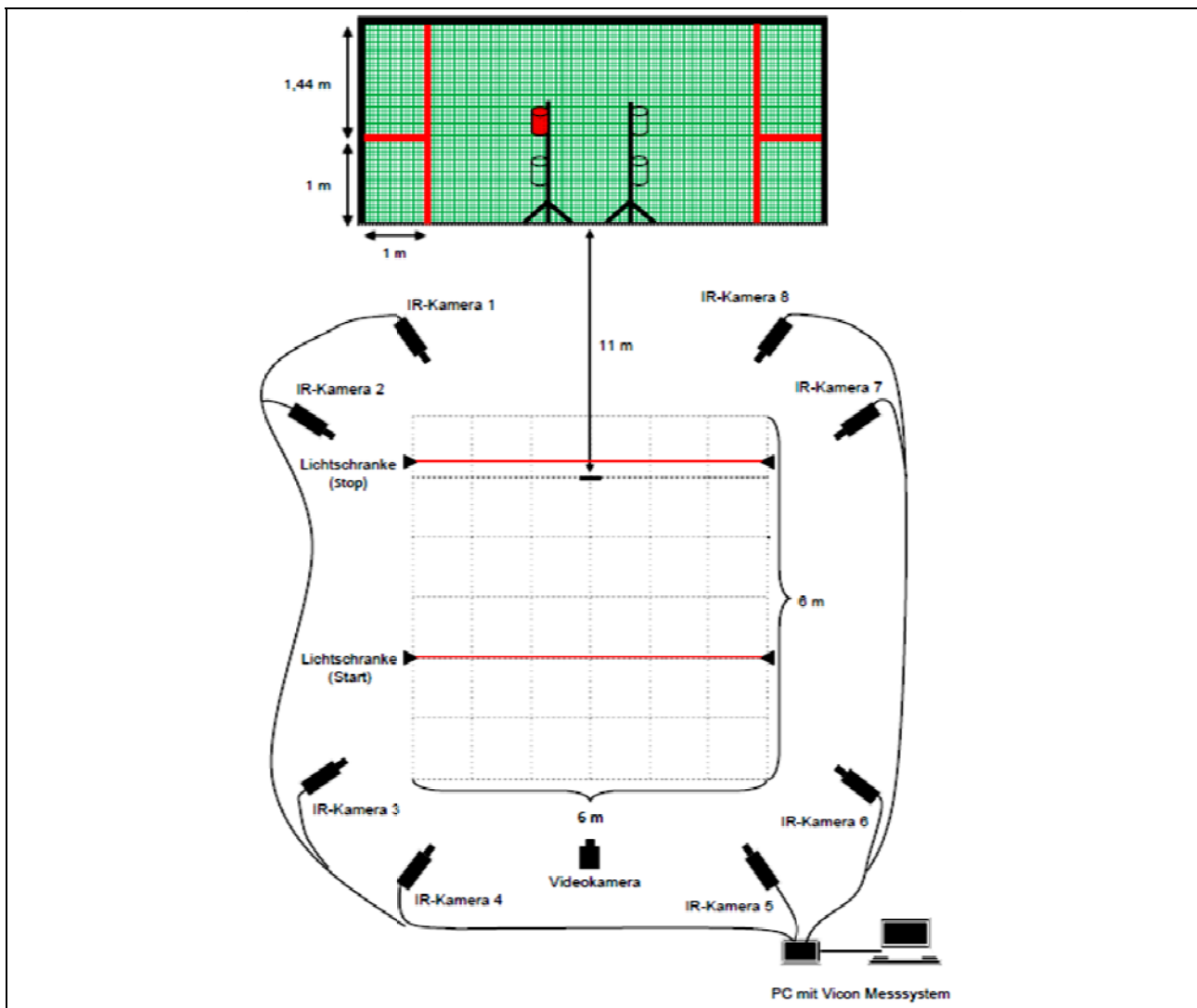


Abb. 36. Versuchsaufbau in der Soccer-Halle

## 4.5 Messwerterfassung

Die Erfassung der Bewegung erfolgte mit einer Aufnahme­frequenz von 100Hz. Für die Abbildung der Körperbewegung wurde ein Ganzkörpermodell mit 35 Körpermarkern mit einem Durchmesser von 14mm verwendet. Abbildung 37 zeigt die Positionierung der Marker am Körper und Tabelle 9 weist den Abkürzungen der Marker die anatomischen Orientierungspunkte zu.

Die Bewegungsausführung des Schützen wurde digital auf dem Computer gespeichert. Die Rekonstruktion der Position der Marker im Raum erfolgte Bild für Bild automatisch durch die Software Nexus anhand der zweidimensionalen Daten aller angeschlossenen Kameras und die zu Beginn einer Messung gespeicherten Kalibrierungs- sowie Rekonstruktionsparameter. Die räumliche Markerposition wurde stets in Bezug auf den Ursprung des festgelegten Aufnahmevolumens berechnet. Dieses zugrundeliegende dreidimensionale Koordinatensystem wurde über die Achsen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  definiert. Dabei zeigen die  $x$ -Koordinate Vorwärts- und Rückwärts-

bewegungen, die y-Koordinate Seitwärtsbewegungen sowie die z-Koordinate vertikale Bewegungen an. Der Ursprung befand sich im Zentrum der x-y-Ebene. Die frontal vor dem Tor platzierte Videokamera speicherte alle Strafstöße mit einer Aufnahme­frequenz von 25Hz, so dass nachträglich resultatbezogene Merkmale wie Trefferbereich und Trefferquote für die Probanden und Bedingungen ausgewertet werden konnten.

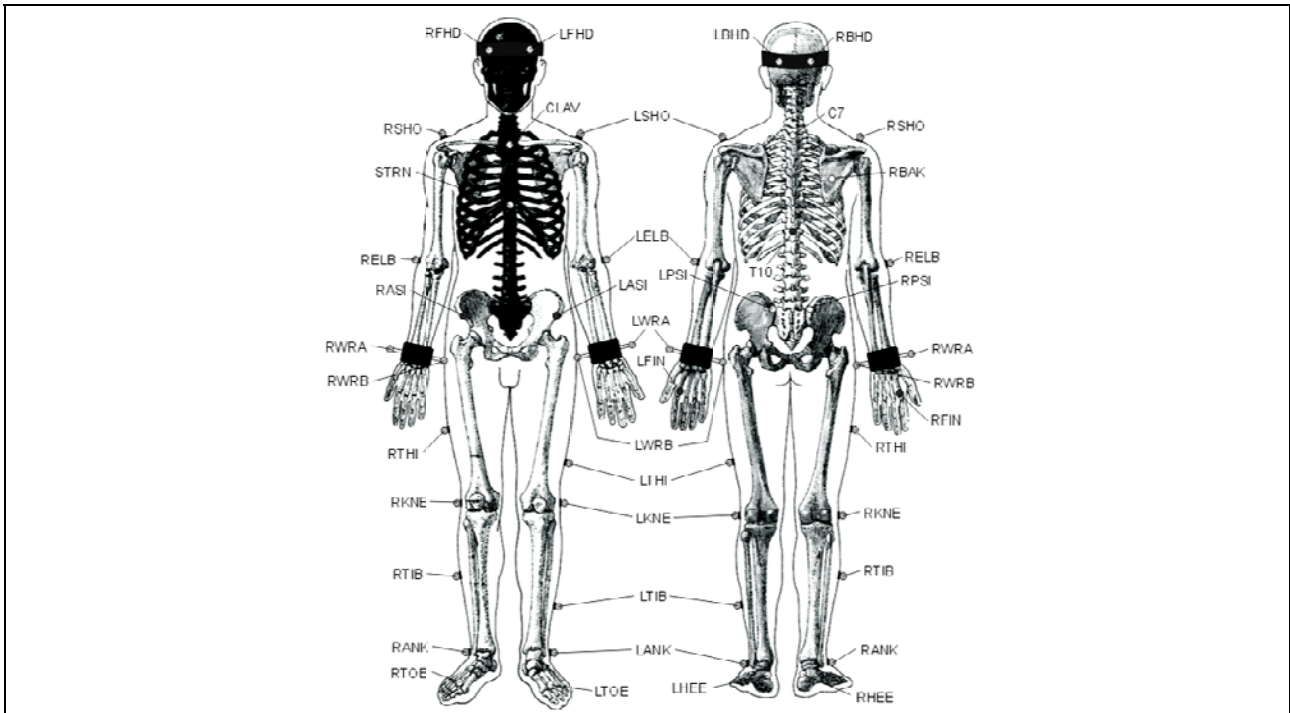


Abb. 37. Ganzkörpermodell (mod. nach Vicon Motion Systems, Oxford)

Die Erfassung der zeitlichen Ausprägung des Anlaufs wurde durch eine Lichtschranken­anlage realisiert. Die Doppel-Lichtschranke stoppte für die letzten drei Meter des Anlaufes die Zeit über alle Strafstöße hinweg, so dass ein intra- und interindividueller Vergleich zwischen den Straf­stößen möglich war. Zudem diente die durchschnittliche Anlaufzeit als Grundlage für die LED-Aktivierung bei den Straf­stößen der Bedingung *Point of no return*. Neben der Anlaufzeit wurde zusätzlich die tatsächlich durch das System verursachte Verzögerungszeit bis zur Aktivierung einer LED-Lampe erfasst, um die Verarbeitungszeit des Schützen vor dem Ballkontakt bei jedem Strafstoß der Bedingung *Point of no return* bestimmen zu können.

Tab. 9. Körpermarker (vgl. Vicon Motion Systems, Oxford)

Segment	Markerbezeichnung	Anatomischer Orientierungspunkt
Kopf	LFHD, RFHD	Oberhalb der Schläfe
	LBHD, RBHD	Rückwärtige Kopfseite in horizontaler Verlängerung der frontalen Kopfmarker
Rumpf	C7	Dornfortsatz des 7. Halswirbels
	T10	Dornfortsatz des 10. Brustwirbels
	CLAV	Verbindungspunkt zwischen Schlüsselbeinen und Brustbein
	STRN	Schwertfortsatz des Brustbeines
	RBAK	Mitte rechtes Schulterblatt (Seitigkeitsmarker)
Arme	LSHO, RSHO	Acromioclaviculargelenk
	LELB, RELB	Laterale Knochenvorwölbung des Ellbogengelenks
	LWRA, RWRA	Mediale Seite des Handgelenks
	LWRB, RWRB	Laterale Seite des Handgelenks
	LFIN, RFIN	Unterhalb des Kopfes des 2. Mittelhandknochens auf dem Handrücken
Becken	LASI, RASI	Linker/rechter, oberer, vorderer Darmbeinstachel
	LPSI; RPSI	Linker/rechter, oberer, hinterer Darmbeinstachel
Beine	LTHI, RTHI	Am Oberschenkel auf der Verbindungslinie zwischen LASI/RASI und LKNE/RKNE
	LKNE, RKNE	Laterale Knochenvorwölbung des Kniegelenks
	LTIB, RTIB	Am Unterschenkel auf der Verbindungslinie zwischen LKNE/RKNE und LANK/RANK
	LANK, RANK	Außenknöchel
	LHEE, RHEE	Fersenbein
	LTOE, RTOE	Kopf des 2. Mittelfußknochens

## 4.6 Fehlerabschätzung

### 4.6.1 Raum- und Winkelmerkmale

Die Erfassung von menschlichen Bewegungen mit optischen Verfahren birgt Fehlerquellen, welche negativ die Qualität der Daten und folglich der Ergebnisse beeinflussen können. Fehlerquellen sind hierbei die Abbildung in einem Modell, messtechnische Ungenauigkeiten, Weichteilartefakte und die fehlerhafte Positionierung der Marker (vgl. Chiari, Della Croce, Leardini & Cappozzo, 2005; Della Croce, Leardini, Chiari & Cappozzo, 2005; Leardini, Chiari, Della Croce & Cappozzo, 2005).

Nach Chiari et al. (2005) können bei instrumentellen Fehlern ein systematischer und ein zufälliger Fehler unterschieden werden. Systematische Fehler sind beispielsweise bedingt durch den vorgenommenen Kalibrierungsprozess. Bei einer qualitativ schlechten Kalibrierung können im Folgenden nur ungenau Modellparameter berechnet oder abgeleitet werden. Dabei ist die Größe des systematischen Fehlers abhängig von dem gewählten Aufnahmevolumen sowie der Position des Markers innerhalb des Aufnahmevolumens. Zufällige Fehler ergeben sich durch die elektrischen Geräte sowie mögliches Flimmern von Markern während der Datenaufnahme. In einer Untersuchung von Ehara, Fujimoto, Miyazaki und Mochimaru (1997) konnte für das System Vicon® 370 eine durchschnittliche absolute Abweichung von 0,94mm bei einem Inter-Marker-Vergleich anhand eines Referenzstabes mit der Länge von 900mm bestimmt werden.

Für die Erfassung und Abbildung einer sportlichen Bewegung in einem Modell werden Oberflächenmarker am Probanden angebracht. Die Positionierung der Körpermarker orientiert sich dabei an prägnanten anatomischen Orientierungspunkten, den sogenannten ‚anatomical landmarks‘. Wenn die Befestigung der Marker an den Körperstellen von den Modellangaben abweicht, treten wiederum im weiteren Verlauf der Untersuchung Ungenauigkeiten auf. Eine fehlerhafte Platzierung der Marker durch Palpation kann dadurch bedingt sein, dass der gesuchte Orientierungspunkt eine Fläche darstellt und in ihrer Größe variabel ist, durch eine Gewebeschicht (z.B. Muskulatur) verdeckt wird, welche unterschiedlich dick und beschaffen ist und mit unterschiedlichen Palpationstechniken gearbeitet wird. In mehreren Untersuchungen konnte festgehalten werden, dass im Vergleich der Testleiter bei der Markerplatzierung die intra-individuelle besser als die inter-individuelle Präzision ist. Beim intra-individuellen Vergleich der Markerpositionen konnte eine Abweichung im dreidimensionalen Raum zwischen 6mm und 21mm registriert werden (vgl. Della Croce et al., 2005, S. 227).

Einfluss auf die Qualität der Untersuchungsergebnisse bei Messungen am menschlichen Körper haben Deformationen von Körpermassen. Die Verschiebung der Weichteile erzeugt im Vergleich zu instrumentellen Fehlerquellen größere Fehler, die natürlich sehr stark von der Bewegungsaufgabe und der Ausführungsdynamik abhängig sind. Bei Reinschmidt, van den Bogert, Nigg, Lundberg und Murphy (1997) führte die Erhöhung des Bewegungstempos vom Gehen zum Laufen zu einer Vergrößerung des Fehlers. Die größten Abweichungen an den Beinsegmenten können am Oberschenkel registriert werden, da dort die größte Muskelmasse vorzufinden ist. Weichteilartefakte treten bei unterschiedlichen Personen entsprechend ihrer körperlichen Konstitution in unterschiedlichem Ausmaß auf. Innerhalb der Versuche eines Probanden konnte aber eine Reproduzierbarkeit des Fehlers festgestellt werden (vgl. Leardini et al., 2005). Die Größe der Abweichung bei der Bestimmung von Winkelstellungen lässt sich mittels eines Vergleichs von Knochenmarkern mit Hautoberflächenmarkern mit durchschnittlich 4,3° bis 9° festhalten (vgl. Reinschmidt, van den Bogert, Lundberg, et al., 1997; Reinschmidt, van den Bogert, Nigg, et al., 1997). Die geringsten Abweichungen treten in der Regel für die Bewegungsrichtung Flexion/Extension auf. Bezogen auf die Beimgelenke können bei

Della Croce et al. (2005, S. 232) die geringsten Fehler beim Kniegelenk mit  $1,7^\circ$  gemessen werden.

Die geschilderten Probleme im Messvorgang können nicht vollends vermieden werden. Um aber möglichst reliable Messdaten zu erhalten, wurden in der vorliegenden Arbeit der Aufbau und die Einstellungen der Kameras nur dann zur Datenerfassung verwendet, wenn der interne Prüfungsvorgang der Software Nexus die Kalibrierung für gut eingestuft hatte. In Tabelle 10 sind die zu den Untersuchungstagen berechneten räumlichen Abweichungen für alle Kameras in Pixel angegeben. Zudem wird auf den geringen räumlichen Fehler aus der Studie von Ehara et al. (1997) verwiesen. Im Anschluss der Datenerfassung wurde auf Filtertechniken zurückgegriffen, um Fehler in den Rohdaten zu minimieren und die Qualität zu verbessern. Der Einfluss von fehlerhafter Palpation der anatomischen Orientierungspunkte durch die Versuchsleiter sollte durch eine graphische Anleitung sowie durch visuelle Überprüfung eines zweiten Versuchsleiters minimiert werden. Da beim angewandten Untersuchungsdesign fast alle Probanden die Datenerfassung an einem Tag mit der gleichen Markerplatzierung absolviert hatten, wäre eine fehlerhafte Positionierung eines Markers ein systematischer Fehler, der sich über alle Versuche zeigen würde und somit für den intra-individuellen Vergleich der Bewegungsmuster zu vernachlässigen wäre. Lediglich bei 3 Spielern könnte sich durch die Verteilung der Datenaufnahme auf zwei Tage eine geringere Reliabilität ergeben. Der Einfluss von Weichteilartefakten ist durch das verwendete Ganzkörpermodell, welches sich hauptsächlich auf knöcherne Orientierungspunkte beschränkt, eingedämmt.

Tab. 10. Berechnete Genauigkeit der Markerprojektionen für die Kamerasensoren nach der Kalibrierung

Kamera	Projektionsfehler der Kamerasensoren für Referenzmarker (Pixel)						
	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5	Tag 6	Tag 7
1	0,044	0,061	0,047	0,076	0,062	0,065	0,065
2	0,039	0,040	0,044	0,054	0,061	0,049	0,049
3	0,045	0,053	0,050	0,066	0,057	0,064	0,049
4	0,051	0,057	0,050	0,074	0,078	0,084	0,078
5	0,042	0,050	0,049	0,054	0,056	0,055	0,056
6	0,049	0,059	0,042	0,067	0,059	0,076	0,052
7	0,048	0,070	0,068	0,080	0,079	0,079	0,068
8	0,038	0,046	0,045	0,060	0,061	0,053	0,050

#### 4.6.2 Zeitmerkmale

Bei der Fehlerbetrachtung von zeitlichen Merkmalen sind Fehler durch apparative Schwankungen und Fehler bei extern zu bestimmenden Ereignissen im Bewegungsvollzug zu unterscheiden (vgl. Jaitner, 2002b, S. 107). Die Messgenauigkeit der eingesetzten Doppel-Lichtschranke zur Bestimmung der Anlaufzeit ist sehr hoch und mögliche Schwankungen sind als apparativer Fehler zu vernachlässigen.

Durch Einsatz der Doppel-Lichtschanke wurden zudem mögliche Fehlerquellen beim Auslösen der Start-Lichtschanke minimiert. Aufgrund des gewählten Aufbaus zur Messung der Anlaufzeit tritt eine Überschätzung dieser zeitlichen Komponente auf, da die Ziellichtschanke 25cm hinter dem Ball positioniert war. Ableitend aus der berechneten Flugdauer der Bälle von sechs Spielern bis zum Überqueren der Torlinie kann für die Strecke von 25cm eine Zeit und somit ein systematischer Fehler für die Anlaufzeit von 0,09s angegeben werden. Der Fehler der Anlaufzeit berücksichtigt, dass die Zeitpunkte Ballkontakt und Überquerung der Torlinie aufgrund der Aufnahmefrequenz von 25Hz mit jeweils  $\pm 0,04$ s Abweichung bestimmt werden konnten. Die zeitliche Bestimmung der Ereignisse Lösen des Fußes vom Boden beim vorletzten und letzten Schritt, Aufsetzen des Standbeins sowie der Zeitpunkt des Ballkontakts zur Abgrenzung von Bewegungsphasen lassen sich mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  Bild aus den dreidimensionalen Bewegungsmodellen festlegen. Dadurch ergibt sich ein Fehler von  $\pm 0,01$ s. Da jede Phase mit einem zeitlichen Ereignis beginnt und endet, erhöht sich der absolute Fehler für die Bestimmung einer Teilphase des Bewegungsverlaufs auf  $\pm 0,02$ s.

#### 4.7 Auswahl der Merkmalsstichprobe

Die Auswahl der kinematischen Merkmale der Anlauf- und Schussbewegung hat das Ziel, die sichtbare Bewegung umfassend abzubilden. Basierend auf dem eingesetzten Ganzkörpermodell ‚Plug-In Gait‘ von Vicon® ist diese Vorgabe erfüllt. Der erfasste Zeitabschnitt beim Strafstoß beinhaltet zwei Schritte der Anlauf- und Schussbewegung. Dieser Bewegungsabschnitt kann über die Knotenpunkte Lösen des vorletzten Schritts (LVS), Lösen des letzten Schritts (LLS), Standbeinaufsatz (STB) und Ballkontakt (BK) strukturiert werden. Somit lässt sich der Verlauf der Bewegung in drei Phasen untergliedern: LVS-LLS, LLS-STB, STB-BK. Inter- und intra-individuelle Vergleiche zwischen Bewegungsmustern werden sowohl für die Teilphasen als auch für die Gesamtbewegung auf Basis der Winkel-Verläufe und der Winkelgeschwindigkeit ausgeführt, da sie „sogenannte biomechanische Korrelate neurophysiologischer Sinnesrezeptoren (Lage-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsrezeptoren in den Muskeln, Sehnen, Gelenken sowie der Haut) [darstellen], d.h. sie beschreiben die Summe aller afferenten Sinnesinformationen über die Position und Bewegung eines einzelnen Gelenks“ (Schöllhorn, 1998, S. 132, zitiert nach Jaitner, 2002, S. 100). Zusätzlich werden inter- und intra-individuelle Vergleiche für Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte durchgeführt. Die zeitlichen Merkmale umfassen die Anlaufzeit für die letzten drei Meter, in der Bedingung *Point of no return* zusätzlich die Zeitdauer vom Auslösen der Lichtschanke bis zum Aktivieren der LED-Lampe. Aus den genannten zeitlichen Größen wurde die Verarbeitungszeit bestimmt, die den Zeitabschnitt von der Aktivierung der LED-Lampe bis zum Ballkontakt definierte. Die Verarbeitungszeit berechnete sich über die Differenz von Anlaufzeit und Zeitpunkt der LED-Aktivierung. Als resultatbezogenes Merkmal wird die Trefferquote für die Analyse berücksichtigt. Zur Beschreibung der Variabilität der Bewegungsmuster eines Probanden wird für jede Schussrichtung

der Variabilitätskoeffizient bestimmt, der durch den Quotienten Standardabweichung und Mittelwert definiert ist.

Im Folgenden werden die verschiedenen Merkmale aufgelistet:

Winkelmerkmale [°]:

- Schultergelenk (Schussbeinseite)  $\Phi_{SHOs}$
- Schultergelenk (Standbeinseite)  $\Phi_{SHOst}$
- Ellbogengelenk (Schussbeinseite)  $\Phi_{ELBs}$
- Ellbogengelenk (Standbeinseite)  $\Phi_{ELBst}$
- Handgelenk (Schussbeinseite)  $\Phi_{WRIs}$
- Handgelenk (Standbeinseite)  $\Phi_{WRIst}$
- Hüftgelenk (Schussbeinseite)  $\Phi_{HIPs}$
- Hüftgelenk (Standbeinseite)  $\Phi_{HIPst}$
- Kniegelenk (Schussbeinseite)  $\Phi_{KNEs}$
- Kniegelenk (Standbeinseite)  $\Phi_{KNEst}$
- Fußgelenk (Schussbeinseite)  $\Phi_{ANKs}$
- Fußgelenk (Standbeinseite)  $\Phi_{ANKst}$

Winkelgeschwindigkeitsmerkmale [°/s]:

- Schultergelenk (Schussbeinseite)  $\omega_{SHOs}$
- Schultergelenk (Standbeinseite)  $\omega_{SHOst}$
- Ellbogengelenk (Schussbeinseite)  $\omega_{ELBs}$
- Ellbogengelenk (Standbeinseite)  $\omega_{ELBst}$
- Handgelenk (Schussbeinseite)  $\omega_{WRIs}$
- Handgelenk (Standbeinseite)  $\omega_{WRIst}$
- Hüftgelenk (Schussbeinseite)  $\omega_{HIPs}$
- Hüftgelenk (Standbeinseite)  $\omega_{HIPst}$
- Kniegelenk (Schussbeinseite)  $\omega_{KNEs}$
- Kniegelenk (Standbeinseite)  $\omega_{KNEst}$
- Fußgelenk (Schussbeinseite)  $\omega_{ANKs}$
- Fußgelenk (Standbeinseite)  $\omega_{ANKst}$

Ortskoordinaten [mm]:

- Schultergelenk (Schussbeinseite) SHO<sub>s</sub>
- Schultergelenk (Standbeinseite) SHO<sub>st</sub>
- Ellbogengelenk (Schussbeinseite) ELB<sub>s</sub>
- Ellbogengelenk (Standbeinseite) ELB<sub>st</sub>
- Handgelenk (Schussbeinseite) WR<sub>I</sub><sub>s</sub>
- Handgelenk (Standbeinseite) WR<sub>I</sub><sub>st</sub>
- Hüftgelenk (Schussbeinseite) HIP<sub>s</sub>
- Hüftgelenk (Standbeinseite) HIP<sub>st</sub>
- Kniegelenk (Schussbeinseite) KNE<sub>s</sub>
- Kniegelenk (Standbeinseite) KNE<sub>st</sub>
- Fußgelenk (Schussbeinseite) ANK<sub>s</sub>

- Fußgelenk (Standbeinseite) ANKst

Zeitmerkmale [s]:

- Anlaufzeit  $\Delta t_A$
- Zeitdauer der LED-Aktivierung  $\Delta t_{LED}$
- Verarbeitungszeit  $\Delta t_V$

## 4.8 Messwertverarbeitung

### 4.8.1 Bewegungsbezogene Merkmale

Nach der Rekonstruktion wurden bei allen Datensätzen den Markern für den Zeitabschnitt vom Lösen des vorletzten Schritts bis zum Ballkontakt Namen zugeordnet, um anhand des Körpermodells ‚Plug-In Gait‘ die kinematischen Merkmale zu berechnen (vgl. Vicon Motion Systems, Oxford). Auftretende Lücken in den Trajektorien konnten durch Inter- und Extrapolation von Datenpunkten gefüllt werden. Abschließend erfolgte die Glättung der Datenreihen über den in der Software implementierten Woltring-Filter (General Cross-Validation).

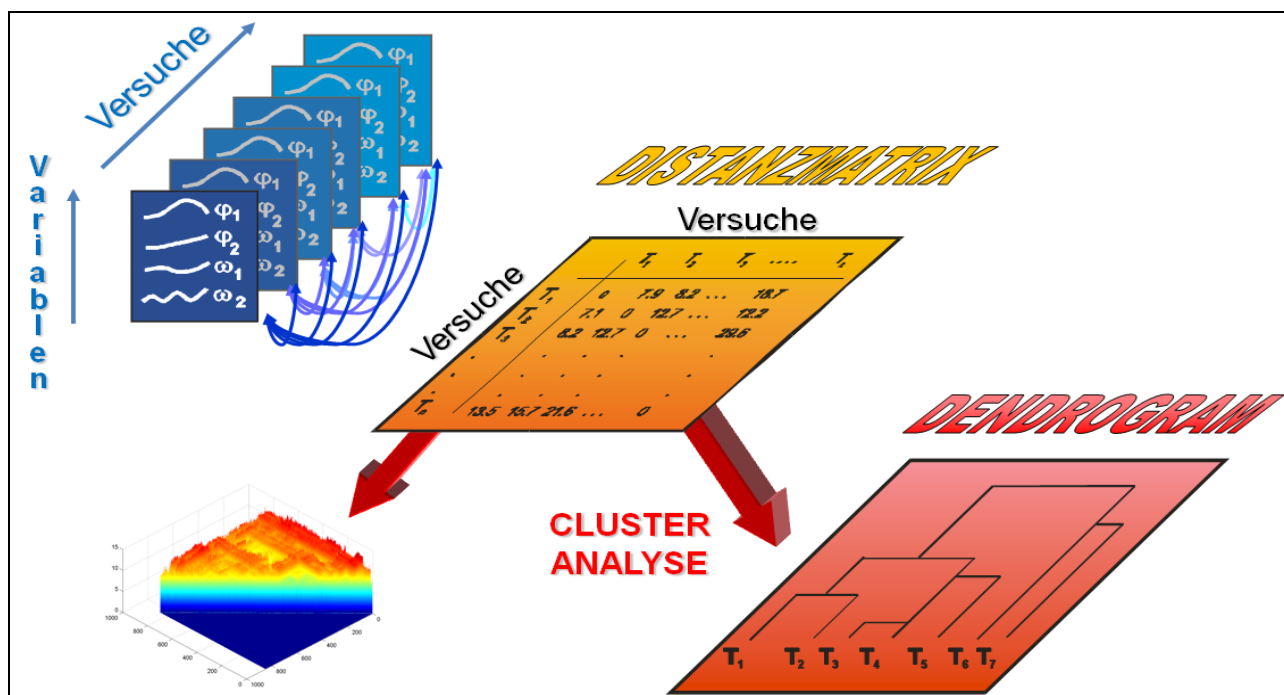


Abb. 38. Auswertungsschema der Datenverarbeitung (vgl. Jaitner, Mendoza & Schöllhorn, 2002).

Nach der Aufarbeitung der Versuche wurden die Merkmale im ASCII Format ausgelesen, um sie mit der Software MATLAB® R2011a weiter zu verarbeiten. Grundlage jedes Strafstoßes bei der weiteren Bearbeitung sind die Variablen-Zeit-Verläufe von Ortskoordinaten, Winkel-Verläufen und Winkelgeschwindigkeiten. In Anlehnung an die Vorgehensweise von Jaitner et al. (2001) sowie Schorer et al. (2007) wurden die drei Arbeitsschritte Datentransformation, Matrizenvergleich und Klassifikation durchlaufen. Bei der Datentransformation wurden erstens die Straf-



stöße zeitlich auf eine gemeinsame Länge normiert, um wechselseitige Vergleiche durchführen zu können. Als einheitliche Länge für alle Strafstöße wurde die durchschnittliche Bildanzahl von 504 Strafstößen der Bedingung *Baseline* mit 51 Bildern festgelegt. Zweitens erfolgte eine Amplitudennormierung mittels einer z-Transformation (vgl. Willimczik, 1999, S. 62). Im zweiten Schritt konnten die normierten Datenreihen jedes Versuchs eines Probanden paarweise miteinander verglichen werden, um über die berechnete euklidische Distanz Ähnlichkeiten oder Unähnlichkeiten zwischen den Versuchen in einer Distanzmatrix festzuhalten. Die Ähnlichkeit der Versuche zueinander ergab sich durch die aufsummierte Differenz der jeweiligen Merkmalsausprägungen zweier Versuche Bild für Bild über den gesamten Zeitabschnitt. Je größer der Wert in der Distanzmatrix war, desto mehr Unterschiede bestanden zwischen zwei Versuchen. Abschließend konnte anhand der berechneten Distanzmatrix eine Klassifizierung der Versuche durch eine hierarchische agglomerative Clusteranalyse erfolgen (MATLAB® R2011a, SPSS® Version 20). Die Clusteranalyse wurde mit dem ‚Single Linkage‘ Algorithmus (Minimummethode) durchgeführt, der die Fusionierung von zwei Clustern über die Strategie der minimalen Distanz zueinander vornimmt (vgl. Bortz & Schuster, 2010, S. 459). Der Algorithmus wurde aufgrund seiner Eigenschaft ausgewählt, „dass jeweils nur zwei nahe beieinanderliegende Einzelobjekte über die Fusionierung zweier Cluster entscheiden“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 459). Im Gegensatz dazu wenden ‚Average Linkage‘, ‚Complete Linkage‘ oder Median-Verfahren gruppenbezogene Kriterien an, um zwei Cluster zu fusionieren. Ein Nachteil des ‚Single Linkage‘ ist die mögliche Bildung von „kettenförmigen Clustergebilden (Chaining-Effekt), in denen sich Objekte befinden, die zueinander eine geringere Ähnlichkeit aufweisen als zu Objekten anderer Cluster“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 459-460). Die graphische Ergebnisdarstellung der Clusteranalysen sowie die Klassifizierung der Bewegungsmuster nach Individuen und Schussrichtungen erfolgten über Dendrogramme. Ein Dendrogramm präsentiert die berechneten Distanzen zwischen den Bewegungsmustern der Strafstöße. Das Auswerten der Dendrogramme nach den Kriterien Individuum und Schussrichtung erfolgte nach den unten aufgeführten Richtlinien, die aufgrund der nachteiligen Eigenschaften des ‚Single Linkage‘ Algorithmus formuliert wurden und ein einheitlicheres Vorgehen förderten:

- Mehrheit: Ein Cluster wird nur berücksichtigt, wenn es eine mehrheitliche Zusammensetzung für ein Kriterium aufweist. Als mehrheitliches Cluster werden Gruppierungen betrachtet, die zumindest innerhalb des Clusters eine Mehrheit von über 50% an Strafstößen eines Individuums oder einer Schussrichtung aufzeigen.
- Distanzsprung: Die Anzahl der Strafstöße bzw. die Beschränkung eines mehrheitlichen Clusters im Dendrogramm erfolgt über sprunghafte Vergrößerungen der Distanzen zwischen Separierungsebenen. Eine Aufnahme weiterer Strafstöße in das mehrheitliche Cluster wird nicht vorgenommen, wenn zur nächst höheren Clusterebene eine deutliche Zunahme der Distanz zum bestehenden mehrheitlichen Cluster besteht.

- Reinheit:  
Bei undeutlicher Trennung oder Kettenbildung erfolgt die Bestimmung der Erkennungsrate durch die Auswahl von reinen Clustern als minimale Gruppierungsgröße. Ein reines Cluster liegt vor, wenn beispielsweise nur Bewegungsmuster von Strafstößen für die Zielzone LU separiert werden.

Für die statistische Datenverarbeitung werden in Bezug auf die Anzahl der Merkmalsausprägungen und den Bewegungsabschnitt unterschiedliche Bewegungsmuster unterschieden:

- a) ganzheitliche Bewegungsmuster (gBM) umfassen Merkmale von 12 Körpergelenken (Schulter, Ellbogen, Hand, Hüfte, Knie, Fuß beider Körperhälften) für die gesamte Bewegungsausführung
- b) phasenbezogene Bewegungsmuster (pBM) umfassen Merkmale von 12 Körpergelenken für die Bewegungsphasen LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK
- c) phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster (psBM) umfassen Merkmale von Gelenken einer Extremität (Schussbein, Standbein, Arme) oder eines Körperbereichs (Hüfte) für eine Bewegungsphase, z.B. STB-BK

Die Struktur der Analyse für die vier Untersuchungsbedingungen zeigt Tabelle 11. Die Zahlenwerte beschreiben die Anzahl der Strafstöße, die in die jeweilige Auswertung eingegangen sind. Eine ungleiche Anzahl an Strafstößen ergab sich aus folgenden Gründen:

- Es bestanden unterschiedliche Gruppengrößen bei den Untersuchungsbedingungen
- Durch fehlerhafte Speicherung bei der Datenerfassung lagen bei einigen Versuchen keine Messwerte vor
- Situative Umstände (z.B. Lichteinfall, Störung einer Kamera) führten zu erheblichen Qualitätsverlusten und folglich zum Ausschluss von erfassten Strafstößen.

Die Bestimmung des Variabilitätskoeffizienten erfolgte auf Basis der Distanzmatrizen jedes Probanden anhand der berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen getrennt für die Zielfelder LU, LO, RU, RO. Die Angaben werden in Prozentwerten aufgeführt.

Tab. 11. Anzahl an Strafstößen für die vier Bedingungen

Bewegungsmustertyp		Baseline	Keeper-independent	Keeper-dependent	Point of no return
gBM	LVS-BK	504	192	192	166
pBM	LVS-LLS	504	192	192	166
	LLS-STB	503	192	192	166
	STB-BK	502	192	192	166
psBM	Arme (LLS-BK)	503	192	192	166
	Hüfte (LLS-BK)	503	192	192	166
	Schussbein (LLS-BK)	503	192	192	166
	Standbein (STB-BK)	503	192	192	166

#### 4.8.2 Resultatbezogene Merkmale

Die resultatbezogenen Merkmale Trefferbereich und Trefferquote für die Probanden und Bedingungen wurden anhand der Videoaufnahmen der frontal vor dem Tor platzierten Videokamera ausgewertet. Die Auswertung der Strafstöße erfolgte gemäß der Aufgabenstellung in den vier Bedingungen. Ein Strafstoß in den Bedingungen *Baseline* und *Keeper-independent* stellte einen Treffer dar, wenn der Ball die vorgegebenen Zielfelder getroffen hatte. Für die Bedingung *Baseline* wurden alle durchgeführten Strafstöße an den Untersuchungstagen eingeschlossen, unabhängig ob sie später für die Bewegungsanalyse Berücksichtigung fanden. In den Bedingungen *Keeper-dependent* sowie *Point of no return* war neben dem Treffen des Zielfeldes auch die Torwarthandlung bzw. die Aktivierung der LED-Lampen zu beachten. Ein Schuss wurde nur dann als Treffer verzeichnet, wenn das Zielfeld auf der torwartfreien Seite getroffen wurde.

Die Bestimmung der Verarbeitungszeit in der Bedingung *Point of no return* konnte nicht über die in der Software DASYlab® festgelegte Verzögerungszeit berechnet werden. Aufgrund von Testreihen wurden für das verwendete Betriebssystem starke Schwankungen mit bis zu 125ms in der angegebenen Verzögerungszeit registriert, die durch den Zwischenspeicher des Betriebssystems verursacht wurden. Die unregelmäßige Weiterleitung der Befehle zur Aktivierung der LED-Lampen ließ somit nur eine Annäherung der festgelegten Verarbeitungszeit von 600ms vor dem Ballkontakt zu und führte zu Streuungen zwischen den Strafstößen in Bezug auf die zur Verfügung gestellte Verarbeitungszeit. Die Bestimmung der tatsächlichen Verarbeitungszeit wurde nachträglich analog mit einer Abtastrate von 1/1000s ausgelesen, so dass sich die Probleme nur auf die Untersuchungsdurchführung beschränkten.

## 5 Untersuchungsergebnisse

Der Aufbau der Ergebnisse gliedert sich in den Kapiteln in die Abschnitte (a) Darstellung und (b) Interpretation. Die Darstellung beinhaltet die statistischen Auswertungen in graphischer und tabellarischer Form. Die Präsentation von Ergebnissen einzelner Probanden wird aufgrund ihrer Aussagekraft und somit als Referenzbeispiel für Ergebnisse anderer Spieler ausgewählt. In der Regel stellen die folgenden Kapitel die Spannweite der Untersuchungsergebnisse vor, indem beispielsweise für die Klassifizierung von Schussrichtungen Dendrogramme mit deutlicher und undeutlicher Separierung aufgezeigt werden. Unter Interpretation fallen alle getroffenen Aussagen, die über eine statistische Entscheidung hinausgehen.

### 5.1 Resultatbezogene Merkmale

#### 5.1.1 Trefferquoten

(a) Darstellung

Tab. 12. Trefferquoten (%) der Bedingungen Baseline und Keeper-independent im Vergleich

Spieler	Baseline					Keeper-independent				
	LU	LO	RU	RO	$\bar{x}$	LU	LO	RU	RO	$\bar{x}$
AZ	50,0	83,3	16,7	50,0	50,0	33,3	16,7	16,7	50,0	29,2
CS	100,0	44,4	44,4	44,4	58,3	50,0	33,3	0,0	0,0	20,8
DH	57,1	50,0	33,3	66,7	51,8	16,7	50,0	66,7	33,3	41,7
MM	37,5	57,1	66,7	40,0	50,3	37,5	50,0	50,0	0,0	34,4
MV	33,3	33,3	11,1	0,0	19,4	25,0	33,3	25,0	66,7	37,5
NA	16,7	50,0	83,3	16,7	41,7	33,3	0,0	16,7	66,7	29,2
SE	50,0	40,0	25,0	28,6	35,9	50,0	50,0	0,0	0,0	25,0
UR	42,9	83,3	57,1	33,3	54,2	62,5	16,7	50,0	66,7	49,0
$\bar{x}$	<b>48,4</b>	<b>55,2</b>	<b>42,2</b>	<b>35,0</b>	<b>45,2</b>	<b>38,5</b>	<b>31,3</b>	<b>28,1</b>	<b>35,4</b>	<b>33,3</b>

Tab. 13. Trefferquoten (%) der Bedingungen Baseline und Keeper-dependent im Vergleich; PF = Primärfeld, AF = Alternativfeld, WF = Wechselfeld

Spieler	Baseline					Keeper-dependent				
	LU	LO	RU	RO	$\bar{x}$	PF	WF1	AF	WF2	$\bar{x}$
DR	66,7	28,6	50,0	66,7	53,0	33,3	16,7	25,0	25,0	25,0
MB	11,1	37,5	37,5	27,3	28,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ML	50,0	33,3	50,0	33,3	41,7	60,0	0,0	75,0	0,0	33,8
MR1	57,1	33,3	44,4	23,1	39,5	0,0	25,0	0,0	33,3	14,6
RP	12,5	28,6	71,4	11,1	30,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RS	50,0	12,5	37,5	16,7	29,2	33,3	0,0	0,0	14,3	11,9
SZ	33,3	22,2	44,4	33,3	33,3	16,7	50,0	16,7	66,7	37,5
TS	50,0	57,1	83,3	50,0	60,1	20,0	0,0	14,3	0,0	8,6
$\bar{x}$	<b>41,3</b>	<b>31,6</b>	<b>52,3</b>	<b>32,7</b>	<b>39,5</b>	<b>20,4</b>	<b>11,5</b>	<b>16,4</b>	<b>17,4</b>	<b>16,4</b>

Tab. 14. Trefferquoten (%) der Bedingungen *Baseline* und *Point of no return* im Vergleich

Spieler	Baseline					Point of no return				
	LU	LO	RU	RO	$\bar{x}$	LU	LO	RU	RO	$\bar{x}$
AM	57,1	66,7	40,0	57,1	55,2	50,0	50,0	50,0	16,7	41,7
DJ	66,7	37,5	66,7	44,4	53,8	16,7	16,7	33,3	33,3	25,0
EH	33,3	57,1	57,1	33,3	45,2	16,7	33,3	66,7	50,0	41,7
MR2	28,6	57,1	37,5	12,5	33,9	33,3	16,7	33,3	33,3	29,2
SW	100,0	37,5	66,7	66,7	67,7	50,0	16,7	33,3	16,7	29,2
SZ	33,3	22,2	44,4	33,3	33,3	16,7	16,7	33,3	33,3	25,0
UR	42,9	83,3	57,1	33,3	54,2	100,0	16,7	83,3	33,3	58,3
$\bar{x}$	<b>51,7</b>	<b>51,6</b>	<b>52,8</b>	<b>40,1</b>	<b>49,1</b>	<b>40,5</b>	<b>23,8</b>	<b>47,6</b>	<b>31,0</b>	<b>35,7</b>

## (b) Interpretation

Für die Bedingung *Baseline* ergibt sich im Durchschnitt eine Trefferquote über alle 21 Probanden von 45,1%. Im Vergleich der vier Zielfelder fällt die Torecke RO im Gesamtdurchschnitt mit 36,1% am deutlichsten ab. Die höchste Trefferquote wird im Mittel für das Zielfeld LU mit 48,7% erzielt. Spieler SW erreicht über alle Probanden betrachtet die höchste Anzahl an Treffern (67,7%). Lediglich die Probanden CS und SW können eine maximale Trefferquote von 100% für das Zielfeld LU aufweisen.

In der Bedingung *Keeper-independent* liegt die Trefferquote bei 33,3% (Tabelle 12). Der beste Schütze ist der Proband UR mit 49%, die geringste Trefferquote zeigt Spieler CS mit 20,8%. Die Trefferquoten für die einzelnen Zielfelder schwanken zwischen 28,1% und 38,5%. Über alle Zielfelder betrachtet konnten nur die Spieler DH (RU), MV (RO), NA (RO) und UR (LU, RO) mehr als 50% der Schüsse erfolgreich platzieren.

Der Vergleich von Schüssen ohne und mit Wechsel der Schussrichtung in der Bedingung *Keeper-dependent* zeigt eine Trefferquote von 18,4% bzw. 14,4% (Tabelle 13). Der beste Schütze ist Spieler SZ mit 37,5%, gefolgt von Spieler ML mit 33,8%. Die zwei Probanden MB und RP treffen 19 bzw. 17 von 24 Strafstoßen in das Tor, können aber keinen Treffer innerhalb der markierten Zonen verbuchen. Somit gehen diese Probanden mit 0% Trefferquote in das Gruppenmittel ein. Das Gruppenmittel steigt von 16,4% auf 21,9%, wenn die Probanden MB und RP nicht einbezogen werden.

Die Bedingung *Point of no return* weist eine Trefferquote von 35,7% auf (Tabelle 14). Die beste Leistung zeigt Proband UR mit einer Trefferquote von 58,3%. Alle anderen beteiligten Spieler dieser Bedingung liegen zwischen 25% und 42%. Unabhängig der Tatsache, dass Schüsse ohne und mit Wechsel der Schussrichtung ausgeführt wurden, zeigen die Zielfelder LU (40,5%) und RU (47,6%) höhere Trefferquoten im Vergleich der dazugehörigen Zielfelder oben (LO: 23,8%; RO: 31,0%). Dieser Unterschied erklärt sich über die hohen Trefferquoten des Probanden UR mit 100% für das Zielfeld LU sowie 83,3% für das Zielfeld RU. Der Ausschluss von Proband UR bei Bestimmung der Gruppenmittelwerte führt dazu, dass das Zielfeld

LU (30,6%) auf dem Niveau der Zielfelder LO und RO liegt. Lediglich das Zielfeld RU hebt sich leicht ab mit einer Trefferquote von 41,7%.

Der Vergleich zwischen den Bedingungen jeweils zur *Baseline* zeigt, dass alle Gruppen ihre Trefferquote aus der Bedingung *Baseline* nicht bestätigen können. Am deutlichsten ist der Abfall für den Vergleich der Bedingungen *Baseline* und *Keeper-dependent* (-23,1%), obwohl die Komplexität der Aufgabenstellung in der Bedingung *Point of no return* am höchsten eingestuft wurde. Entgegen der Erwartungen schießt die Gruppe in der Bedingung *Point of no return* am erfolgreichsten (35,7%). Erst danach folgt die Bedingung *Keeper-independent* mit 33,3%. Die größere Reduktion der Trefferquote von der Bedingung *Baseline* zur Bedingung *Keeper-independent* mit -11,9%, ist unter anderem durch die Aktivität des Torwarts zu erklären (22 gehaltene Elfmeter).

Der Einfluss des Torhüters bei den Bedingungen *Keeper-independent* und *Keeper-dependent* unterscheidet sich in Bezug auf die gehaltenen Strafstöße nicht (22 vs. 23 Schüsse). Für die Bedingung *Keeper-dependent* konnten insgesamt 37 Schüsse notiert werden, die das Tor nicht trafen sowie an Pfosten oder Latte abprallten. Die Bedingung *Keeper-independent* weist im Vergleich 25 Fehlschüsse dieser Kategorien auf. Auffallend ist die deutlich höhere Trefferquote in der Bedingung *Point of no return* im Vergleich zur Bedingung *Keeper-dependent*. Eine Differenz von 19,3% zwischen den Bedingungen ist überraschend, da die Aufgabenstellungen sehr ähnlich waren und lediglich die Torwartaktion durch LED-Lampen ersetzt wurde. Ein möglicher Erklärungsansatz wäre der unterschiedliche Zeitpunkt, dass die Torwartaktion in der Bedingung *Keeper-dependent* kürzer vor dem Ballkontakt auftrat als die Aktivierung der LED-Lampen zur Signalisierung eines Wechsels der Schussrichtung.

Aus den Vergleichen ist eindeutig zu sehen, dass zum einen die Anwesenheit eines Torwarts bei der torwartunabhängigen Strategie (*Keeper-independent*) und zum anderen der Einsatz der torwartabhängigen Strategie (*Keeper-independent*, *Point of no return*) Einfluss auf die Trefferleistung haben.

### 5.1.2 Zeitliche Ausprägung des Anlaufs

Das Anlaufverhalten und seine Variabilität werden über die Messung der Anlaufzeit der letzten drei Meter zum Ballkontakt festgehalten.

#### (a) Darstellung

Tab. 15. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung ( $s$ ) der Anlaufzeit (ms) jedes Spielers für die Bedingungen Baseline und Keeper-independent

Spieler	Baseline		Keeper-independent	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
AZ	1008,33	251,98	796,19	206,97
CS	999,57	111,29	920,42	114,11
DH	895,00	62,90	934,58	77,35
MM	1287,50	169,04	1190,83	191,13
MV	916,67	202,50	928,33	178,90
NA	1142,50	93,96	998,75	207,31
SE	1247,08	270,82	1130,83	169,86
UR	1097,08	132,52	1002,92	111,72
$\bar{x}$	<b>1074,22</b>	<b>163,89</b>	<b>987,86</b>	<b>157,17</b>

Tab. 16. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung ( $s$ ) der Anlaufzeit (ms) jedes Spielers für die Bedingungen Baseline und Keeper-dependent

Spieler	Baseline		Keeper-dependent	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
DR	1550,87	224,54	1306,25	113,13
MB	934,58	92,31	1112,08	266,93
ML	1033,75	109,81	1071,25	140,47
MR1	1124,17	168,86	1067,08	102,38
RP	1460,42	181,55	1257,92	105,21
RS	1220,00	241,48	1299,17	134,49
SZ	796,67	44,10	785,65	35,40
TS	847,50	42,55	845,00	76,33
$\bar{x}$	<b>1020,99</b>	<b>138,15</b>	<b>1093,05</b>	<b>121,79</b>

Tab. 17. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung ( $s$ ) der Anlaufzeit (ms) jedes Spielers für die Bedingungen Baseline und Point of no return

Spieler	Baseline		Point of no return	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
AM	1079,17	127,38	1142,50	72,91
DJ	1074,17	184,06	979,58	66,23
EH	1060,43	128,54	935,42	86,63
MR2	1162,38	154,43	998,70	217,09
SW	813,33	77,10	787,08	42,17
SZ	796,67	44,10	859,58	47,77
UR	1097,08	132,52	1145	93,34
$\bar{x}$	<b>1011,89</b>	<b>121,16</b>	<b>978,27</b>	<b>89,45</b>

## (b) Interpretation

Die Anlaufzeiten der vier Bedingungen schwanken in den Gruppenmittelwerten zwischen  $1093,05 \pm 121,79\text{ms}$  (*Keeper-dependent*) und  $978,27 \pm 89,45\text{ms}$  (*Point of no return*). Die Bedingungen *Baseline* ( $1083,39 \pm 146,27\text{ms}$ ) und *Keeper-dependent* weisen ähnlich lange Anlaufzeiten über alle Strafstöße einer Untersuchungssituation auf. Am schnellsten laufen die Spieler in der Bedingung *Point of no return* an, gefolgt von der Bedingung *Keeper-independent* ( $987,86 \pm 157,17\text{ms}$ ). Im Vergleich der Bedingungen *Baseline* und *Keeper-dependent* ist das Anlaufverhalten von fünf Spielern mit leichten Schwankungen gleichbleibend, DR und RP laufen in der Bedingung *Keeper-dependent* um etwa 200ms schneller an und MB als einziger Spieler um etwa 200ms langsamer. Die Anlaufzeiten der Spieler aus der Bedingung *Keeper-independent* sind im Vergleich zur *Baseline* bis auf die Zeiten von DH und MV kürzer. Am deutlichsten veränderte der Spieler AZ seine Anlaufzeit um -200ms.

Auch die Bedingung *Point of no return* zeigt keine einheitliche Veränderung im Vergleich zur *Baseline*. Drei von sieben Spielern absolvieren die Strafstöße in mehr Zeit, vier Probanden dagegen verwenden etwas weniger Zeit zur Ausführung der Schüsse. MR2 reduziert seine Anlaufzeit am deutlichsten um etwa 160ms. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass mehrheitlich hohe Standardabweichungen für alle Bedingungen vorliegen. Die vier Spieler DH, SW, SZ und TS weisen für alle absolvierten Bedingungen konstant kleine Standardabweichungen auf.

## 5.2 Prozessorientierte Merkmale

### 5.2.1 Richtungsspezifische Variabilität der Bewegungsmuster

Die Größe Variabilitätskoeffizient lässt Aussagen über die Stärke der Streuungen innerhalb einer Gruppe von Bewegungsmustern zu. Bezogen auf die Bedingungen der Untersuchung können mittels dieses Quotienten die Variabilität von Bewegungsmustern einzelner Zielfelder bestimmt und miteinander verglichen werden. Es werden im Folgenden die Variabilitätskoeffizienten für ganzheitliche Bewegungsmuster (gBM) und phasenbezogene Bewegungsmuster (pBM) betrachtet, da für diese Bewegungsmuster alle kinematischen Beschreibungsgrößen untersucht werden.



## 5.2.1.1 Variabilitätskoeffizienten ganzheitlicher Bewegungsmuster

## (a) Darstellung

Tab. 18. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für die Merkmale Winkel-Verlauf, Winkelgeschwindigkeit und Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM

Spieler	Winkel-Verlauf				Winkelgeschwindigkeit				Gelenkmittelpunkt			
	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU
AM	7,2	14,0	11,3	10,3	9,1	8,0	5,9	6,8	35,7	20,8	21,0	37,9
AZ	16,3	8,6	14,7	10,4	13,8	5,6	6,5	7,6	42,5	20,7	31,7	26,2
CS	13,5	13,4	18,1	12,7	13,3	13,4	14,6	12,7	38,3	53,6	39,6	29,1
DH	8,6	34,9	10,3	10,8	6,0	19,6	9,7	4,8	16,5	62,7	24,8	21,3
DJ	7,8	12,4	10,5	6,6	4,8	8,1	6,1	3,7	23,9	22,8	25,5	21,6
DR	13,8	8,2	9,3	9,1	11,2	5,6	8,8	7,8	44,1	31,9	36,7	36,7
EH	7,0	8,9	7,2	8,0	4,5	9,4	3,9	3,4	58,8	31,7	41,4	16,0
MB	10,5	10,5	7,4	13,0	9,8	9,3	7,0	4,3	23,1	25,5	13,0	84,0
ML	8,4	6,0	8,2	13,1	26,9	9,8	18,8	20,8	20,6	27,1	33,3	33,6
MM	7,4	8,8	16,7	5,9	5,5	3,8	11,7	8,1	21,0	19,8	33,6	29,0
MR1	5,2	9,6	4,7	7,2	5,2	9,6	4,7	7,2	24,4	25,5	18,7	26,6
MR2	9,0	9,8	11,7	15,0	4,8	5,4	6,5	11,5	20,9	27,0	29,2	46,4
MV	11,4	14,2	8,0	17,7	9,6	9,3	5,5	12,4	45,7	26,9	17,5	35,8
NA	15,4	15,0	34,0	12,9	8,2	10,0	20,6	8,2	30,9	31,2	64,7	28,3
RP	6,1	12,5	7,9	8,2	4,1	7,8	5,6	6,2	28,6	41,1	28,1	19,6
RS	11,5	8,8	7,4	13,5	8,4	6,3	5,9	10,9	29,0	44,0	37,7	23,9
SE	14,1	8,1	6,5	8,8	12,5	9,3	5,2	6,2	35,3	36,3	18,4	38,3
SW	9,1	7,4	10,8	8,0	5,6	5,3	5,2	8,3	41,1	34,6	28,0	51,9
SZ	10,9	9,4	6,8	10,7	9,6	8,0	8,7	6,8	24,3	19,6	53,7	70,1
TS	6,8	8,7	3,2	9,9	7,0	18,5	13,9	14,2	15,2	21,0	20,1	27,6
UR	10,4	7,0	16,0	20,6	10,9	6,7	12,7	10,5	27,0	25,8	46,0	43,3
$\bar{x}$	<b>10,0</b>	<b>11,2</b>	<b>11,0</b>	<b>11,1</b>	<b>9,1</b>	<b>9,0</b>	<b>8,9</b>	<b>8,7</b>	<b>30,8</b>	<b>30,9</b>	<b>31,6</b>	<b>35,6</b>

## (b) Interpretation

Tabelle 18 zeigt die Variabilitätskoeffizienten für die drei betrachteten Merkmale anhand der ganzheitlichen Bewegungsmuster. Die Bestimmung der Gruppenmittelwerte der *Baseline* für diese Merkmale verdeutlichen, dass die Variabilitätskoeffizienten für die Merkmale Winkel-Verlauf und Winkelgeschwindigkeit deutlich geringer sind als der Variabilitätskoeffizient des Merkmals Verlauf der Gelenkmittelpunkte. Im Vergleich der Variabilitätskoeffizienten für die vier Zielfelder sind keine großen Schwankungen zu erkennen, sondern sehr stabile Werte über alle drei Merkmale. Die intra-individuelle Betrachtung der Variabilitätskoeffizienten für das Merkmal Winkel-Verlauf zeigt bei vielen Spielern eine stabile Streuung über die Bewegungsmuster der Zielfelder an. Es bestehen wenige Probanden, welche eine starke Zunahme der Variabilitätskoeffizienten für ein Zielfeld aufweisen. Beispielsweise steigt der Prozentwert des Variabilitätskoeffizienten von DH für das Zielfeld LU auf 34,9% an. Im Vergleich dazu liegen alle weiteren Zielfelder etwa bei einer Variabili-

tät von 10%. Ebenso verhalten sich die Streuungen bei Probanden NA und MM, die für das Zielfeld RO doppelt so viel Variabilität in ihren Bewegungsmustern aufweisen. Sehr konstante Variabilität können für die Spieler EH, SW und SZ festgehalten werden.

Streuungen auf ähnlichem Niveau zeigen die Variabilitätskoeffizienten für das Merkmal Winkelgeschwindigkeit. Es treten wiederum für einzelne Spieler in Bezug auf die Zielfelder starke Schwankungen auf. Für die Probanden AZ (LO), DH (LU), EH (LU), MR2 (RU) und NA (RO) zeigen sich in den genannten Zielfeldern starke Vergrößerungen in der Variabilität, wobei die Variabilität für die übrigen Zielfelder deutlich geringer ist. Ein umgekehrtes Bild ist bei den Probanden ML und MV zu sehen. Drei Zielfelder haben einen Variabilitätskoeffizienten, der doppelt so hoch ist wie das verbleibende vierte Zielfeld.

Für die Variabilitätskoeffizienten der Distanzmaße von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte sind deutlich größere Ausprägungen in den Prozentwerten zu sehen. Der Spieler MB hat für das Zielfeld RU einen Variabilitätskoeffizient von 84%, dagegen sind die anderen Zielfelder mit Variabilitätskoeffizienten unter 26% deutlich geringer. Ebenso stellen sich die Werte für die Probanden DH, EH, NA und SZ dar. Ausgeglichene Variabilitätskoeffizienten über alle Zielfelder weisen beispielsweise die Spieler DJ, ML, MM, MR1, DR, MM und TS auf. Die geringsten Variabilitätskoeffizienten können den Probanden TS, DJ und MR1 zugeordnet werden.

Ein Blick auf die Trefferquote für die Zielfelder mit einem deutlich erhöhten Variabilitätskoeffizient für eines der Merkmale Winkel-Verlauf, Winkelgeschwindigkeit sowie Gelenkmittelpunkte der genannten Spieler im Vergleich zu den anderen Zielfeldern verdeutlicht, dass trotz der hohen Variabilität zwischen den Bewegungsmustern eines Zielfeldes hohe Trefferquoten erzielt werden können. Die Spieler AZ (Winkelgeschwindigkeit) und EH, MB und SZ (Gelenkmittelpunkte) weisen trotz der hohen Variabilitätskoeffizienten für die dazugehörigen Zielfelder die höchste sowie DH (alle Merkmale) und MR2 (Winkelgeschwindigkeit) die zweithöchste Trefferquote auf. Dagegen entspricht ein hoher Variabilitätskoeffizient für die Spieler EH (Winkelgeschwindigkeit) und NA (alle Merkmale) der geringsten Trefferquote im Vergleich zu den anderen Zielfeldern.

5.2.1.2 Variabilitätskoeffizienten phasenbezogener Bewegungsmuster

(a) Darstellung

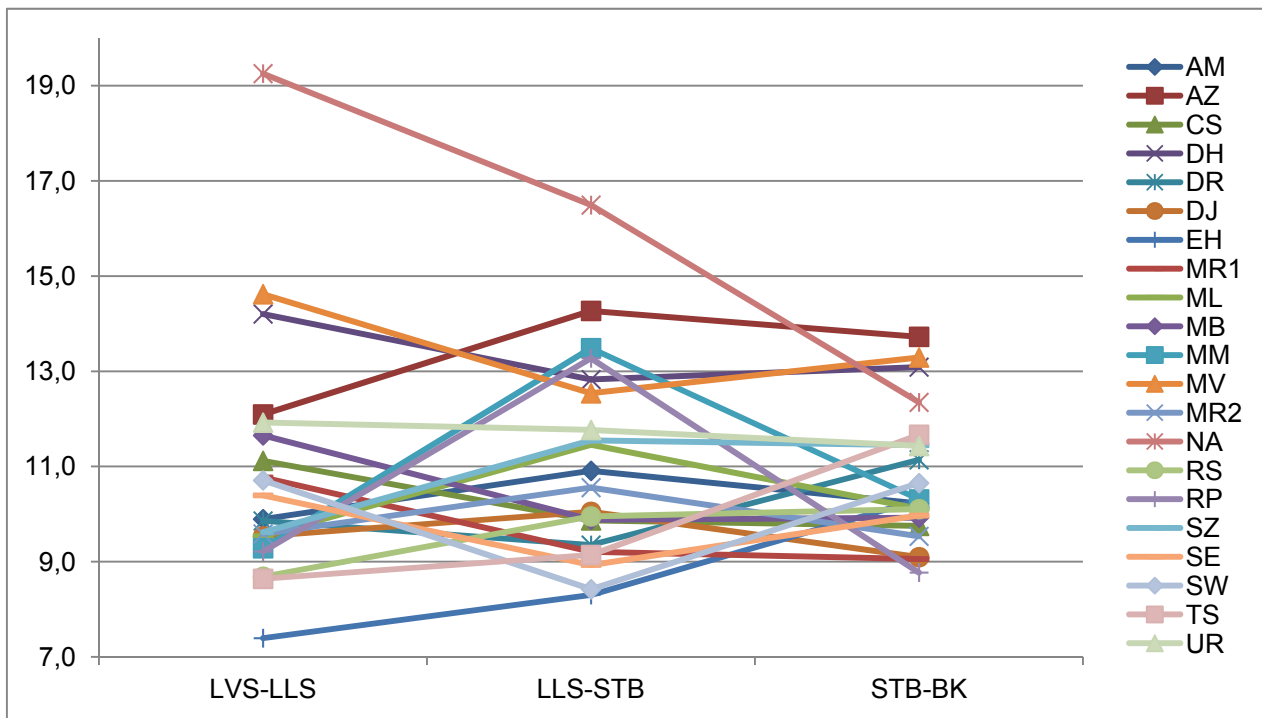


Abb. 39. Gemittelter, phasenbezogener Variabilitätskoeffizient über alle Bewegungsmuster eines Probanden der Phasen LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK (Winkel-Verlauf)

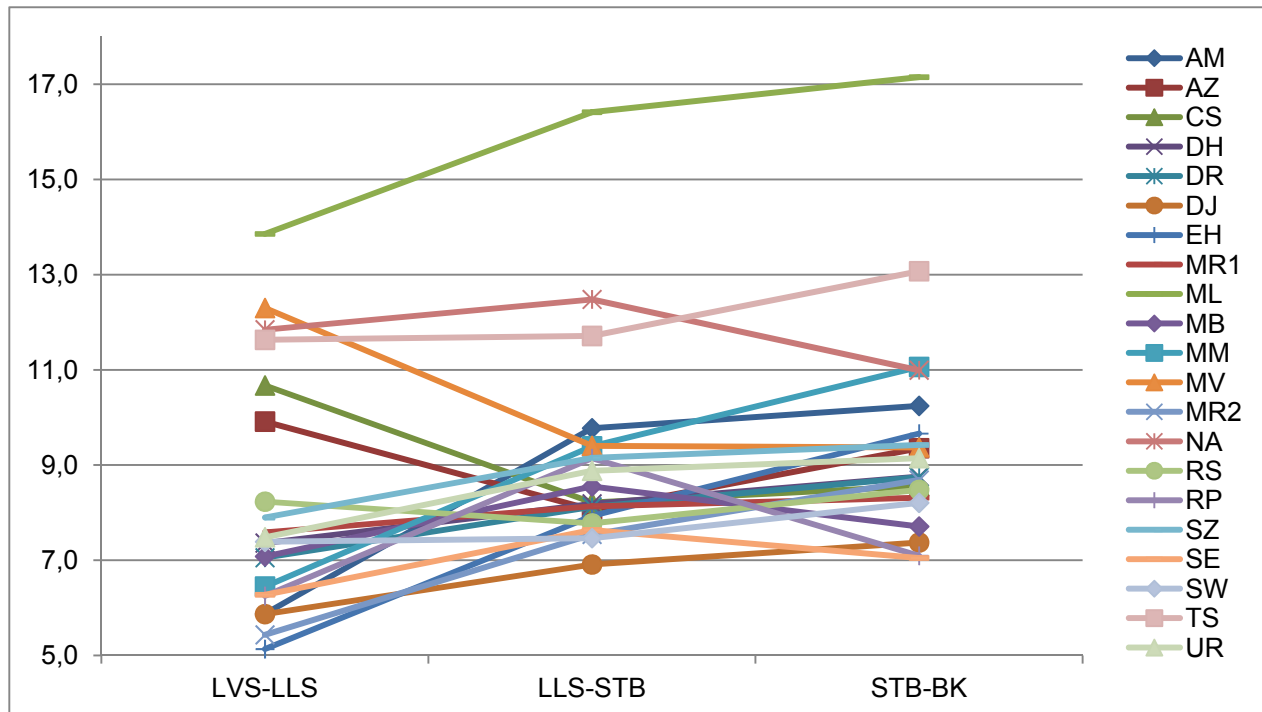


Abb. 40. Gemittelter, phasenbezogener Variabilitätskoeffizient über alle Bewegungsmuster eines Probanden der Phasen LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK (Winkelgeschwindigkeit)

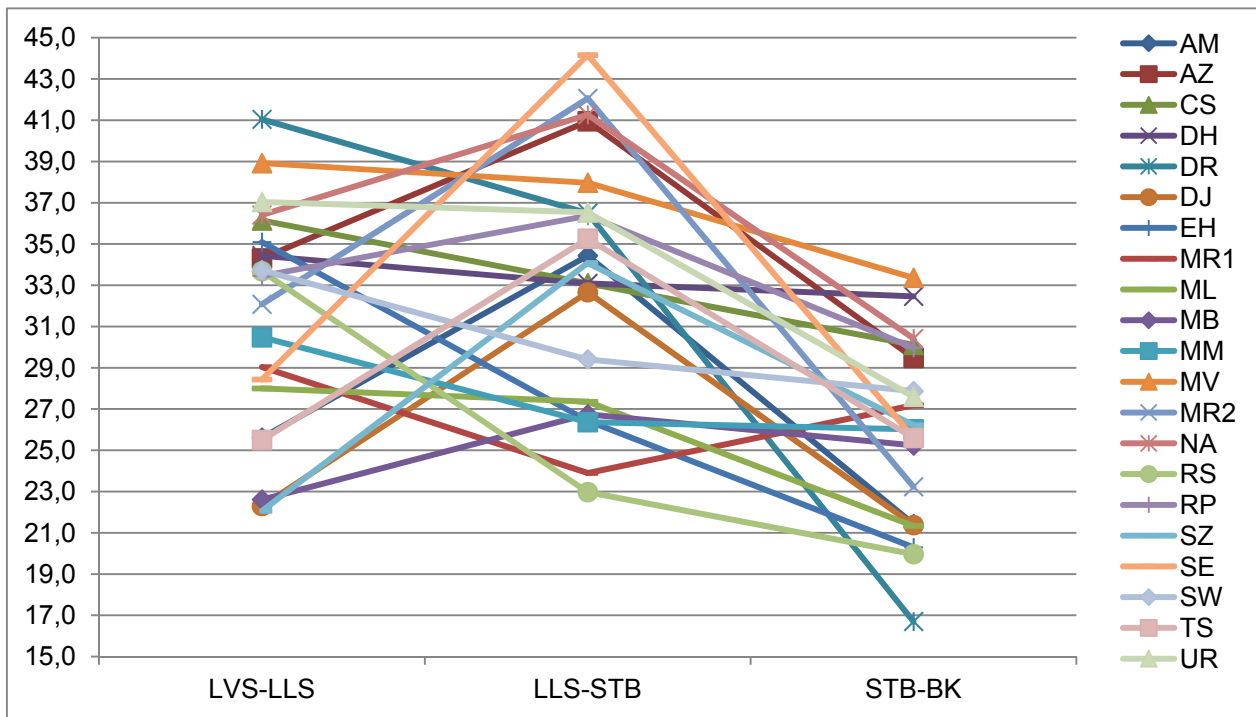


Abb. 41. Gemittelter, phasenbezogener Variabilitätskoeffizient über alle Bewegungsmuster eines Probanden der Phasen LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK (Verlauf der Gelenkmittelpunkte)

### (b) Interpretation

Die Spieler zeigen in ihren Variabilitätskoeffizienten der phasenbezogenen Bewegungsmuster ähnlich wie für die ganzheitlichen Bewegungsmuster Großteils geringe intra-individuelle Schwankungen (siehe Anhang Tabelle 42-44). In jeder Phase sind nur bei wenigen Probanden sehr stark reduzierte oder erhöhte Prozentwerte im Vergleich zu anderen Zielfeldern zu sehen. Beispielsweise hat DH in der Phase LVS-LLS für die Zielzonen LO (10,3%), RO (6,8%) und RU (6,6%) eine deutlich geringere Variabilität zwischen den Bewegungsmustern im Vergleich zu der Zielzone LU (33,2%). Diese Extremwerte bleiben über die Phasen hinweg nicht unbedingt erhalten und somit kann keine eindeutige Charakteristik über den Verlauf der Variabilitätskoeffizienten in den drei Phasen der Bewegung festgehalten werden.

Um die Komplexität der Variabilitätskoeffizienten, die für jeweils vier Zielzonen und drei Phasen von 21 Probanden vorliegen, zu reduzieren, werden die personenbezogenen Variabilitätskoeffizienten der Zielfelder gemittelt für jede Phase und jedes Merkmal betrachtet. Das Merkmal Winkel-Verlauf zeigt im Variabilitätskoeffizient für die Individuen kaum Veränderungen über die Phasen hinweg. Für die Gruppe betrachtet liegt die mittlere Variabilität bei 11% für alle Phasen. Abbildung 39 visualisiert die Ausprägung der Variabilitätskoeffizienten für die drei Phasen der Bewegung. Die Verläufe zeigen keine einheitliche Entwicklung über die drei Phasen auf. Es bestehen stetig aufsteigende, abfallende oder auch wechselnde Verläufe. Anhand der Variabilitätskoeffizienten für die Phasen LVS-LLS und STB-BK kann festgehalten werden, dass bei 16 von 21 Spielern der Variabilitätskoeffizient unabhängig des Verlaufs von der ersten zur letzten Bewegungsphase geringer wird. Am klarsten tritt dies bei Spieler NA auf. Bei Betrachtung der Variabilitätskoeffizienten

auf Basis der Winkelgeschwindigkeiten sind bei 14 von 21 Spielern stetig größer werdende Variabilitätskoeffizienten zu beobachten (Abbildung 40). Dieser Trend zeigt sich auch im Gruppenmittel der Phasen LVS-LLS (8,2%), LLS-STB (9,1%) und STB-BK (9,4%). Die Variabilitätskoeffizienten der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten deuten auf größere Unterschiede zwischen den Phasen hin (Abbildung 41). Die Spieler sind anhand der Entwicklung der Variabilitätskoeffizienten in zwei gleich große Gruppen einzuteilen. Entweder steigt der Variabilitätskoeffizient von der Phase LVS-LLS zur Phase LLS-STB an, um in der letzten Phase wieder abzunehmen. Oder es tritt ein stetiger Abfall der Variabilität über die Phasen hinweg auf. Bei 19 von 21 Probanden ist unabhängig von der Entwicklung der Variabilitätskoeffizienten, eine reduzierte Variabilität zwischen den Bewegungsmustern der letzten Phase im Vergleich zur ersten Phase zu erkennen. Das Gruppenmittel von LVS-LLS mit 31,4% sinkt demnach auf 25,8% ab.

### 5.2.1.3 *Schlussfolgerung*

Die Variabilitätskoeffizienten für ganzheitliche und phasenbezogene Bewegungsmuster sind für die Merkmale Winkel-Verlauf und Winkelgeschwindigkeit niedrig und stabil, so dass die Gelenkstellungen sowie die Dynamik der Bewegung in Bezug auf die Zielfelder wenig variieren. Ein leichter Anstieg der Variabilität der Winkelgeschwindigkeit in den drei Phasen deutet darauf hin, dass zum Ende der Anlaufbewegung vermehrt eine zeitliche Koordination der Bewegung stattfindet. Deutlichere Unterschiede in der Höhe zeigen die Variabilitätskoeffizienten für den Verlauf der Gelenkmittelpunkte, speziell in der phasenbezogenen Analyse. Die auffallenden Entwicklungen bei den Variabilitätskoeffizienten zwischen den Phasen teilen die Probanden in zwei Gruppen. Eine Gruppe charakterisiert sich durch eine mehr lineare Reduzierung der Variabilität über die Phasen zum Ballkontakt hin. Im Vergleich dazu ist für die andere Gruppe in der Phase LLS-STB eine deutliche Erhöhung der Variabilitätskoeffizienten mit einer anschließenden Reduzierung in der Phase STB-BK zu erkennen. Anscheinend erfolgt eine Anpassung oder Korrektur im Bewegungsverlauf, um vor dem Standbeinaufsatz für die eigentliche Schussbewegung optimale Ausgangsbedingungen im Bewegungsverlauf zu erreichen. Die ausbleibende Erhöhung der Variabilitätskoeffizienten für die Gruppe mit linearem Verlauf könnte somit eine höhere Stabilität im Anlauf anzeigen, die keine räumlichen Ausgleichsbewegungen erfordern. Ein Hinweis, dass eine erhöhte Variabilität in der Bewegung nicht negativ für das Bewegungsergebnis sein muss, sondern mehr als Kompensation mit dem Ziel der Bewegungsstabilisation für die letzte Phase anzusehen ist, zeigen die hohen Trefferquoten für die Zielfelder einzelner Spieler. Im Hinblick auf die Beobachtung der Anlaufbewegung durch den Torwart, könnte speziell in der Phase LLS-STB aufgrund der erhöhten Variabilität eine Erkennung der Schussrichtungen erschwert sein. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass geringe Variabilitätskoeffizienten eine Erkennung der Bewegungsmuster unterstützen.

## 5.2.2 Inter-individueller Vergleich von Bewegungsmustern

Die inter-individuelle Analyse berücksichtigt zur Erkennung von Individuen alle Strafstöße der 21 Probanden jeweils für die Merkmale Winkel-Verlauf, Winkelgeschwindigkeit und Gelenkmittelpunktverlauf. Die resultierenden Dendrogramme der Clusteranalysen von ganzheitlichen Bewegungsmustern sind im Anhang aufgeführt.

### 5.2.2.1 Winkel-Verlauf

#### (a) Darstellung

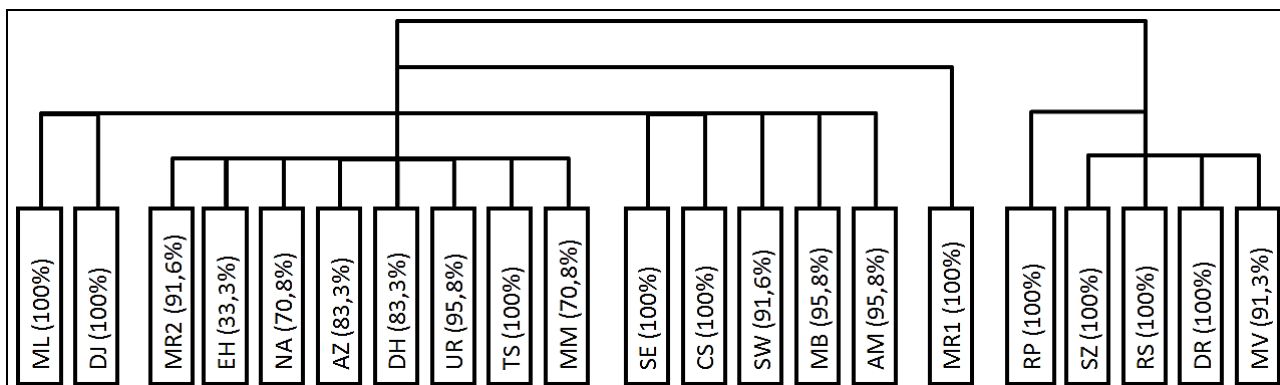


Abb. 42. Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM

#### (b) Interpretation

Das Dendrogramm zeigt, wie viel Prozent der 24 absolvierten Strafstöße einem Probanden zugeordnet werden. Die Clusteranalyse anhand der Winkel-Verläufe trennt auf der ersten Ebene die 504 Strafstöße der Spieler aus der Bedingung *Baseline* bezüglich ihres Schussbeins in die Gruppen „Linksfuß“ und „Rechtsfuß“. Im Durchschnitt ordnet sie 91% aller Strafstöße den Individuen zu. Die Separierung der Strafstöße für ein Individuum liegt zwischen 33,3% und 100%. Die höchste Abgrenzung mit 100% erreichen die Spieler CS, DJ, DR, ML, MR1, RP, RS, SE, SZ und TS. Dabei weist der Spieler DR zusätzlich eine klare Abgrenzung der Schussrichtungen links und rechts mit jeweils 83,3% auf. Bei den Spielern AM, MB und UR fallen 23 von 24 Schüsse in ein Cluster. Auch die Spieler MR2, MV und SW weisen mit 22 von 24 Strafstößen eine hohe Zuweisungsrate von 91,7% auf. Unter dem Durchschnitt liegen die Zuweisungen der Spieler AZ und DH (83,3%) sowie MM und NA (70,8%). Die undeutlichste Abgrenzung zu anderen Spielern zeigen die Bewegungsmuster von EH mit 33,3%. Es bestehen für die Strafstöße von EH im Dendrogramm 11 Einzelcluster.

### 5.2.2.2 Winkelgeschwindigkeit

#### (a) Darstellung

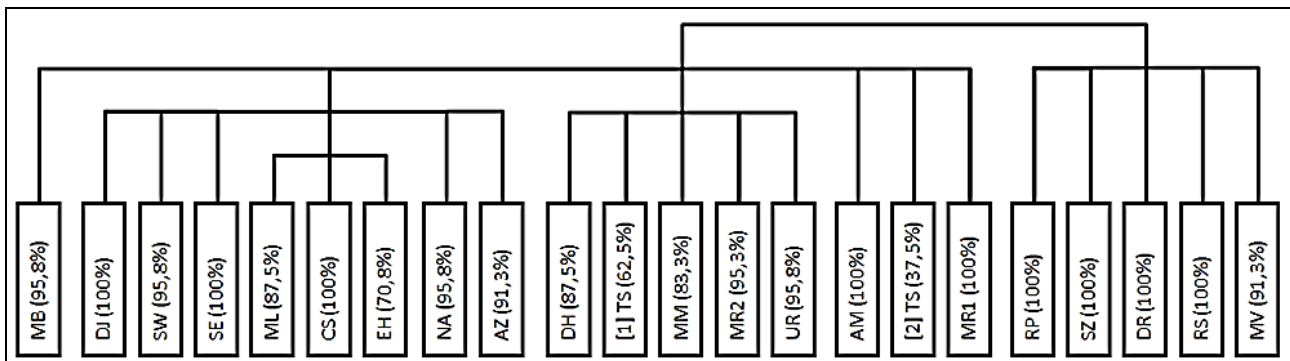


Abb. 43. Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM

#### (b) Interpretation

Anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bilden alle Spieler, deren Schussbein links ist, eine Gruppe. Jeder dieser Spieler bildet ein eigenes Cluster und die Erkennungsrate liegt zwischen 91,3% und 100%. Die Spieler, die mit dem rechten Fuß Strafstöße ausführen, werden in ein weiteres Cluster gruppiert. Innerhalb dieses Clusters separiert die Clusteranalyse die Probanden MB (95,8%), AM (100%) und MR1 (100%). In zwei Subclustern verteilen sich die übrigen Probanden. Das kleinere Subcluster beinhaltet die Bewegungsmuster von fünf Spielern. Das größere Cluster enthält die Strafstöße von acht Spielern, wobei drei in einem weiteren Untercluster einsortiert werden. Die Erkennungsraten für Spieler mit Rechtsfuß streuen zwischen 62,5% und 100%. Die Bewegungsmuster des Probanden TS teilen sich in zwei Cluster mit 9 und 15 Strafstößen auf. Im Durchschnitt über alle Probanden werden den Individuen 93% der Strafstöße zugeordnet.

### 5.2.2.3 Verlauf der Gelenkmittelpunkte

#### (a) Darstellung

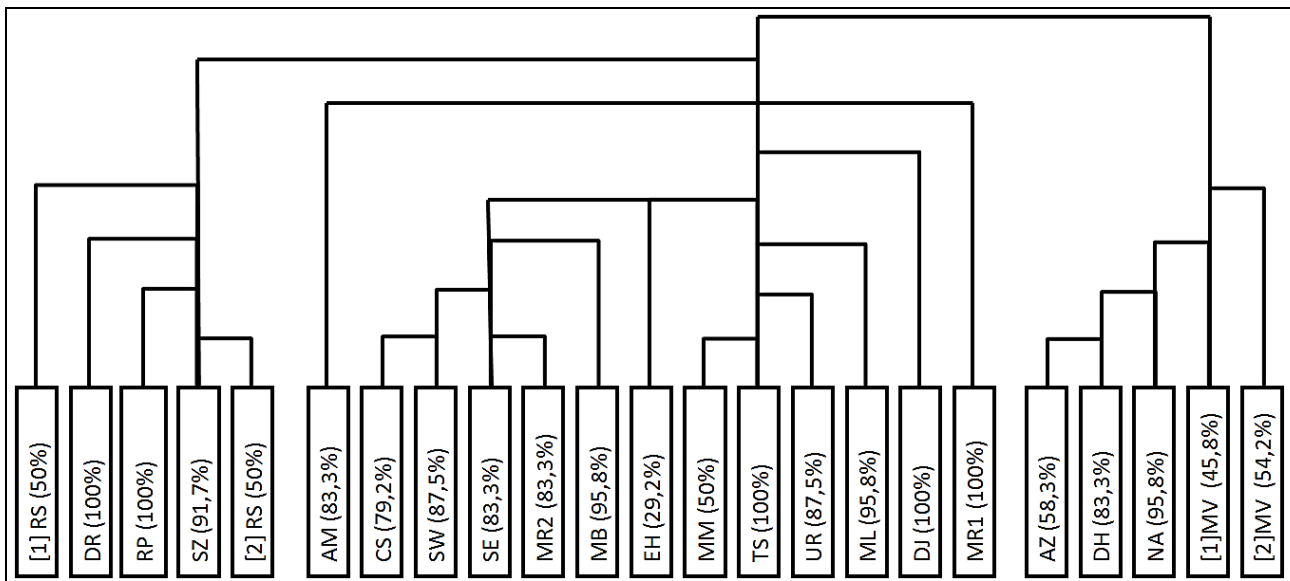


Abb. 44. Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte gBM

#### (b) Interpretation

Die Clusteranalyse für die Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten separiert auf der ersten Ebene vier Spieler von der Gruppe. Bei näherer Betrachtung umfasst die kleine Spielergruppe mit AZ, DH, MV und NA alle Spieler aus dem Juniorenbereich (U19). Die Bewegungsmuster von MV bezüglich der Richtungen links und rechts werden zu 100% bzw. 91,6% in getrennten Clustern eingruppiert, weil eine Veränderung des Anlaufes zwischen den Schussrichtungen vorlag. Die Bewegungsmuster der Juniorenspieler NA, AZ und DH werden von 58,3% bis 95,8% separiert. Das Einteilungskriterium Schussbein spielt bei der Clusterbildung auf der ersten Ebene keine Rolle. Auf der zweiten Ebene werden die verbleibenden vier Spieler DR, RP, RS und SZ, die mit dem linken Fuß ihre Strafstöße ausführen, in ein Cluster zusammengeführt. Alle übrigen Spieler fallen in ein sehr großes drittes Cluster. Für den Probanden RS werden die Schussrichtungen zu 100% in separate Cluster eingruppiert, da dieser Spieler seinen Anlauf für die linke sowie rechte Seite des Tores anders ausgeführt hat. Die übrigen Bewegungsmuster der Spieler dieses Clusters „Linksfuß“ trennen sich sehr gut ab. Das große Cluster „Rechtsfuß“ führt die Bewegungsmuster von 13 Spielern auf. Bis auf die Clusterbildung von EH (29,2%) und MM (50%) weisen alle Probanden dieses Clusters eine sehr hohe Trennungsrates ihrer Strafstöße auf. Eine perfekte Trennung mit 100% gibt die Clusteranalyse für die Spieler DJ, MR1 und TS. Im Durchschnitt liegt die Separierungsrate anhand der Gelenkmittelpunktverläufe bei 81%.



#### 5.2.2.4 Schlussfolgerung

Die Clusteranalysen mit winkelbezogenen Merkmalen trennen Individuen auf höherem Niveau als dies über die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte der Fall ist. Dennoch ist festzuhalten, dass bei jedem Merkmal die Clusteranalyse im Durchschnitt über 80% der Strafstöße den Individuen zuordnet. Daher kann eine vergleichsweise hohe intra-individuelle Ähnlichkeit der Bewegungsmuster und eine geringe Ähnlichkeit zu Strafstößen anderer Spieler angenommen werden. Die Unterschiede treten bei den winkelbezogenen Beschreibungsgrößen deutlicher auf, weil diese Stellung und Dynamik in den Gelenken eines Spielers darstellen und somit den individuell geprägten Bewegungsverlauf präsentieren.

#### 5.2.3 Richtungsspezifische Auswertung von Bewegungsmustern

Im Folgenden werden für jeden Probanden in der Bedingung *Baseline* die ganzheitlichen sowie phasenbezogenen Bewegungsmuster basierend auf den Merkmalen Winkel-Verlauf, Winkelgeschwindigkeit sowie Verlauf der Gelenkmittelpunkte betrachtet. Im Anschluss erfolgt eine erste Einschränkung anhand dieser Ergebnisse auf die am deutlichsten separierende Beschreibungsgröße für die Analyse der Bedingungen *Keeper-independent*, *Keeper-dependent* und *Point of no return*.

Nach der Auswertung der phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster aus der Bedingung *Baseline* wird in einem zweiten Schritt das Bewegungsmuster eines Hinweisreizes ausgewählt, das die deutlichste richtungsspezifische Trennung der Strafstöße aufweist. Diese Abgrenzung wird wiederum für alle weiteren Bedingungen festgehalten.

Die Separierung der Schussrichtungen erfolgt im weiteren Verlauf über Strafstöße auf die linke und rechte Seite. Eine zusätzliche Differenzierung in untere und obere Ecke der jeweiligen Seite des Tores wurde aufgrund der niedrigen Erkennungsraten bei der Analyse von 11 Probanden in der Bedingung *Baseline* nicht weiter vorgenommen.

5.2.3.1 *Bedingung Baseline*

## 5.2.3.1.1 Intra-individueller Vergleich ganzheitlicher Bewegungsmuster

## 5.2.3.1.1.1 Winkel-Verlauf

## (a) Darstellung

Tab. 19. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM (Baseline)

<b>Spieler</b>	<b>Schussrichtung links</b>	<b>Schussrichtung rechts</b>
AM	83,3	50
AZ	33,3	16,6
CS	25	50
DH	33,3	50
DJ	66,6	50
DR	75	75
EH	58,3	25
MB	100	8,3
ML	100	33,3
MM	100	25
MR1	91,6	33,3
MR2	16,6	91,6
MV	33,3	33,3
NA	100	41,6
RP	75	100
RS	58,3	16,6
SE	91,6	16,6
SW	100	41,6
SZ	83,3	33,3
TS	100	50
UR	91,6	25
$\bar{x}$	<b>72,2</b>	<b>41,2</b>

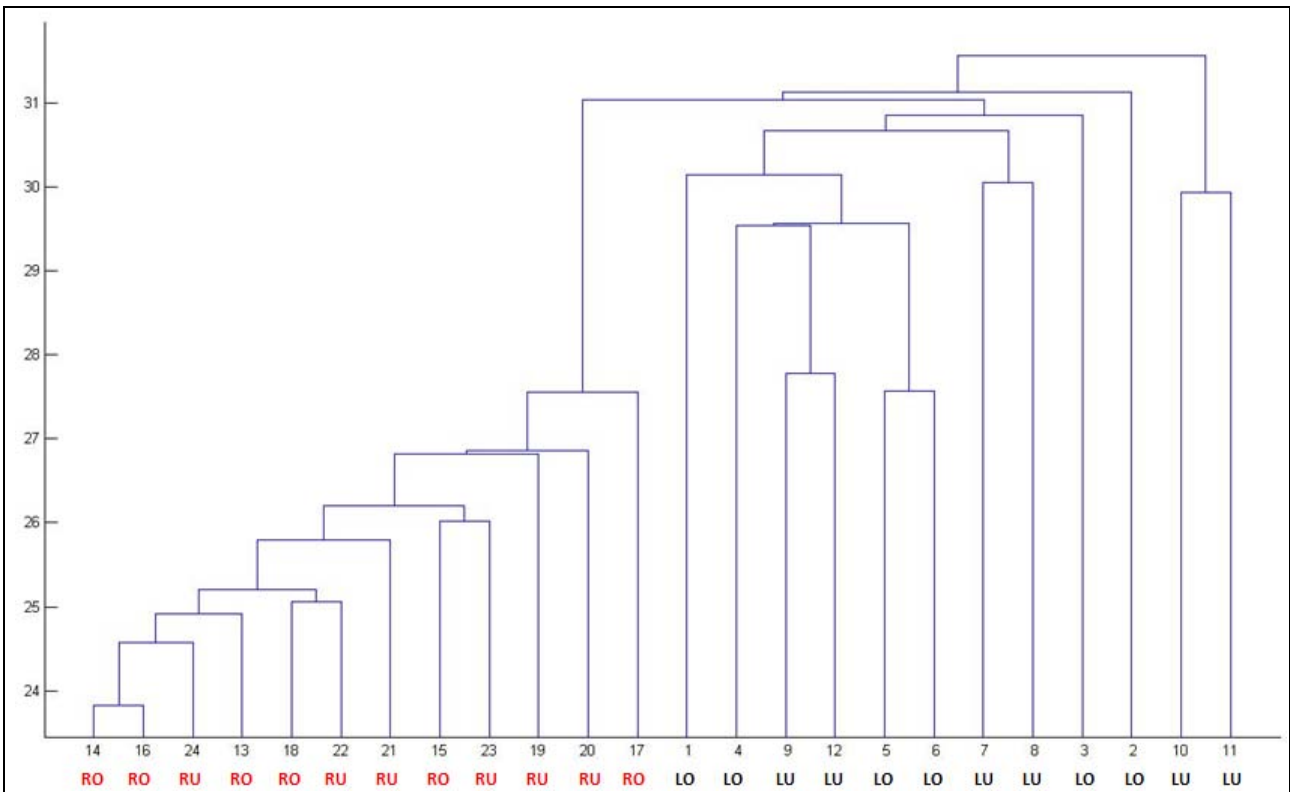


Abb. 45. Dendrogramm des Spielers RP anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM (Baseline)

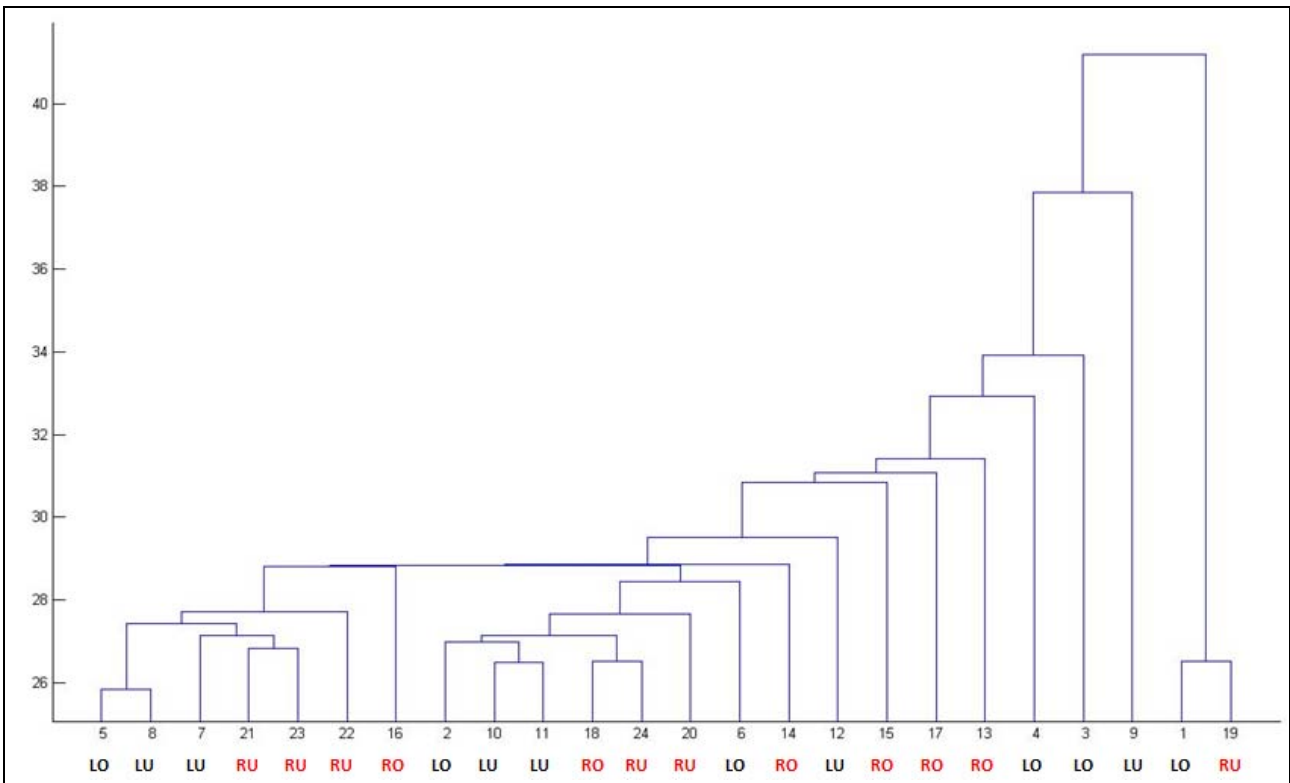


Abb. 46. Dendrogramm des Spielers MV anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei gBM (Baseline)

### (b) Interpretation

Die Clusteranalyse des Merkmals Winkel-Verlauf über alle Spieler ergibt für die Bewegungsmuster eine Trennung nach Schussrichtungen von 72,2% (links) und 41,2% (rechts). Über alle Spieler zeigt sich eine Streuung für die richtungsspezifischen Cluster zwischen 8,3% und 100%. Für die Schussrichtung links werden bei den Probanden MB, ML, MM, NA und SW alle Schüsse in ein Cluster gruppiert. Im Gegensatz werden die Strafstöße nach rechts durch die Clusteranalyse nur einmal bei Proband RP zu 100% abgegrenzt. Eine beidseitige gute Separierung weisen die Spieler DR, RP und mit Abstrichen AM sowie TS auf.

Abbildung 45 und 46 präsentieren ein Beispiel für eine deutliche und weniger deutliche Separierung der Bewegungsmuster. Die Dendrogramme zeigen in der untersten Zeile die Schussrichtung an. Die Ziffern darüber stellen die Reihenfolge der Strafstöße beim Einlesen in MATLAB® dar. Auf der vertikalen Achse ist das Distanzmaß aufgetragen.

Die Trennung der Strafstöße mit den Schussrichtungen links und rechts erfolgt bei Spieler RP mit 100% bzw. 75% (Abbildung 45). Es werden die Schussrichtungen nicht direkt auf der ersten Ebene voneinander gruppiert, sondern drei Schüsse in die linke Ecke separiert. Auf der dritten Ebene bildet das Dendrogramm eine Struktur mit zwei Hauptclustern, in die beide Schussrichtungen eingeordnet werden. Es ist deutlich zu sehen, dass die Distanzen zwischen den Strafstößen nach rechts geringer sind als innerhalb des Clusters der Schussrichtung links. Eine klare Trennung der Schusshöhe ist für beide Schussrichtungen nicht zu erkennen.

Eine undeutliche Separierung zeigt das Dendrogramm des Spielers MV in Abbildung 46. Zu Beginn entstehen nach Abgrenzung zweier Strafstöße viele Einzelcluster. Aufgrund der Kettenbildung ist keine klare Struktur im Dendrogramm zu erkennen. Auf einer tiefen Ebene trennt die Clusteranalyse jeweils sieben Bewegungsmuster in zwei Cluster. Beide Gruppierungen weisen jedoch Strafstöße in beide Schussrichtungen auf. Das linke Cluster enthält mehrheitlich Strafstöße in die Zielfelder LU und RU, das rechte Cluster weist Strafstöße für alle Zielfelder auf.

## 5.2.3.1.1.2 Winkelgeschwindigkeit

## (a) Darstellung

Tab. 20. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline)

<b>Spieler</b>	<b>Schussrichtung links</b>	<b>Schussrichtung rechts</b>
AM	75	25
AZ	75	18,2
CS	33,3	50
DH	50	41,6
DJ	91,6	83,3
DR	75	25
EH	41,6	8,3
MB	100	8,3
ML	91,6	33,3
MM	83,3	25
MR1	100	91,6
MR2	16,6	91,6
MV	50	54,5
NA	50	16,6
RP	16,6	100
RS	83,3	16,6
SE	91,6	33,3
SW	100	33,3
SZ	41,6	41,6
TS	58,3	50
UR	66,6	25
$\bar{x}$	<b>66,2</b>	<b>41,5</b>

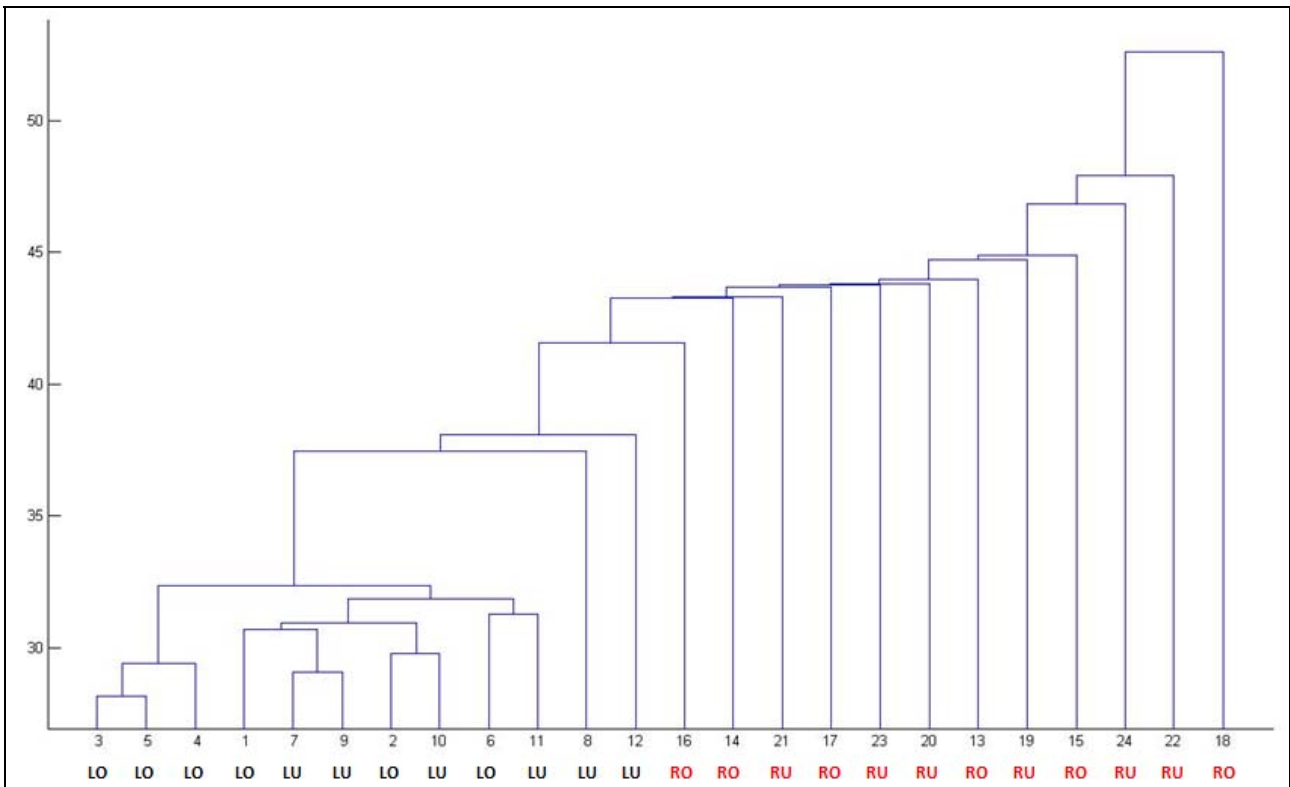


Abb. 47. Dendrogramm des Spielers MB anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline)

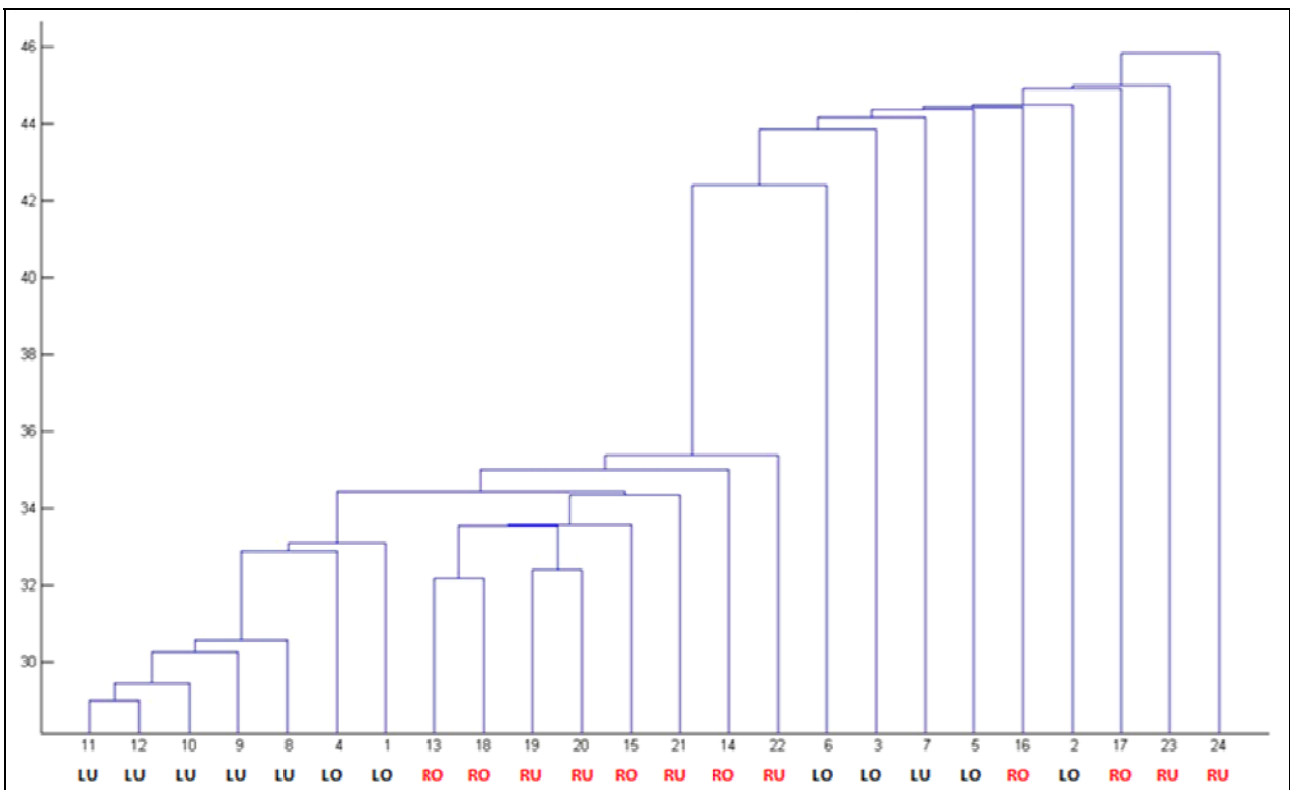


Abb. 48. Dendrogramm des Spielers TS anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline)

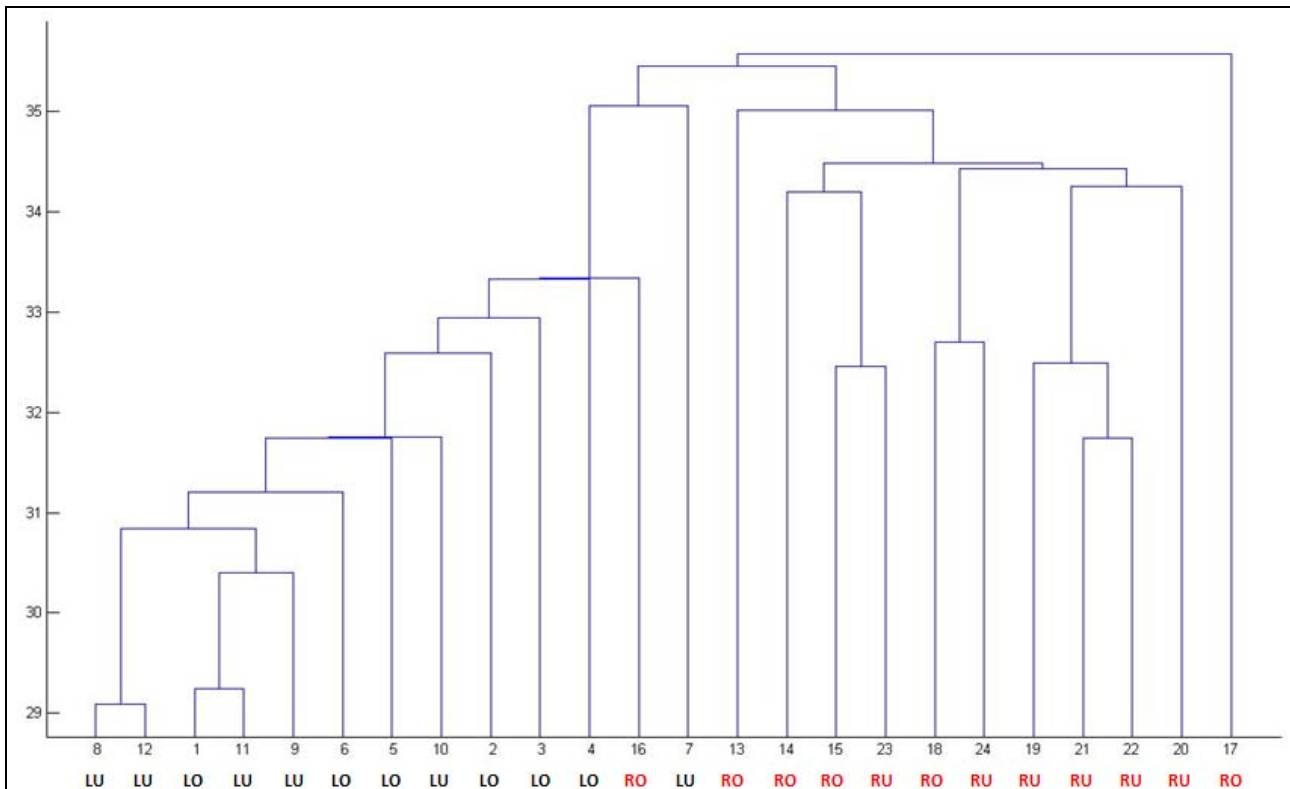


Abb. 49. Dendrogramm des Spielers MR1 anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei gBM (Baseline)

### (b) Interpretation

Die Separierungsquoten der Clusteranalysen für das Merkmal Winkelgeschwindigkeit liegen im Durchschnitt bei 66,2% (links) und 41,5% (rechts). Die klarste Separierung zeigen die Probanden DJ (links: 91,6%; rechts: 83,3%) und MR1 (links: 100%; rechts: 91,6%) mit einer nahezu perfekten Trennung beider Schussrichtungen. Eine gleichmäßige Größe der Seitigkeitscluster weisen auf einem niedrigeren Niveau die Spieler DH, MV, SZ und TS auf. Für viele Probanden trennt die Clusteranalyse eine Schussrichtung sehr gut, jedoch zeigen die Dendrogramme sehr schlechte Abgrenzungen für die andere Schussrichtung (AM, AZ, DR, MB, ML, MM, MR2, RP, RS, SE und SW).

Abbildung 47 verdeutlicht die ungleiche Separierung der Schussrichtungen durch die Clusteranalyse für den Probanden MB. Die Bewegungsmuster der Strafstöße in die linken Zielfelder weisen deutlich geringere Distanzen untereinander auf als die Strafstöße in die rechten Torecken. Zudem bilden die Schüsse nach rechts kein klares Cluster, sondern werden kettenförmig in Einzelcluster aufgetragen. Die klare Abgrenzung für die Strafstöße der linken Torseite ist nicht für die Schusshöhe zu erkennen. Die Schüsse mit der Nummer 8 und 12 zeigen deutlich größere Distanzen zu den Schüssen der gleichen Schussrichtung und werden separiert aufgeführt.

Eine geringe aber gleichmäßige Separierungsquote für beide Schussrichtungen ist im Dendrogramm der Abbildung 48 zu sehen. Sechs bzw. sieben Bewegungsmuster der Strafstöße von TS werden zu den Gruppen linke Ecke und rechte Ecke zusammengefasst. Alle weiteren Versuche zeigen eine Kettenbildung und grenzen sich durch hohe Distanzen von den beiden Subclustern ab. Innerhalb der Gruppe

der Strafstöße nach links bilden alle Schüsse in das Zielfeld LU ein eigenes Cluster und weisen geringe Distanzen zueinander auf.

Eine deutliche Trennung von Schussrichtungen ergibt die Clusteranalyse für den Probanden MR1 (Abbildung 49). Die Schüsse werden auf der zweiten Ebene nach den Schussrichtungen getrennt. Innerhalb der richtungsspezifischen Gruppen grenzen sich fünf Bewegungsmuster in das Zielfeld RU in einem mehrheitlichen Cluster von den Schüssen in das Zielfeld RO ab. Die weiteren Schüsse verteilen sich in kleinere Cluster. Für die Strafstöße auf die linke Seite separiert die Clusteranalyse Schuss 7 von allen anderen Schüssen in diese Ecke sowie einem Schuss in das Zielfeld RO. Die angedeutete Trennung nach Schusshöhe kann für die Schussrichtung links nicht festgehalten werden. Es besteht erst ein mehrheitliches Cluster mit vier Strafstößen in das Zielfeld LU auf einer tieferen Ebene des Dendrogramms.

### 5.2.3.1.1.3 Verlauf von Gelenkmittelpunkten

#### (a) Darstellung

Tab. 21. Separierungsquoten (%) für die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Baseline)

<b>Spieler</b>	<b>Schussrichtung links</b>	<b>Schussrichtung rechts</b>
AM	91,6	58,7
AZ	50	91,6
CS	75	33,3
DH	25	25
DJ	33,3	91,6
DR	91,6	75
EH	58,3	50
MB	100	91,6
ML	100	66,6
MM	100	100
MR1	91,6	100
MR2	91,6	91,6
MV	100	91,6
NA	33,3	83,3
RP	100	100
RS	100	100
SE	41,6	100
SW	83,3	75
SZ	100	58,3
TS	100	100
UR	75	41,6
$\bar{x}$	<b>78,2</b>	<b>77,4</b>



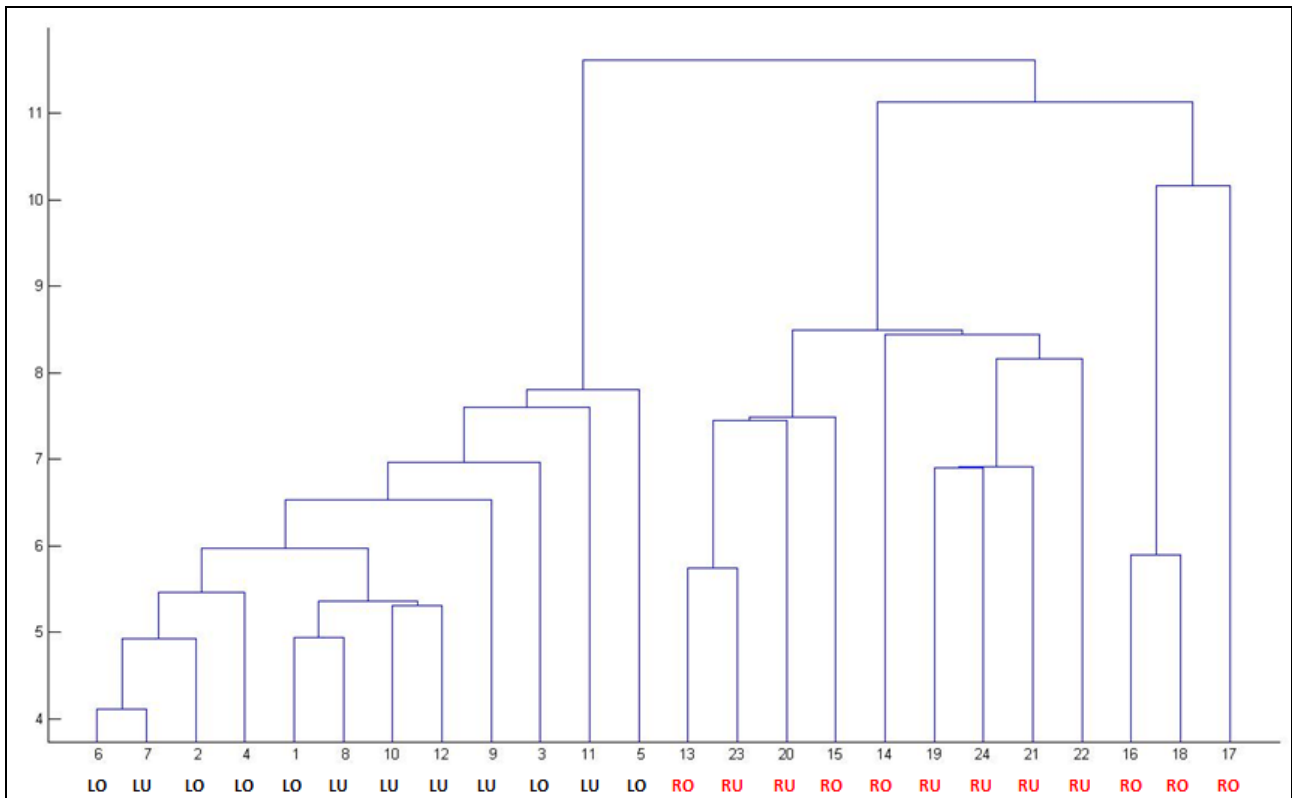


Abb. 50. Dendrogramm des Spielers MM anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Baseline)

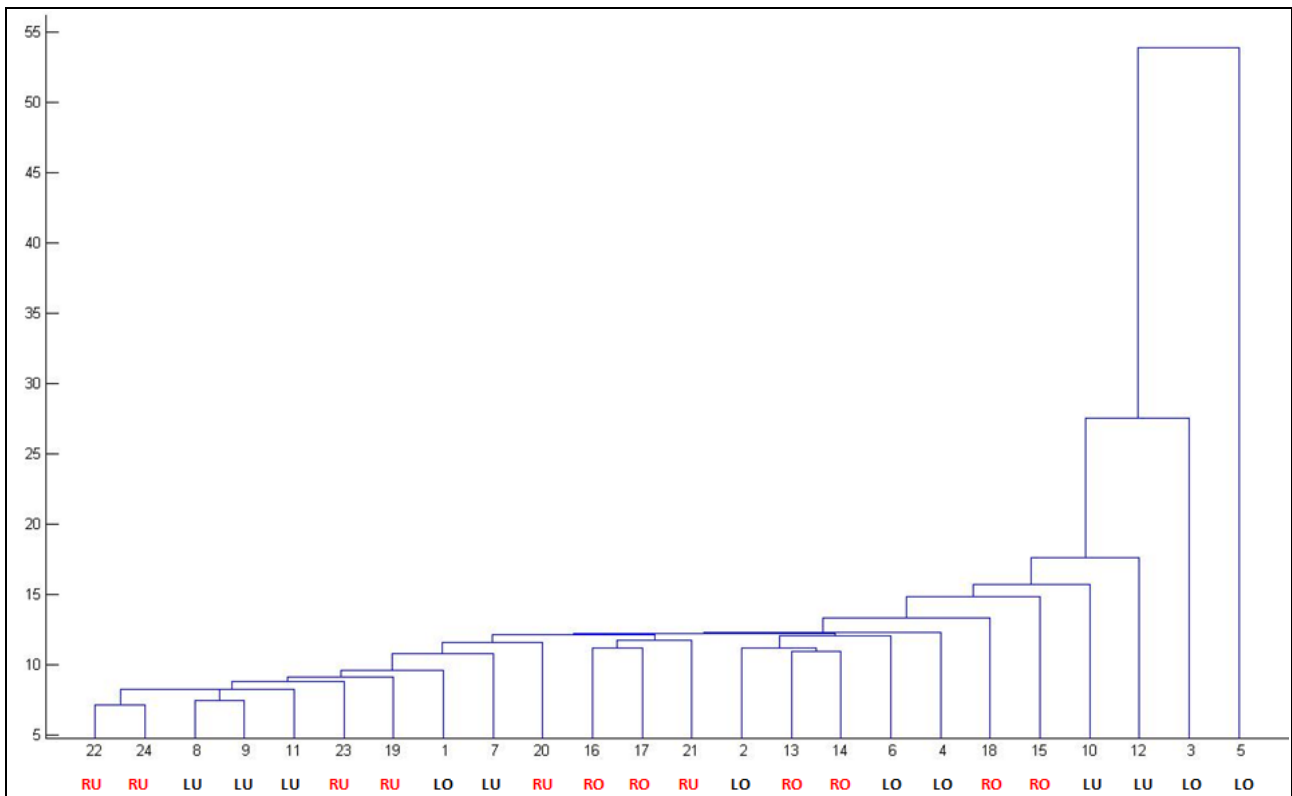


Abb. 51. Dendrogramm des Spielers DH anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Baseline)

### (b) Interpretation

Eine gleichmäßige und hohe Separierungsquote zeigen die Clusteranalysen über das Merkmal der Gelenkmittelpunktverläufe. Die Strafstöße in die Zielfelder LU und LO werden zu 78,2% und die Strafstöße in die Zielfelder RU und RO zu 77,4% erkannt. Für die Schussrichtung links weisen acht Spieler eine Separierung von 100% auf. Auch die Bewegungsmuster von sechs Spielern auf die rechte Torseite werden durch die Clusteranalyse zu 100% abgegrenzt. Die Zuweisungsraten für beide Schussrichtungen über alle Spieler streuen zwischen 25% und 100%. Eine perfekte Erkennung der Schussrichtung anhand der Bewegungsmuster für die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte können für die Probanden MM, RP, RS und TS festgehalten werden. Eine sehr hohe Separierung der Schussrichtungen mit durchschnittlich 96% weisen die Spieler MB, MR1, MR2 und MV auf. Die undeutlichste Abgrenzung der Bewegungsmuster hinsichtlich der Schussrichtungen zeigt DH mit jeweils 25%. Die Betrachtung der Videoaufnahmen für die Probanden RS und MV erklären die hohen Erkennungsraten aufgrund einer Veränderung des Anlaufweges beim Wechsel der Schussrichtung. Beide Spieler liefen für die Strafstöße auf der rechten Seite den Ball geradliniger an. Alle anderen Probanden zeigen keine sichtbaren Variationen im Anlaufverhalten zwischen Strafstößen auf die linke und rechte Seite.

Eine perfekte Trennung der Schussrichtungen zu jeweils 100% zeigt Abbildung 50 anhand des Dendrogramms von MM. Auf der ersten Separierungsebene trennt die Clusteranalyse beide Schussrichtungen in zwei Gruppen. Das rechte Cluster besteht aus drei Subgruppierungen. Ein Cluster enthält 50% der Schüsse in die Ecke RO, ein Weiteres 66,7% der Strafstöße nach RU. Das dritte Subcluster führt Schüsse in beide Zielfelder auf. Somit ist ansatzweise auch eine Trennung der Strafstöße nach hohen und flachen Schüssen zu erkennen. Ähnlich zeigt sich das Clustern für die Bewegungsmuster der Strafstöße nach links. Der zu Beginn kettenförmige Charakter endet in zwei mehrheitliche Cluster für die Zielfelder LU und LO, in denen jeweils 50% der dazugehörigen Schüsse eingruppiert werden.

Die Strafstöße von Proband DH werden durch die Clusteranalyse sehr undeutlich getrennt. In Abbildung 51 ist auf der rechten Seite des Dendrogramms zu sehen, dass einige Schüsse als Einzelcluster abgetrennt werden. Die restlichen Schüsse bilden eine Struktur mit drei Gruppen. Ein Cluster mit drei Schüssen nach rechts grenzt sich von anderen Schüssen ab. Die anderen Cluster zeigen gemischte Zusammensetzungen in Bezug auf die Schussrichtungen. Für die Schussrichtungen in die Zielfelder LU und LO besteht im großen Cluster auf der linken Seite des Dendrogramms ein mehrheitliches Subcluster mit drei Schüssen.

#### 5.2.3.1.1.4 Schlussfolgerung

Die richtungsspezifischen Erkennungsraten sind im Durchschnitt von winkelbezogenen Beschreibungsgrößen geringer als bei den Verläufen von Gelenkmittelpunkten. Bei den Clusteranalysen mit den Merkmalen Winkel-Verlauf und Winkelgeschwindigkeit treten häufig starke Schwankungen zwischen den Trennungsraten beider Schussrichtungen auf. Dieses Phänomen ist in den resultierenden Dendrogrammen der Clusteranalyse mit Ortskoordinaten deutlich weniger zu se-

hen. Die Suche nach einem Erklärungsansatz konnte keine fundierte Lösung finden. Die Vermutung, dass ein Zusammenhang der hohen Separierungsquote auf der linken Seite und dem Schussbein besteht, wird durch Verbindung der Informationen bei 14 Probanden erkennbar, welche Begründung dahinter stehen könnte, bleibt offen. Studien konnten feststellen, dass Schützen mit dem rechten Fuß präziser in die linke Ecke schießen als in die rechte Ecke (vgl. Bowtell, et al., 2009). Somit müssten 16 von 21 Spielern der Untersuchung in die linke Ecke eine höhere Präzision aufzeigen. Anhand der Variabilitätskoeffizienten ist kein Unterschied in der Ausprägung der Variabilität vorzufinden, so dass sich die Annahme nicht zahlenmäßig belegen lässt. Da keine Informationen über die Präzision der Schüsse vorliegen, ist diese Annahme nicht zu belegen.

Das Merkmal Gelenkmittelpunktverlauf bietet sich aufgrund der deutlichen Erkennungsrate sowie der praktischen Relevanz für die weiteren Bedingungen an. Torhüter können Unterschiede im Verlauf der Gelenkmittelpunkte und damit der verbindenden Segmente besser wahrnehmen im Vergleich zu winkelbezogenen Merkmalen.

## 5.2.3.1.2 Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster

## 5.2.3.1.2.1 Winkel-Verlauf

## (a) Darstellung

Tab. 22. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkel-Verlauf bei pBM (Baseline)

Spieler	LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AM	83,3	33,3	75	50	81,2	25
AZ	91,6	33,3	91,6	8,3	66,6	8,3
CS	16,6	58,3	75	25	50	75
DH	50	16,6	25	25	58,3	16,6
DJ	41,6	41,6	41,6	25	66,6	8,3
DR	50	25	58,3	91,6	83,3	66,6
EH	50	16,6	58,3	16,6	54,5	33,3
MB	100	8,3	100	16,6	100	16,6
ML	100	41,6	100	33,3	66,6	50
MM	58,3	16,6	83,3	16,6	100	41,6
MR1	91,6	66,6	91,6	16,6	83,3	100
MR2	16,6	83,3	27,3	100	16,6	83,3
MV	58,3	8,3	16,6	25	41,6	16,6
NA	91,6	33,3	91,6	33,3	50	41,6
RP	50	83,3	8,3	75	25	91,6
RS	75	8,3	50	16,6	66,6	8,3
SE	50	25	58,3	33,3	75	33,3
SW	91,6	33,3	75	16,6	66,6	41,6
SZ	50	41,6	58,3	25	58,3	16,6
TS	50	75	100	33,3	41,6	41,6
UR	58,3	25	33,3	50	100	75
$\bar{x}$	<b>63,1</b>	<b>36,9</b>	<b>62,8</b>	<b>34,9</b>	<b>64,4</b>	<b>42,4</b>

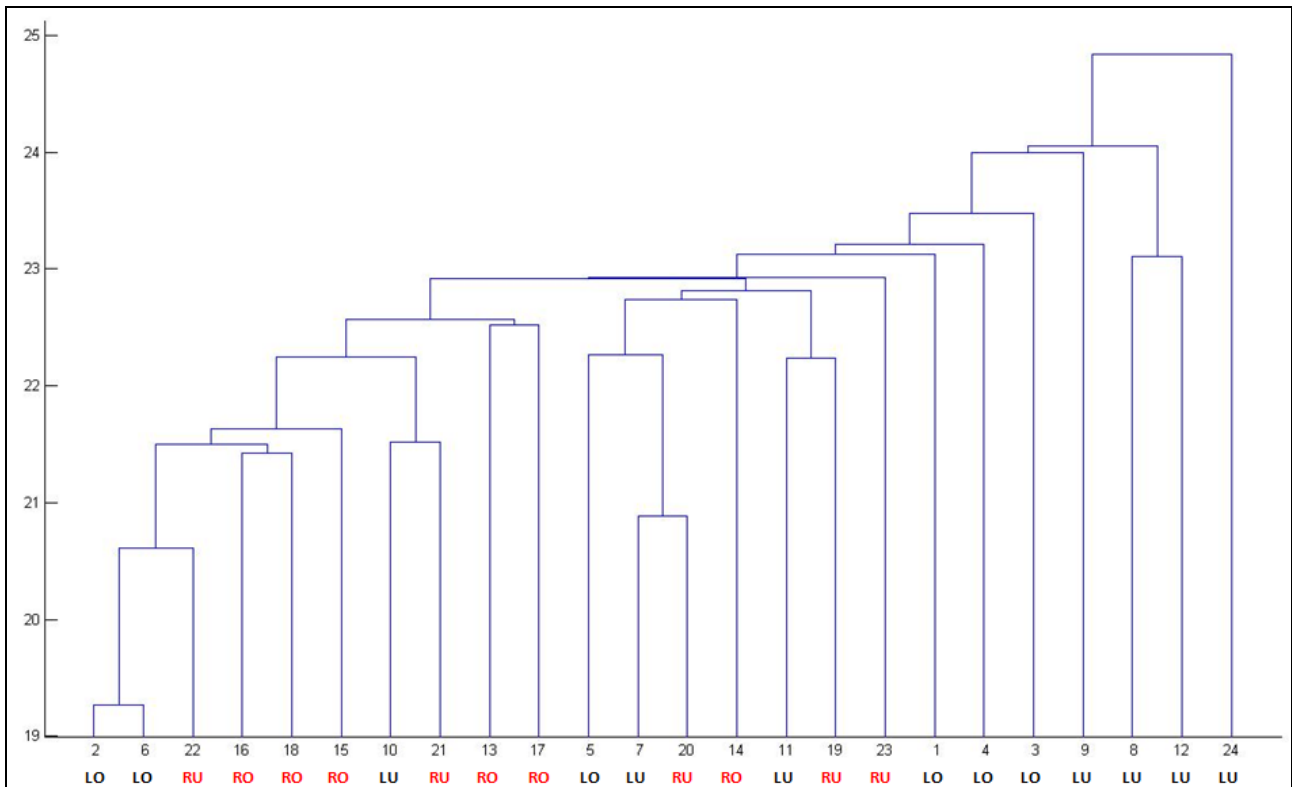


Abb. 52. Dendrogramm des Spielers CS anhand des Merkmals Winkel-Verlauf für das pBM LVS-LLS (Baseline)

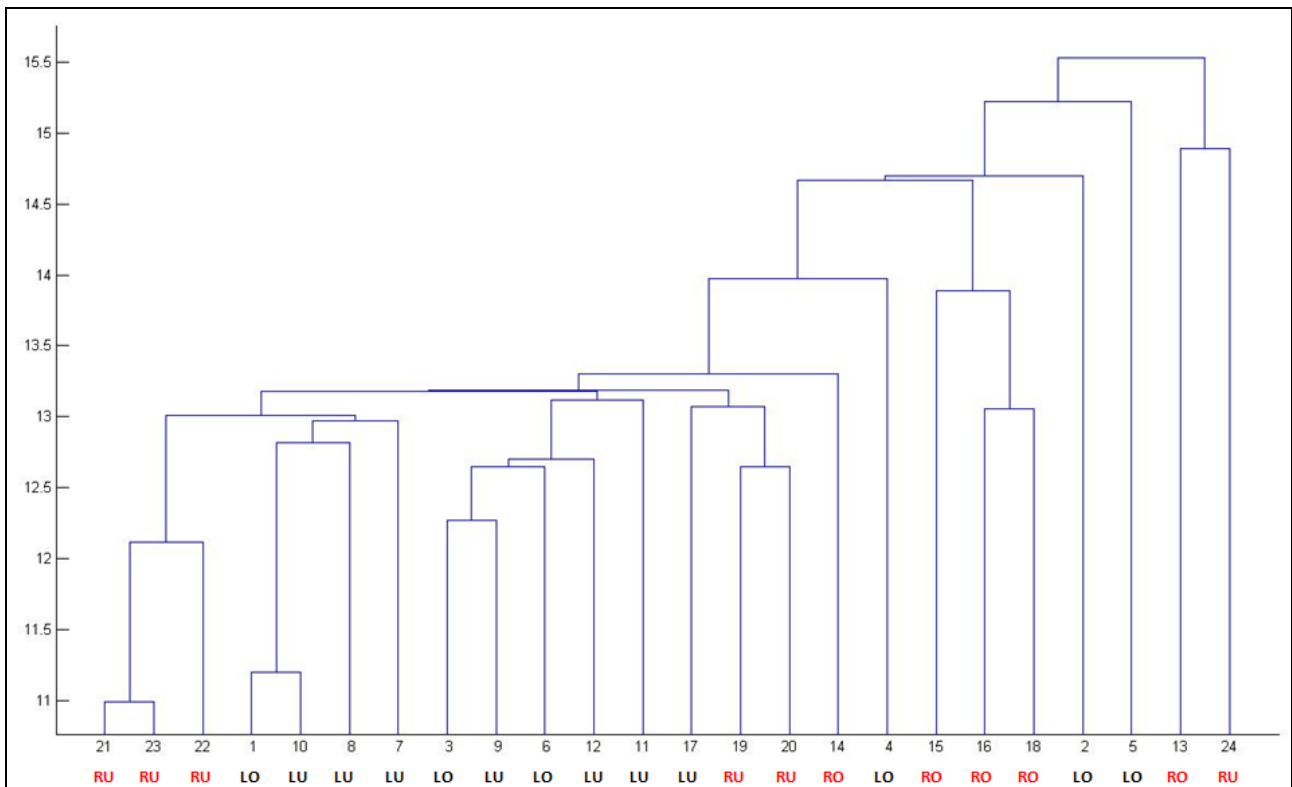


Abb. 53. Dendrogramm des Spielers CS anhand des Merkmals Winkel-Verlauf für das pBM LLS-STB (Baseline)

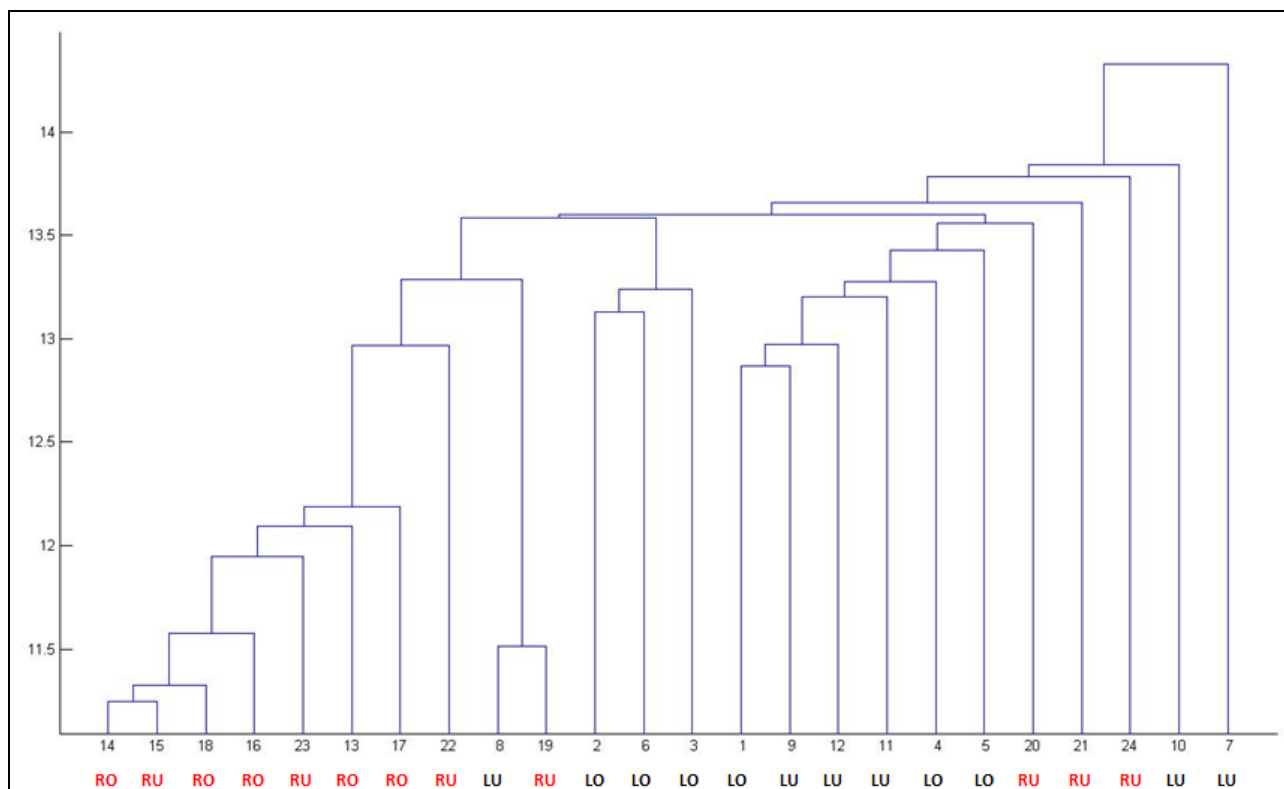


Abb. 54. Dendrogramm des Spielers CS anhand des Merkmals Winkel-Verlauf für das pBM STB-BK (Baseline)

### (b) Interpretation

Die Gruppenmittelwerte der Tabelle 22 zeigen über alle Phasen eine ähnliche Separierungsquote an. Für die Strafstöße auf die linke Seite des Tores schwankt der Mittelwert zwischen den Phasen weniger als 2%. Die Strafstöße mit Schussrichtung rechts weisen einen maximalen Unterschied von 7,5% zwischen den Phasen LLS-STB und STB-BK auf. Die intra-individuelle Betrachtung der Phasen ergibt für viele Spieler stärkere Veränderungen der richtungsspezifischen Trennungsquoten zwischen zwei Phasen (CS, DR, MM, MR1, MV, TS und UR). Beispielsweise werden die Schüsse nach rechts von CS in der ersten Phase LVS-LLS zu 58,3% gruppiert. In der Folgephase LLS-STB trennt die Clusteranalyse nur 25% der Schüsse in die rechte Ecke von Schüssen der Gegenseite ab. In der letzten Phase steigt die Separierungsquote wieder auf 75% an. Im Gegensatz dazu sind die Erkennungsraten bei Spieler MB phasenübergreifend auf ähnlichem Niveau. Für die Probanden MB, ML, MM, MR1, MR2, TS und UR trennt die Clusteranalyse für eine oder mehrere Phasen eine Schussrichtung zu 100% ab. Lediglich der Proband MB weist über alle drei Phasen eine klare Separierung der Schussrichtung links auf. Die Abbildungen 52, 53 und 54 verdeutlichen die Veränderungen bei Spieler CS anhand der Dendrogramme. In der Phase LVS-LLS ergeben sich aus dem Dendrogramm keine deutlichen Abgrenzungen zwischen den Schussrichtungen. Es bestehen keine größeren Cluster, welche nur eine Schussrichtung umfasst (Abbildung 52). Für die zweite Phase LLS-STB gibt die Clusteranalyse kleinere Distanzen zwischen den Bewegungsmustern der Strafstöße zurück. Es bilden sich auf den unteren Ebenen kleine richtungsspezifische Gruppierungen, deren Separierungsquote zwischen

25% und 41,6% liegen (Abbildung 53). Das Dendrogramm der Phase STB-BK bildet die klarste Struktur im Vergleich zu den vorherigen Phasen ab (Abbildung 54). Bereits auf einer höheren Ebene bestehen im Dendrogramm zwei große Cluster, die einen Hauptteil der Strafstöße enthalten. Das rechte große Cluster gruppiert bis auf einen Schuss nur Strafstöße für die linke Torseite (50%). Im linken großen Cluster erfolgt eine weitere Unterteilung in ein reines LO-Cluster sowie ein mehrheitliches Cluster mit Schussrichtung rechts. Die Distanzen zwischen den Strafstößen im linken großen Cluster sind kleiner als zwischen den Strafstößen des rechten Clusters.

### 5.2.3.1.2.2 Winkelgeschwindigkeit

#### (a) Darstellung

Tab. 23. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit bei pBM (Baseline)

Spieler	LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AM	66,6	16,6	91,6	33,3	6,4	58,3
AZ	50	18,2	83,3	27,3	16,6	36,4
CS	50	58,3	91,6	41,6	41,6	75
DH	58,3	25	16,6	66,6	33,3	25
DJ	41,6	25	91,6	8,3	33,3	8,3
DR	66,6	16,6	50	50	66,6	100
EH	41,6	8,3	58,3	16,6	58,3	16,6
MB	100	8,3	100	8,3	100	16,6
ML	83,3	25	50	16,6	66,6	58,3
MM	91,6	25	83,3	25	58,3	25
MR1	58,6	16,6	66,6	33,3	100	75
MR2	8,3	83,3	9,1	83,3	33,3	75
MV	25	63,6	58,3	18,2	75	27,3
NA	50	83,3	100	25	66,6	33,3
RP	16,6	100	16,6	66,6	16,6	91,6
RS	72,2	33,3	45,5	16,6	63,6	8,3
SE	75	16,6	41,6	16,6	33,3	25
SW	100	25	91,6	25	25	25
SZ	16,6	41,6	25	58,3	25	33,3
TS	63,6	58,3	58,3	25	25	33,3
UR	33,3	16,6	91,6	33,3	75	33,3
$\bar{x}$	<b>55,7</b>	<b>36,4</b>	<b>62,9</b>	<b>33,1</b>	<b>48,5</b>	<b>41,9</b>

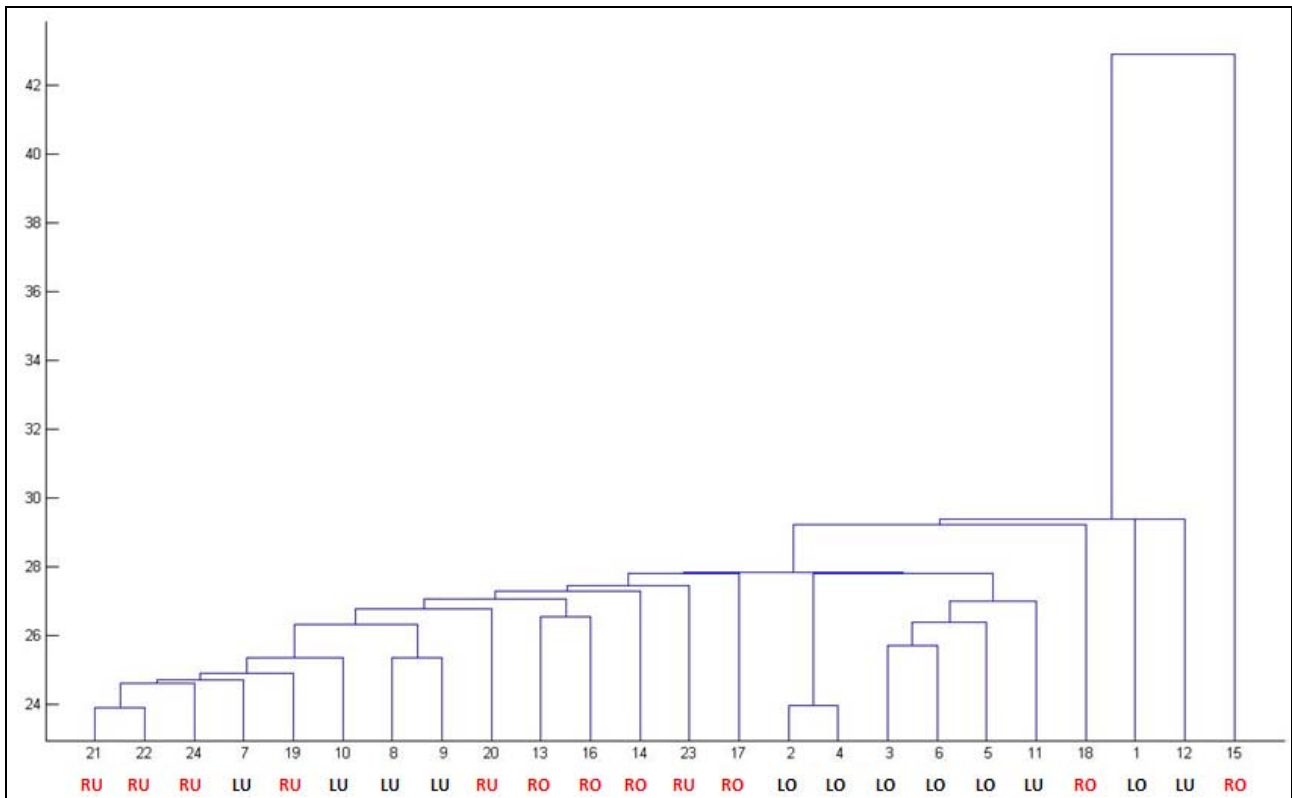


Abb. 55. Dendrogramm des Spielers NA anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit für das pBM LVS-LLS (Baseline)

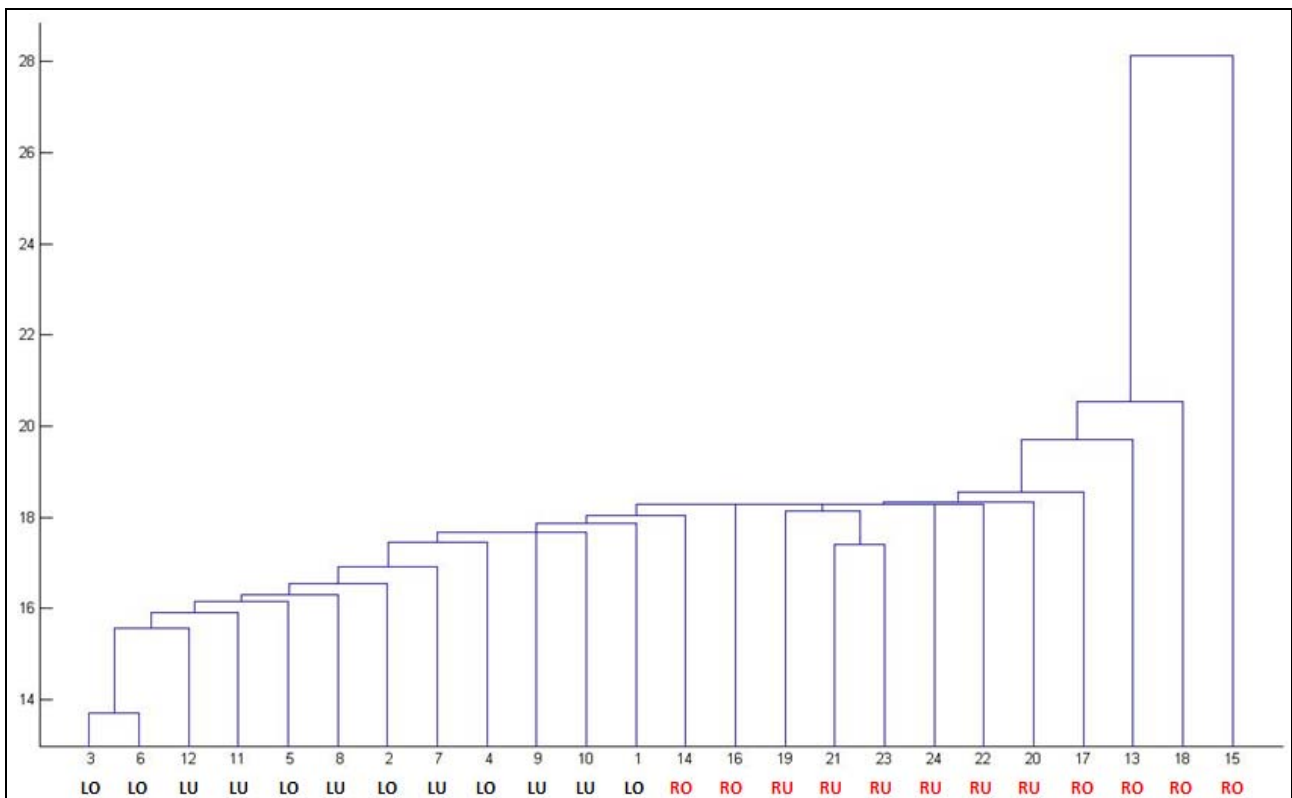


Abb. 56. Dendrogramm des Spielers NA anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit für das pBM LLS-STB (Baseline)



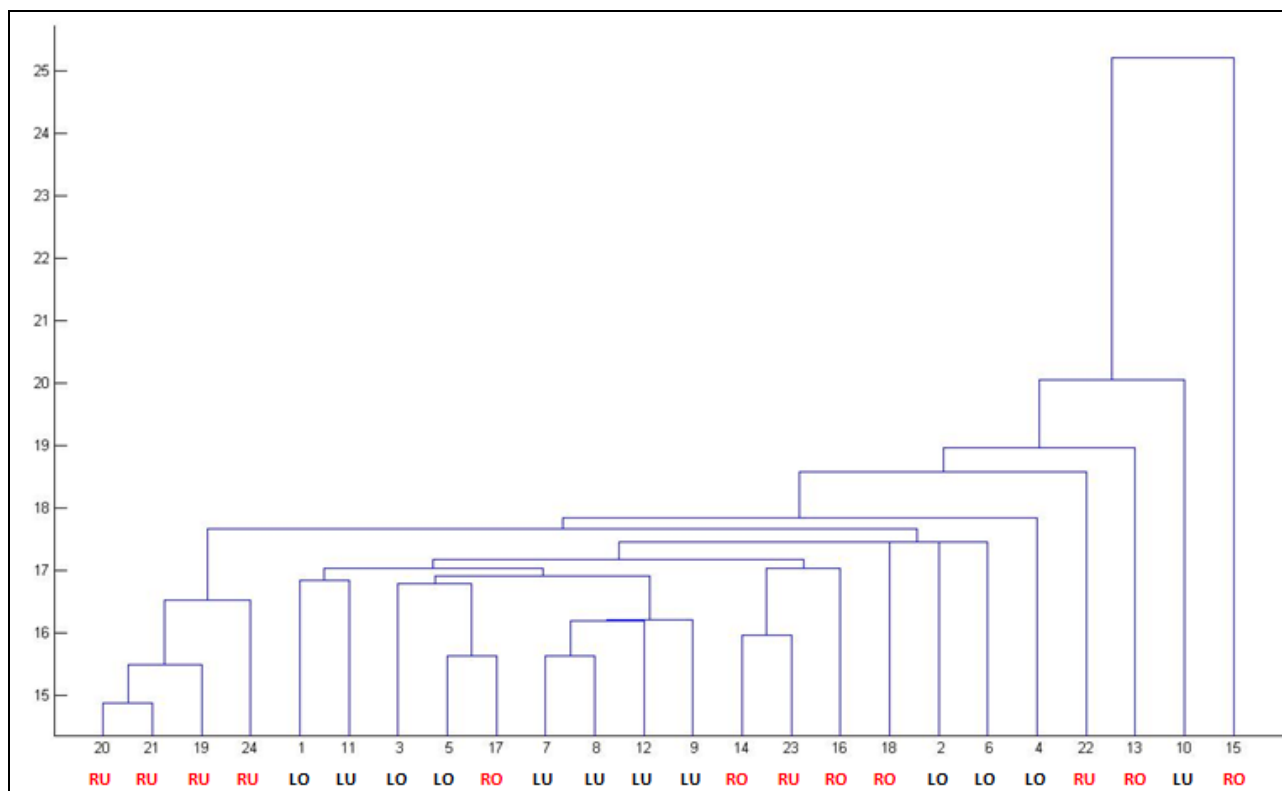


Abb. 57. Dendrogramm des Spielers NA anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit für das pBM STB-BK (Baseline)

#### (b) Interpretation

Die Separierungsquote für die Schussrichtung links erreicht ihr Maximum in der Phase LLS-STB (62,9%). Die Phase STB-BK weist für die Schussrichtung rechts die höchste Trennungsquote auf (41,9%). Über alle drei Phasen schwanken die Separationsraten durchschnittlich zwischen 3,3% und 13,6%. DR, MB, MR1, NA und RP weisen in den Dendrogrammen zumindest vereinzelt für eine Schussrichtung 100% Trennungsquote auf. Die Strafstöße des Probanden MB werden durch die Clusteranalyse auch anhand des Merkmals Winkelgeschwindigkeit in allen Phasen zu 100% getrennt. Die undeutlichste Trennung zeigen die Clusteranalysen beim Probanden SZ. Spieler NA erreicht im Durchschnitt die höchsten Trennungsquoten für die Schussrichtungen. In Abbildung 55 ist das Dendrogramm für die Phase LVS-LLS von Spieler NA aufgeführt. Es zeigt neben der Abtrennung eines Ausreißers zu Beginn die Separierung von drei Schüssen in Einzelcluster sowie zwei richtungsspezifische Gruppen. Einerseits trennt die Clusteranalyse Schüsse in die Zielfelder LO und LU ab (50%). Andererseits entsteht ein mehrheitliches Cluster für die Schussrichtungen RU und RO (83%). Das richtungsspezifische Cluster „links“ enthält fünf von sechs Schüssen in das Zielfeld LO. Die Bewegungsmuster der Schüsse in das Zielfeld LU sind den Strafstößen auf die rechten Zielzonen ähnlicher und fallen Großteils in das mehrheitliche Cluster. In der zweiten Phase LLS-STB werden nur 25% der Schüsse nach rechts abgegrenzt (Abbildung 56). Die Schüsse auf die Zielfelder der linken Seite werden alle am linken Rand des Dendrogramms eingruppiert und können zu 100% separiert werden. Die Unterschiede zwischen den Schussrichtungen sind gering. Zudem bilden die Strafstöße

auf die Zielfelder der linken Seite einen kettenförmigen Verlauf. Grundsätzlich sind die Distanzmaße in der zweiten Phase der Bewegung geringer als in der ersten Phase. Die Phase STB-BK weist niedrigere Separierungsquoten für die Schussrichtungen auf (Abbildung 57). Wiederum werden zu Beginn der Clusterbildung wenige Schüsse beider Schussrichtungen in Einzelcluster abgetrennt. Auf der linken Seite des Dendrogramms grenzen sich deutlicher vier Schüsse des Zielfelds RU ab. Alle übrigen Bewegungsmuster fallen in ein großes Cluster, welches eine große mehrheitliche Gruppe mit Schüssen auf die linke Ecke (66,6%) sowie einer kleinen Gruppe mit Schüssen nach rechts (25%) enthält. Eine Abgrenzung für Schusshöhen ist nicht zu erkennen. Im Vergleich zum Merkmal Winkel-Verlauf werden richtungsspezifische Unterschiede weniger deutlich separiert.

### 5.2.3.1.2.3 Verlauf von Gelenkmittelpunkten

#### (a) Darstellung

Tab. 24. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei pBM (Baseline)

Spieler	LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AM	83,3	50	50	50	81,8	75
AZ	75	66,6	41,6	83,3	100	91,6
CS	50	33,3	83,3	16,6	83,3	91,6
DH	50	33,3	25	58,3	66,6	41,6
DJ	25	58,3	50	25	50	33,3
DR	75	50	100	91,6	100	100
EH	50	33,3	33,3	100	90,9	100
MB	75	91,6	75	58,3	100	75
ML	75	66,6	50	66,6	41,6	75
MM	58,3	16,6	83,3	16,6	100	41,6
MR1	100	58,3	41,6	50	100	100
MR2	75	91,6	45,5	91,6	41,6	100
MV	91,6	83,3	100	83,3	91,6	100
NA	33,3	66,6	41,6	50	91,6	91,6
RP	91,6	100	100	100	66,6	83,3
RS	100	100	100	100	100	100
SE	25	75	66,6	100	66,6	100
SW	83,3	83,3	33,3	75	91,6	91,6
SZ	50	33,3	33,3	83,3	75	41,6
TS	91,6	83,3	91,6	25	91,6	100
UR	16,6	25	33,3	75	58,3	91,6
$\bar{x}$	<b>65,5</b>	<b>61,9</b>	<b>60,9</b>	<b>66,6</b>	<b>80,4</b>	<b>82,1</b>

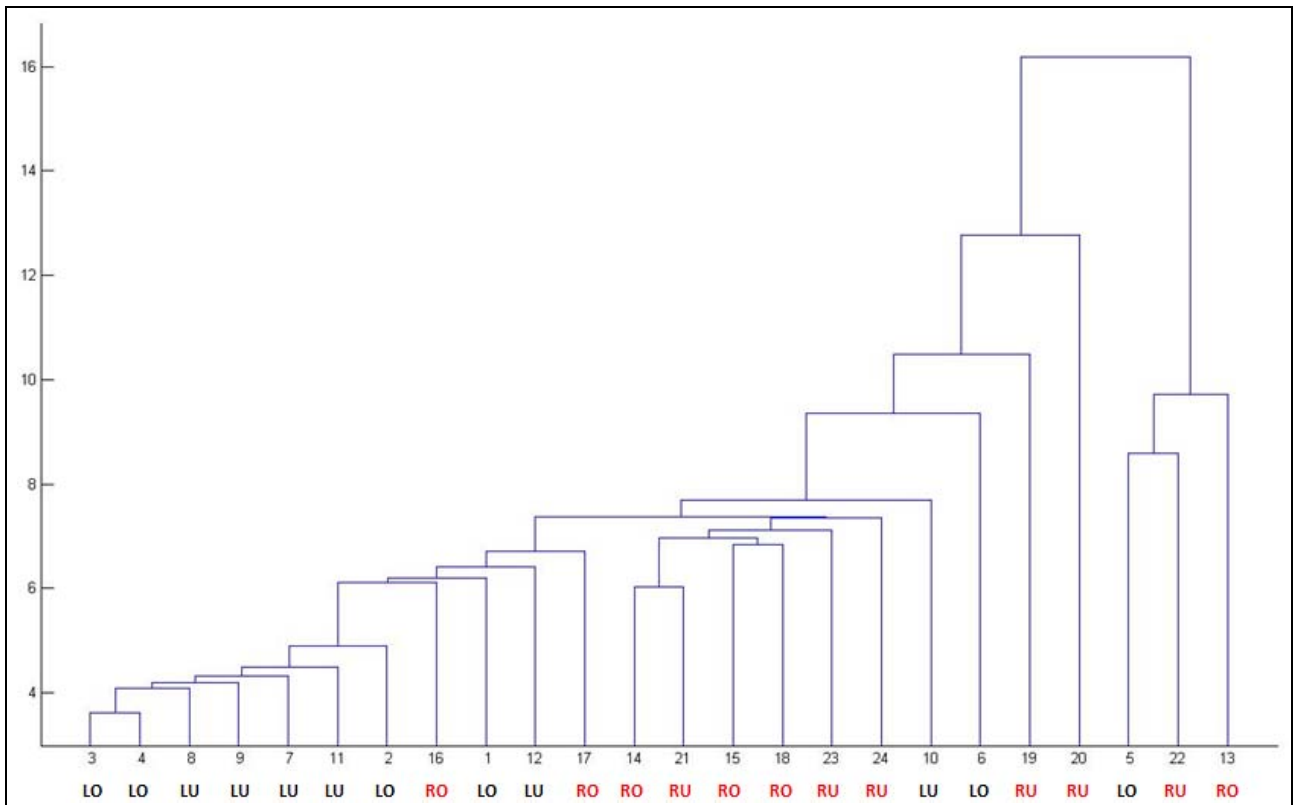


Abb. 58. Dendrogramm des Spielers DR anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das pBM LVS-LLS (Baseline)

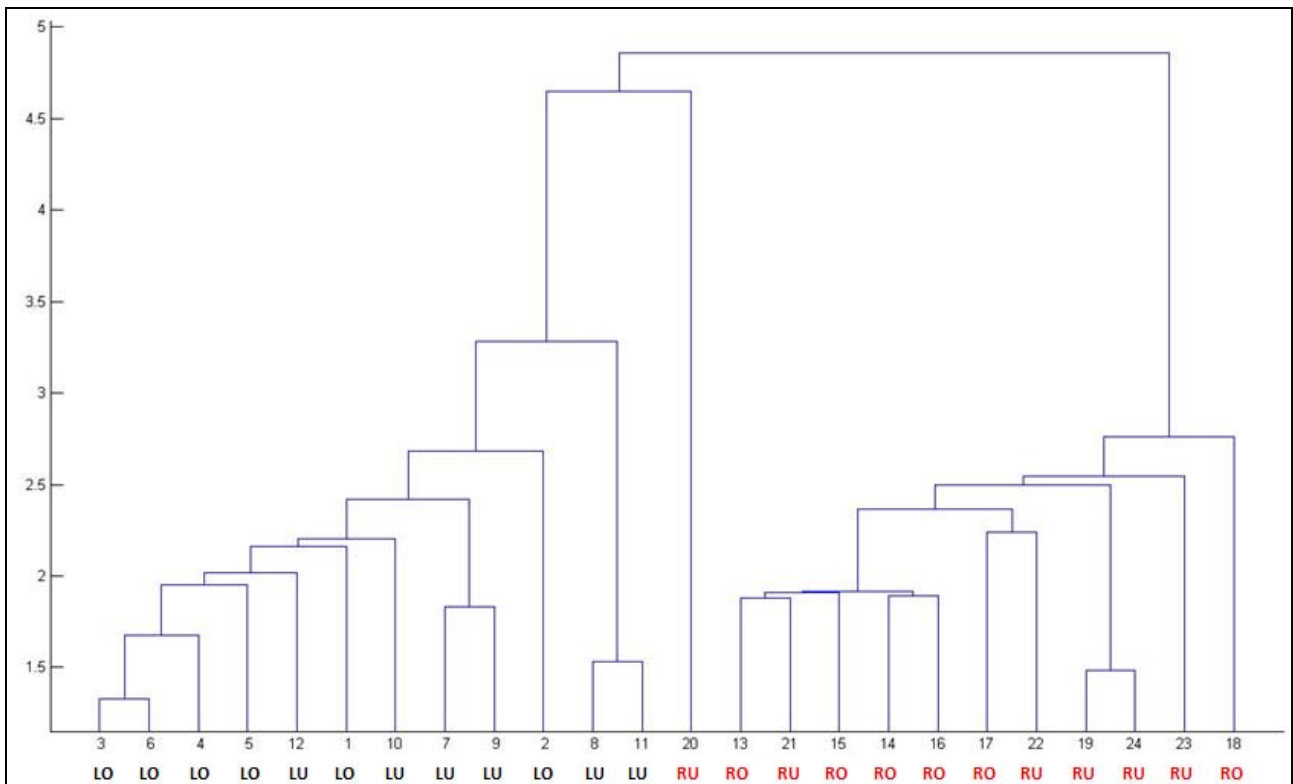


Abb. 59. Dendrogramm des Spielers DR anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das pBM LLS-STB (Baseline)

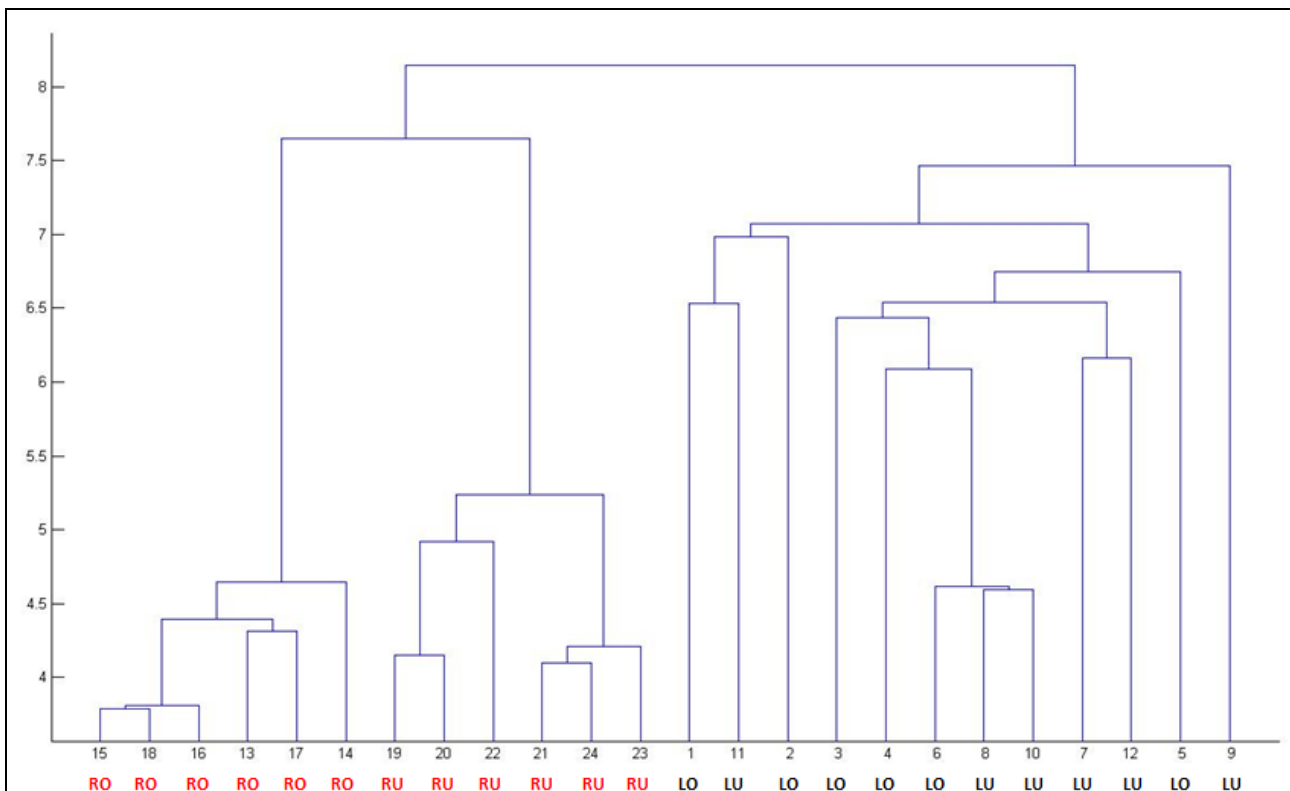


Abb. 60. Dendrogramm des Spielers DR anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das pBM STB-BK (Baseline)

### (b) Interpretation

Die Separierung der Schussrichtungen erfolgt anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für alle Phasen durchschnittlich zu etwa 70%. Die Abgrenzung der Strafstöße für eine Schussrichtung nimmt von der Phase LVS-LLS (63,7%) zur Phase STB-BK (81,3%) deutlich zu. Dabei bleibt die durchschnittliche Erkennungsrate für die Phase LLS-STB (63,8%) auf dem Niveau der Phase LVS-LLS. Die richtungsspezifische Erkennung in den drei Bewegungsphasen schwankt bei den Probanden zwischen 16% und 100%. Sehr deutliche Trennungen in Bezug auf die Schussrichtung zeigen die Clusteranalysen der Spieler DR, MV, RP, RS und TS. Zu bemerken ist, dass die optimale Separierung aller Strafstöße des Probanden RS aufgrund einer Veränderung des Anlaufwinkels verursacht wird. Ebenso variierte der Spieler MV sein Anlaufverhalten. Die niedrigsten Trennungsquoten liegen für die Probanden DH, DJ, SZ und UR vor. Ohne Berücksichtigung der Probanden MV und RS ergeben sich für die Phasen LVS-LLS (links: 62,3%; rechts: 58,7%), LLS-STB (links: 56,8%; rechts: 64%) und STB-BK (links: 78,8%; rechts: 80,2%) dennoch hohe Erkennungsraten. Die Unterschiede zwischen den in der Tabelle 24 aufgeführten Erkennungsraten und den berechneten Separierungsquoten unter Ausschluss der beiden Probanden nehmen zur letzten Phase hin ab und belaufen sich maximal auf 4%. Somit werden die Spieler MV und RS für die weiteren Betrachtungen nicht ausgeschlossen.

Beispielhaft werden im Folgenden für den Probanden DR die Phasenanalysen näher beschrieben. Abbildung 58 zeigt das Dendrogramm für die Phase LVS-LLS. Auf der ersten Ebene werden durch die Clusteranalyse drei Schüsse deutlich von den

restlichen Strafstößen abgrenzt. Die kleine Gruppe enthält einen Schuss jeweils für die Zielfelder LO, RU und RO und bildet kein richtungsspezifisches Cluster. Diese Abgrenzung zeigt auf, dass Proband DR mit ähnlichen Bewegungsmustern drei unterschiedliche Zielfelder ansteuern kann. Im großen Cluster sind auf den nächsten Ebenen wenige Einzelcluster zu sehen. Abschließend teilt die Clusteranalyse die verbleibenden Bewegungsmuster in ein reines Cluster, welches ausschließlich Schüsse in die rechte Ecke enthält, und ein mehrheitliches Cluster, das zwei Schüsse in das Zielfeld RO sowie neun Schüsse in die linken Zielfelder beinhaltet. Bis auf zwei Schüsse in die Zielfelder LU und LO zeigen die übrigen Schüsse nach links eine geringe Distanz zueinander und grenzen sich deutlicher von den weiteren Schüssen dieser Gruppe ab. Eine Gruppierung nach Schusshöhen ist im Dendrogramm nicht vorzufinden. Für die zweite Phase LLS-STB zeigt sich von der ersten Ebene eine klare Trennung der Schussrichtungen über die Bildung zweier Cluster (Abbildung 59). Bis auf einen Schuss in das Zielfeld RU bilden alle Schüsse auf die rechte Seite eine Gruppe (91,6%). Innerhalb beider Cluster können keine klaren Separierungen nach Schusshöhen erkannt werden. Die Phase STB-BK trennt wiederum auf der ersten Ebene die Strafstöße LU und LO von den Strafstößen RU und RO (Abbildung 60). Die Clusteranalyse bildet jeweils zu 100% richtungsspezifische Gruppen. Auf der zweiten Ebene erfolgt im Cluster mit den Zielfeldern der rechten Torecke eine optimale Trennung der Strafstöße nach Schusshöhe. DR verwendet zwei klar separierbare Bewegungsmuster bei der Ausführung der Strafstöße in die Zielfelder RU und RO. Im Vergleich weist das Cluster für die Zielfelder der linken Torhälfte keine Trennung der Schusshöhen auf. Die Distanzen zwischen den Schüssen sind größer und deuten auf ein instabileres Bewegungsmuster hin.

#### 5.2.3.1.2.4 Schlussfolgerung

Die Separierungsraten für die Beschreibungsgrößen Winkel-Verlauf und Winkelgeschwindigkeit sind für die Schussrichtung links durchgängig deutlich höher. Ausgenommen ist hier die Phase STB-BK für das Merkmal Winkelgeschwindigkeit, bei der nur eine kleine Differenz besteht. Im Vergleich zu den winkelbezogenen Merkmalen führen die Clusteranalysen für den Verlauf der Gelenkmittelpunkte in der Höhe zu ausgeglichenen Erkennungsraten innerhalb einer Phase.

Für die drei eingesetzten Merkmale ergeben sich über die Phasen der Bewegung unterschiedliche Tendenzen in der Entwicklung der Erkennungsraten (Abbildung 61). Die Trennungsraten für das Merkmal Winkel-Verlauf bleiben über die beiden Phasen LVS-LLS und LLS-STB auf ähnlichem Niveau (~48,5%), um abschließend leicht anzusteigen (53,4%). Die Clusteranalysen für das Merkmal Winkelgeschwindigkeit führen bereits in der zweiten Anlaufphase zu einem Maximum (48,0%), wobei die Separierungsquoten in den Phasen LVS-LLS (46,0%) und STB-BK (45,2%) nur geringfügig unterhalb des Maximums liegen. Am deutlichsten verändern sich die Erkennungsraten für die Beschreibungsgröße Gelenkmittelpunktverlauf. In der Höhe ist die Trennungsraten in den Phasen LVS-LLS (63,7%) und LLS-STB (63,8%) gleich und steigert sich erheblich in der Phase STB-BK (81,3%). Somit zeichnet sich über den Phasenmittelwert das Merkmal Gelenkmittelpunktverlauf als die Be-

schreibungsgröße heraus, welche die Bewegungsmuster richtungsspezifisch gleichmäßig und am deutlichsten klassifizieren kann. Den Wahrnehmungsstudien zur Folge, welche die richtungsspezifische Erkennung von Strafstößen über zeitliche Okklusionstechniken überprüften, zeigt sich ebenso eine Steigerung der Erkennungsrate zum Ballkontakt hin (vgl. McMorris & Colenso, 1996; Williams & Burwitz, 1995). Aufgrund der deutlichen Unterschiede werden im Folgenden die weiteren Analysen nur über dieses Merkmal vorgenommen.

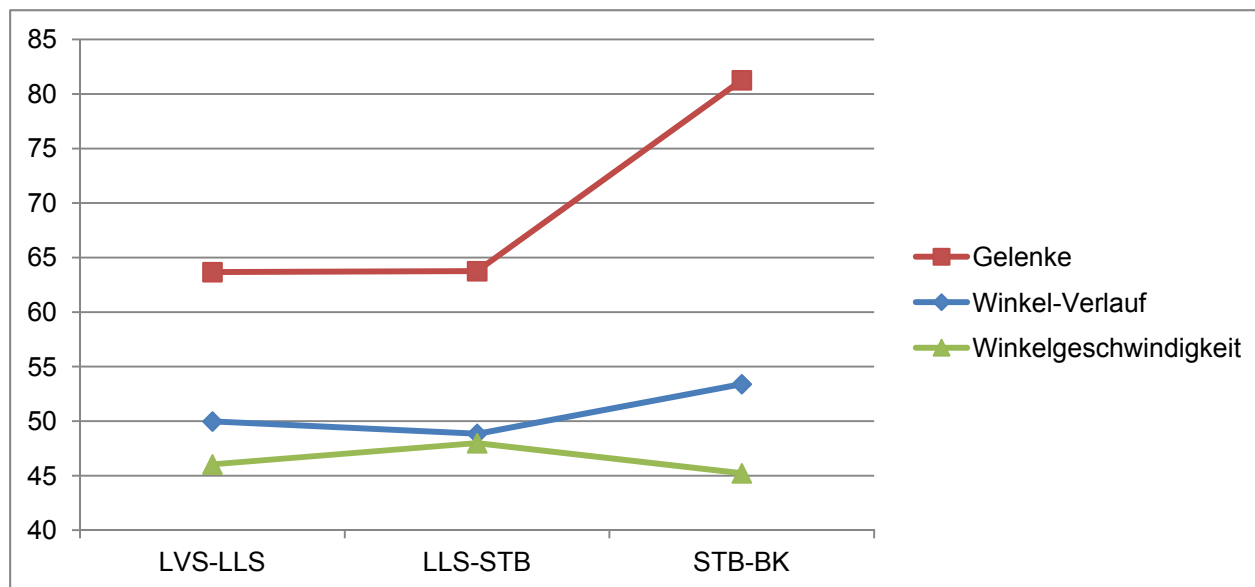


Abb. 61. Entwicklung der Separierungsraten für die Merkmale anhand der Phasenmittelwerte

Bei Betrachtung individueller Tendenzen über die Phasen und zwischen den Beschreibungsgößen, sind keine einheitlichen Entwicklungen zu erkennen. Spieler zeigen in der mittleren Phase entweder eine starke Steigerung oder Abnahme der Erkennungsrate im Vergleich zur ersten und letzten Phase des Anlaufs. Demgegenüber entwickeln sich bei anderen Spielern die Trennungsraten mehr linear ab- oder aufsteigend. Es besteht keine Übereinstimmung der individuellen Verläufe zwischen den drei Merkmalen. Aus praktischer Sicht könnte der Torwart bei Spielern, die vor dem Standbeinaufsatz ihre höchste Erkennungsrate erreichen, frühzeitig die Schussrichtung antizipieren.

#### 5.2.3.1.3 Intra-individueller Vergleich mittels phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Kapitel 2.2 zeigen zur Antizipation der Schussrichtung viele dienliche Hinweisreize auf. Für das Schussbein sind die Ausrichtung des Knies bzw. die Drehung des Beines (80,7%), die Stellung des Fußes beim Ballkontakt (84,9%) sowie die Neigung des Beines in der Frontalebene (76,1%) bestimmt worden (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997). Das Standbein zeigt richtungsspezifische Hinweise über die Ausrichtung des Fußes (80%) neben dem Ball (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997). Das Bewegungsmerkmal Hüfte tritt gegen Ende der Anlaufphase im Übergang zur Schussbewegung auf und erzielt bis zum Ballkontakt 83,3% Reliabilität in der Antizipation

von Schussrichtungen (vgl. vgl. Diaz et al., 2012; Williams & Burwitz, 1995). Keller et al. (1979) stellen die Arme als weiteren richtungsspezifischen Hinweis heraus, der sich während der letzten Aufsetzbewegung entgegengesetzt zur Schussrichtung präsentiert.

An dieser Stelle werden die genannten Hinweise über die Segmente Schussbein, Standbein, Hüfte und Arme zeitkontinuierlich betrachtet und ihre Güte als Separierungsmerkmal geprüft. Die zeitliche Länge für die Merkmale Schussbein, Hüfte und Arme wird vom Knotenpunkt LLS bis BK definiert, weil in diesem Bewegungsabschnitt die Hinweise wahrgenommen werden können. Für das Merkmal Standbein wird die letzte Phase STB-BK festgelegt, da ab dem Zeitpunkt des Standbeinaufsatzes der Hinweisreiz erst sichtbar ist. Die phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster „Schussbein“ und „Standbein“ setzen sich aus Hüft-, Knie- und Sprunggelenk zusammen. Das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster „Hüfte“ enthält die Verläufe der Hüftgelenke. Für das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster „Arme“ werden Schulter-, Ellbogen- und Handgelenk beider Arme berücksichtigt.

#### (a) Darstellung

Tab. 25. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse vier richtungsspezifischer Hinweisreize anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei psBM (Baseline)

Spieler	Arme		Hüfte		Schussbein		Standbein	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AM	91,6	50	100	66,6	100	66,6	54,5	66,6
AZ	83,3	75	66,6	83,3	58,3	91,6	100	91,6
CS	83,3	83,3	91,6	83,3	91,6	91,6	100	91,6
DH	50	25	41,6	33,3	33,3	41,6	8,3	41,6
DJ	16,6	66,6	75	100	66,6	100	75	50
DR	83,3	91,6	75	100	83,3	100	91,6	50
EH	75	41,6	33,3	33,3	58,3	41,6	45,4	66,6
MB	100	91,6	75	91,6	100	91,6	91,6	50
ML	83,3	41,6	58,3	100	100	83,3	58,3	100
MM	100	91,6	91,6	41,6	91,6	75	83,3	100
MR1	91,6	100	50	100	75	100	100	91,6
MR2	50	91,6	41,6	91,6	50	75	50	66,6
MV	83,3	91,6	100	91,6	100	91,6	100	100
NA	50	33,3	83,3	75	100	66,6	91,6	91,6
RP	66,6	66,6	100	83,3	83,3	75	100	91,6
RS	100	100	100	100	100	100	100	100
SE	33,3	100	58,3	91,6	66,6	100	91,6	100
SW	91,6	100	100	100	100	83,3	100	91,6
SZ	41,6	25	83,3	91,6	33,3	100	83,3	58,3
TS	58,3	66,6	100	91,6	83,3	41,6	100	91,6
UR	100	75	33,3	58,3	58,3	83,3	41,6	75
$\bar{x}$	<b>73,0</b>	<b>71,8</b>	<b>74,2</b>	<b>81,3</b>	<b>77,8</b>	<b>80,9</b>	<b>79,3</b>	<b>79,3</b>

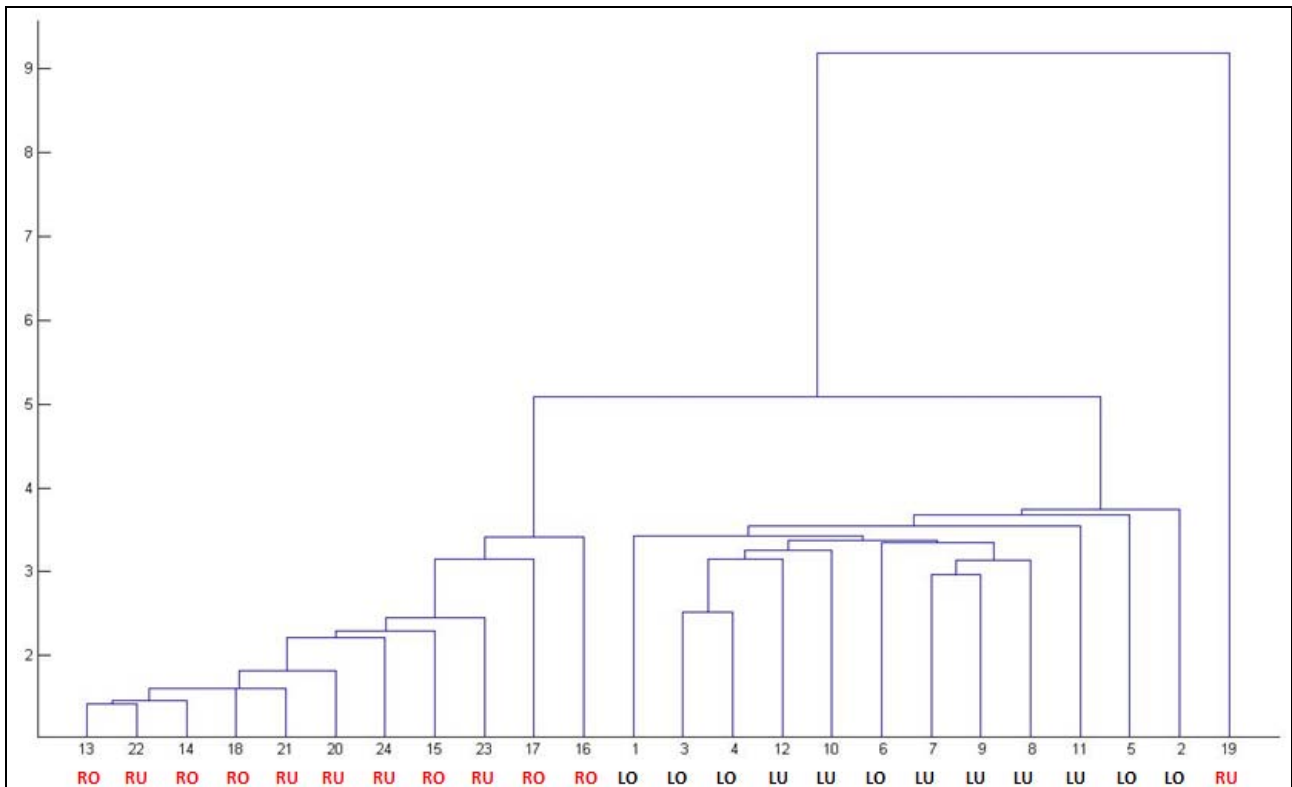


Abb. 62. Dendrogramm des Spielers SW anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das psBM Standbein (Baseline)

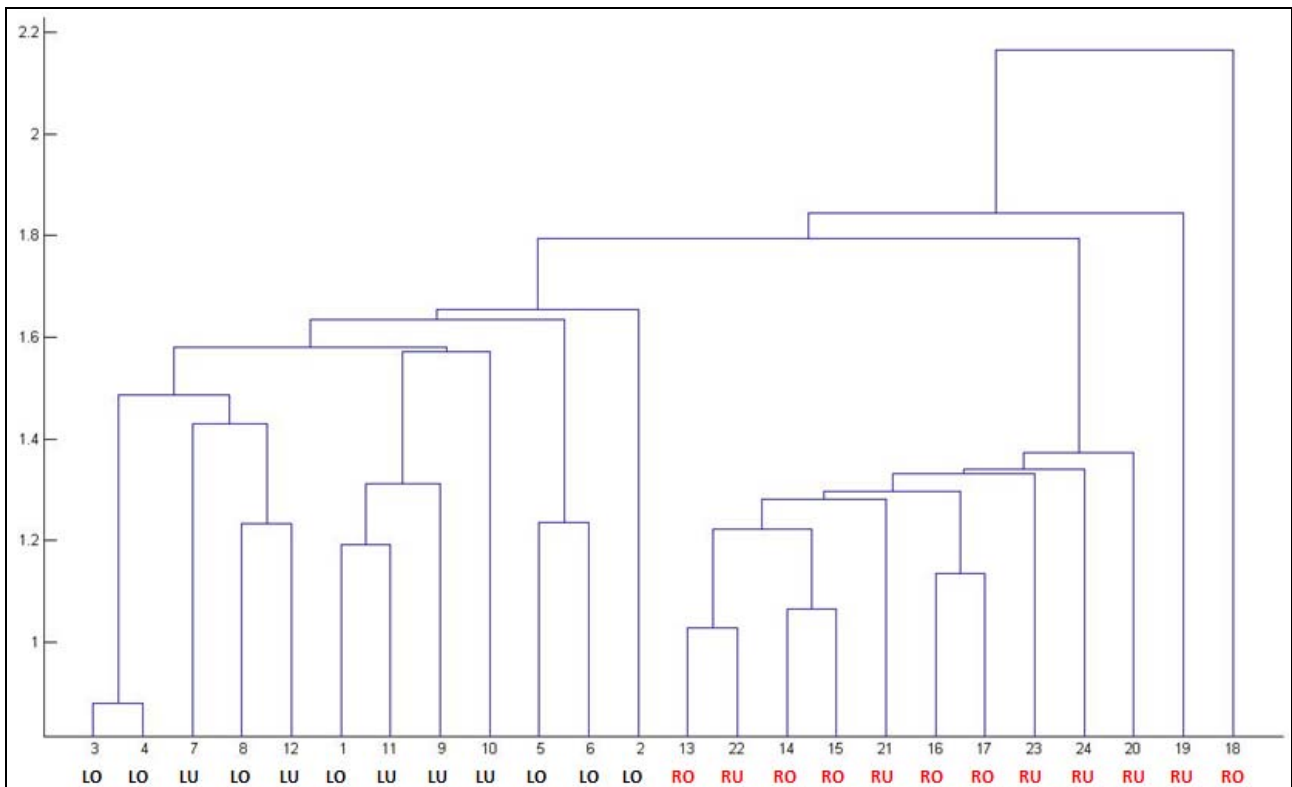


Abb. 63. Dendrogramm des Spielers SW anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für das psBM Schussbein (Baseline)



### (b) Interpretation

Im Vergleich der vier Hinweisreize trennen die Bewegungsmuster für das Schuss- und Standbein die Schussrichtungen am deutlichsten. Das Merkmal Hüfte erzielt für die Schüsse auf die rechte Seite die höchste Erkennungsrate über alle Hinweisreize (81,3%), fällt aber mit einer Separierungsquote von 74,2% für die Schussrichtung links ab. Ein gutes Ergebnis liefert auch die Erkennung der Schussrichtung für die Stellung der Arme. Im Vergleich zu den anderen Hinweisreizen ergibt dieses Merkmal die geringsten Trennungsraten. Die Stellung der Arme separiert jeweils vier Mal eine Schussrichtung zu 100%. Die deutlichste Trennung weisen die Probanden DR, MB, MM, MR1, MV, RS und SW zwischen 83,3% und 100% auf. Die niedrigsten Erkennungsraten zeigt SZ mit 41,6% (links) und 25% (rechts). Die Hüftstellung als Trennungsmerkmal zwischen Schüssen in die linken und rechten Zielfelder ergibt zwölf Mal die höchste Separierungsrate von 100%. Neben den Spielern RS und SW, die für beide Schussrichtungen 100% Erkennungsrate vorweisen können, zeigen die Probanden CS, MV, RP, SZ und TS sehr hohe Separierungsquoten. Die Zuteilungsraten über alle Probanden schwanken von 100% bis 33,3%. Die undeutlichste Trennung beider Schussrichtungen anhand von Ortskoordinaten der Hüftgelenke zeigt Spieler DH.

Die beiden Beinsegmente separieren jeweils 13 Mal eine Schussrichtung zu 100%. Eine sehr deutliche Trennung ergibt die Clusteranalyse für die Spieler RS (Schuss- und Standbein) sowie MV (Standbein). Im Vergleich der beiden Merkmale weisen für das Schussbein 7 Spieler und für das Standbein 11 Spieler eine Erkennungsrate zwischen 83,3% und 100% auf. Eine undeutliche Separierung durch die Clusteranalyse für beide Beinsegmente ist jeweils bei dem Probanden DH aufzufinden. Für das Schussbein zeigt das Dendrogramm eine Zuteilung von 33,3% (links) und 41,6% (rechts). Das Standbein separiert die Bewegungsmuster zu 8,3% (links) und 41,6% (rechts).

Durchgängig über alle vier Merkmale konnten die Bewegungsmuster deutlich für die Probanden MV, RS und SW getrennt werden. Exemplarisch werden die Dendrogramme von SW für das Merkmal Standbein und Schussbein präsentiert. Abbildung 62 zeigt das Ergebnis der Clusteranalyse für das Merkmal Standbein. Im ersten Schritt wird der Versuch 19 in das Zielfeld RU von der Gruppe separiert. Auf der nächsten Ebene trennt die Clusteranalyse die Schussrichtungen in ein Cluster „links“ und „rechts“. Die Distanzen innerhalb der Cluster sind für die Schussrichtung rechts niedriger. Eine weitere Unterteilung der Schüsse nach ihrer Höhe ist nicht zu erkennen. Bei der Clusteranalyse anhand des Merkmals Schussbein wird neben dem Schuss Nummer 19 die Nummer 18 auf der ersten Separierungsebene ausgruppiert (Abbildung 63). Daraufhin erfolgt das Clustern nach den Schussrichtungen. Auch anhand des Schussbeines ist keine Differenzierung der Schusshöhe für Schüsse auf die linken und rechten Zielfelder möglich. Im Vergleich zum Merkmal Standbein zeigt das Schussbein geringere Distanzmaße an. Diese Charakteristik ist bei Gegenüberstellung der Distanzen in den Dendrogrammen aller Probanden für Schuss- und Standbein die Regel.

Entsprechend der Erkenntnisse aus den eingangs aufgeführten Studien (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997; Keller et al., 1979; Williams & Burwitz, 1995), konnten über die erstellten phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster alle Bewegungshinweise für den Antizipationsprozess als bedeutsam eingestuft werden. Aufgrund der Separierungsraten für die vier Merkmale stellen das Stand- und Schussbein die deutlichste Trennung der Schussrichtung dar. Die Wahl für das Standbein als entscheidender Hinweisreiz – auch in Bezug auf folgende Analysen – begründet sich aus dem frühen Zeitpunkt (etwa 250ms) und der hohen Zuverlässigkeit, die in den Studien festgestellt wurde (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997). Die Analyse von Bewegungsmustern über Schuss- und Standbein zeigt zudem, dass die Dendrogramme beim Standbein größere räumliche Distanzen für die Schussrichtungen im Vergleich zum Schussbein aufführen und dies aus praktischer Sicht für den Torwart entscheidend ist, um mögliche Hinweise über die Schussrichtung wahrzunehmen.

### 5.2.3.2 Bedingung Keeper-independent

#### 5.2.3.2.1 Intra-individueller Vergleich ganzheitlicher Bewegungsmuster

##### (a) Darstellung

Tab. 26. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Keeper-independent)

Spieler	Schussrichtung links	Schussrichtung rechts
AZ	50	50
CS	75	25
DH	83,3	25
MM	78,6	20
MV	50	30
NA	66,6	16,6
SE	16,6	25
UR	83,3	41,6
$\bar{x}$	<b>62,9</b>	<b>29,2</b>

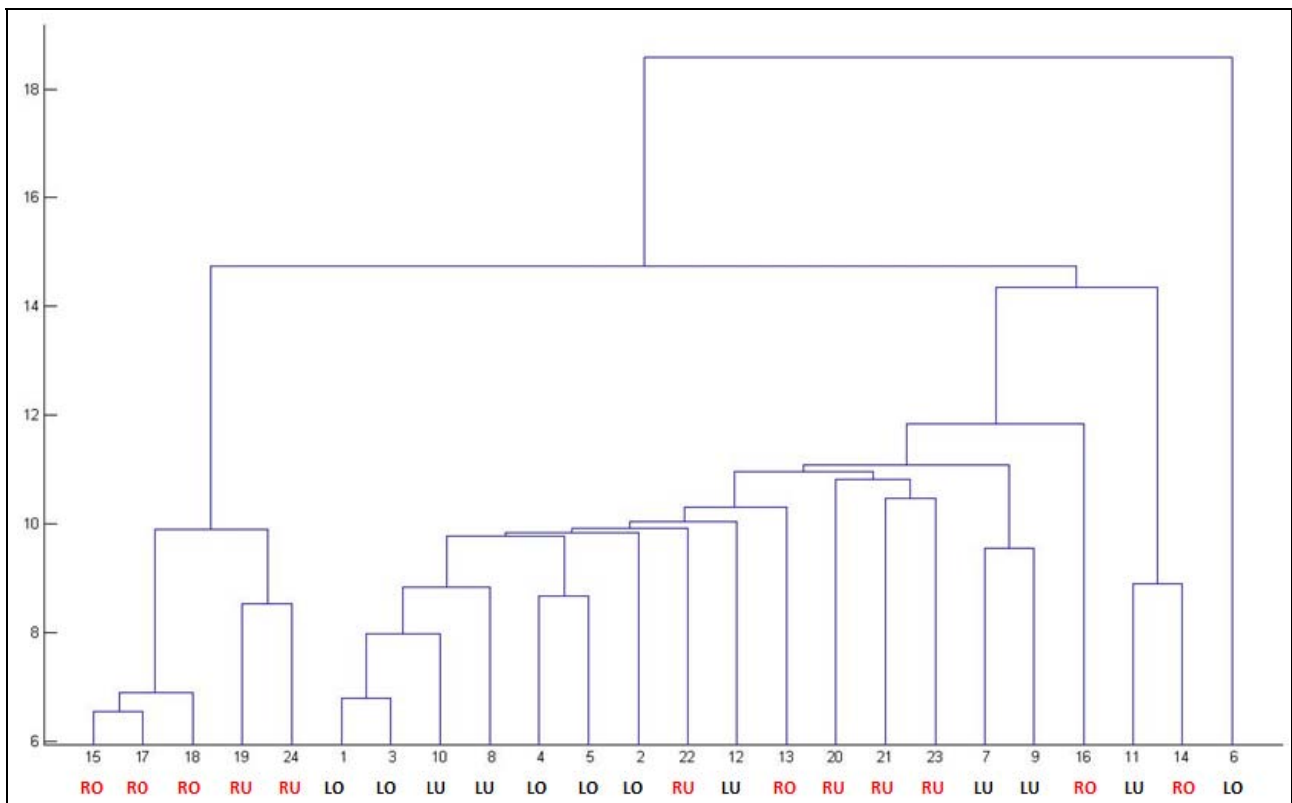


Abb. 64. Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-independent)

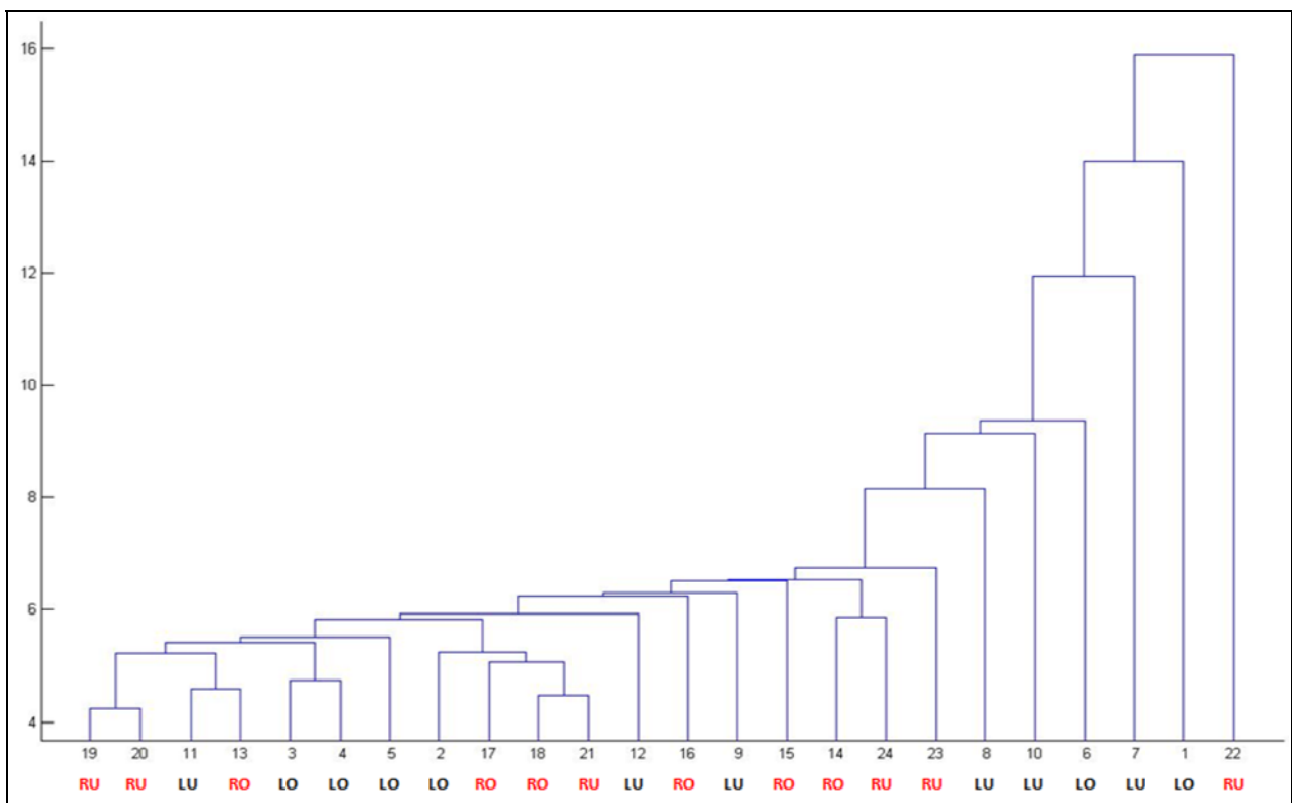


Abb. 65. Dendrogramm des Spielers SE anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-independent)

### (b) Interpretation

Die Clusteranalyse der ganzheitlichen Bewegungsmuster für das Merkmal Gelenkmittelpunktverlauf zeigt für acht Probanden eine Separierung der Schussrichtungen von 62,9% (links) und 29,2% (rechts). Es besteht für keinen Probanden eine deutliche Trennung zwischen den Schussrichtungen mit hohen Erkennungsraten. Die klarste Gruppierung nach Schussrichtungen zeigt die Clusteranalyse für Spieler UR (Abbildung 64). Im Dendrogramm werden zehn Strafstöße (83,3%) auf die linke Seite abgegrenzt sowie fünf Strafstöße (41,6%) für die rechte Seite. Das kleine Cluster „rechts“ stellt ein reines richtungsspezifisches Cluster dar, in dem die Schussrichtungen RU und RO separate Subcluster bilden. In einer großen Gruppe, in der die meisten Schüsse auf die linken Zielfelder fallen, sind auch Strafstöße einsortiert, deren Trefferbereiche den Zonen RU und RO entsprechen. Sieben Strafstöße auf die linken Zielfelder bilden innerhalb des großen Clusters eine zusammenhängende Gruppe. Zwei Schüsse in das Zielfeld LU werden in ein eigenes Cluster gruppiert und grenzen sich von den übrigen Strafstößen in die gleiche Richtung ab. Der Schuss Nummer 11 wird für das mehrheitliche Cluster nicht berücksichtigt, da der Zuwachs der Distanz zu den anderen Schüssen auf die linke Torseite zu groß ist. Innerhalb dieses großen Clusters zeigt sich für die Schussrichtung RU ein abgetrenntes Subcluster mit drei Versuchen. Das Dendrogramm führt somit zwei trennbare Bewegungsmuster auf. Ein Bewegungsmuster schießt nur auf die rechten Zielfelder im Tor, mit dem anderen Bewegungsmuster können alle Zielfelder angesteuert werden.

Eine sehr undeutliche Trennung für die Schussrichtungen ist im Dendrogramm von Spieler SE zu sehen (Abbildung 65). Die Erkennung der Bewegungsmuster für die Zielfelder auf der linken Seite des Tores ist durch die Clusteranalyse zu 16,6% möglich. Die Separierungsrate für die Strafstöße auf die rechte Seite liegt mit 25% leicht höher. Im Dendrogramm verteilt sind mehrere Gruppen mit zwei oder drei Schüssen der gleichen Schussrichtung. Ein deutlich abgegrenztes und größeres Cluster ist nicht enthalten. Am rechten Rand des Dendrogramms spalten sich mehrere Einzelcluster, hauptsächlich Strafstöße in die Zielfelder LU und LO, deutlicher ab.

5.2.3.2.2 Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster

(a) Darstellung

Tab. 27. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM (Keeper-independent)

Spieler	LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AZ	50	40	21,4	50	28,6	30
CS	91,6	25	83,3	33,3	33,3	41,6
DH	50	25	66,6	41,6	25	100
MM	57,1	40	78,6	70	71,5	50
MV	92,6	50	57,1	20	50	30
NA	41,6	50	66,6	16,6	50	41,6
SE	25	91,6	58,3	41,6	25	50
UR	58,3	50	75	50	100	83,3
$\bar{x}$	<b>58,3</b>	<b>46,5</b>	<b>63,4</b>	<b>40,4</b>	<b>47,9</b>	<b>53,3</b>

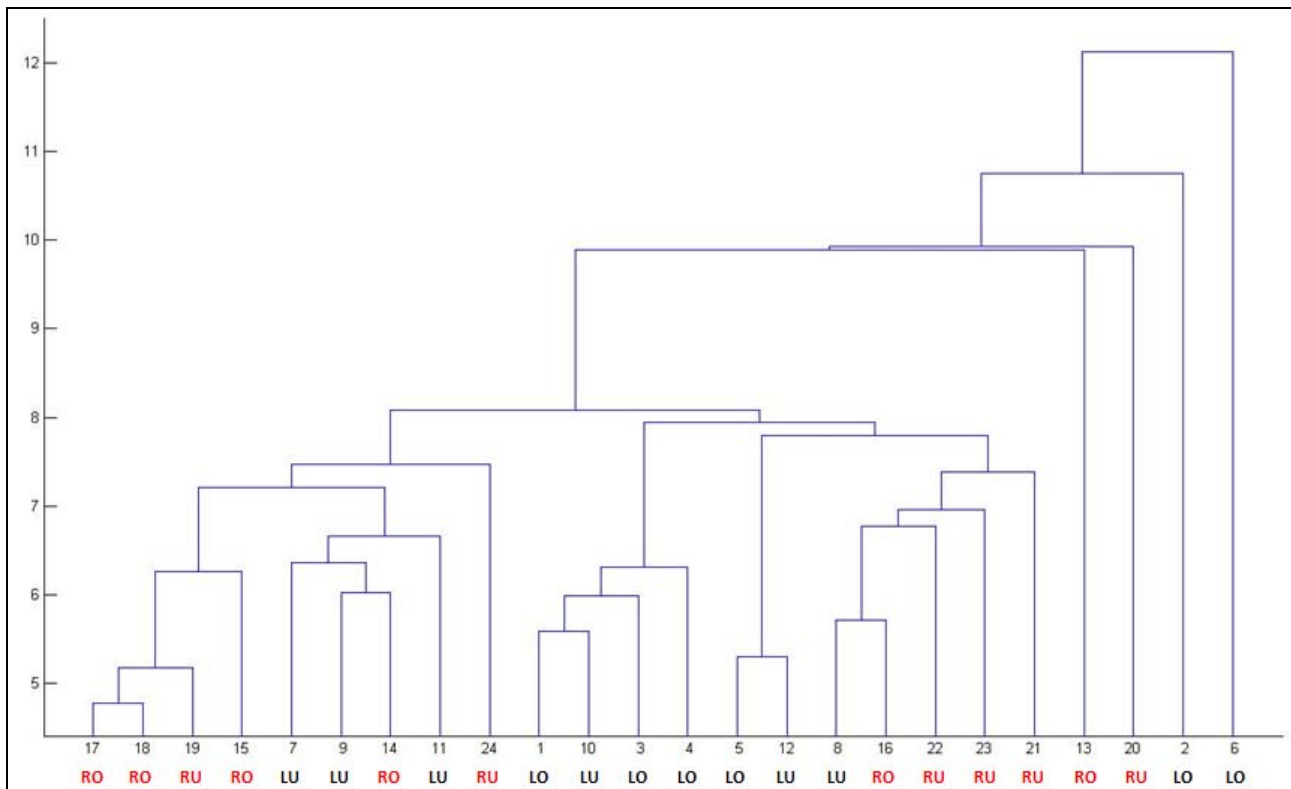


Abb. 66. Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LVS-LLS (Keeper-independent)

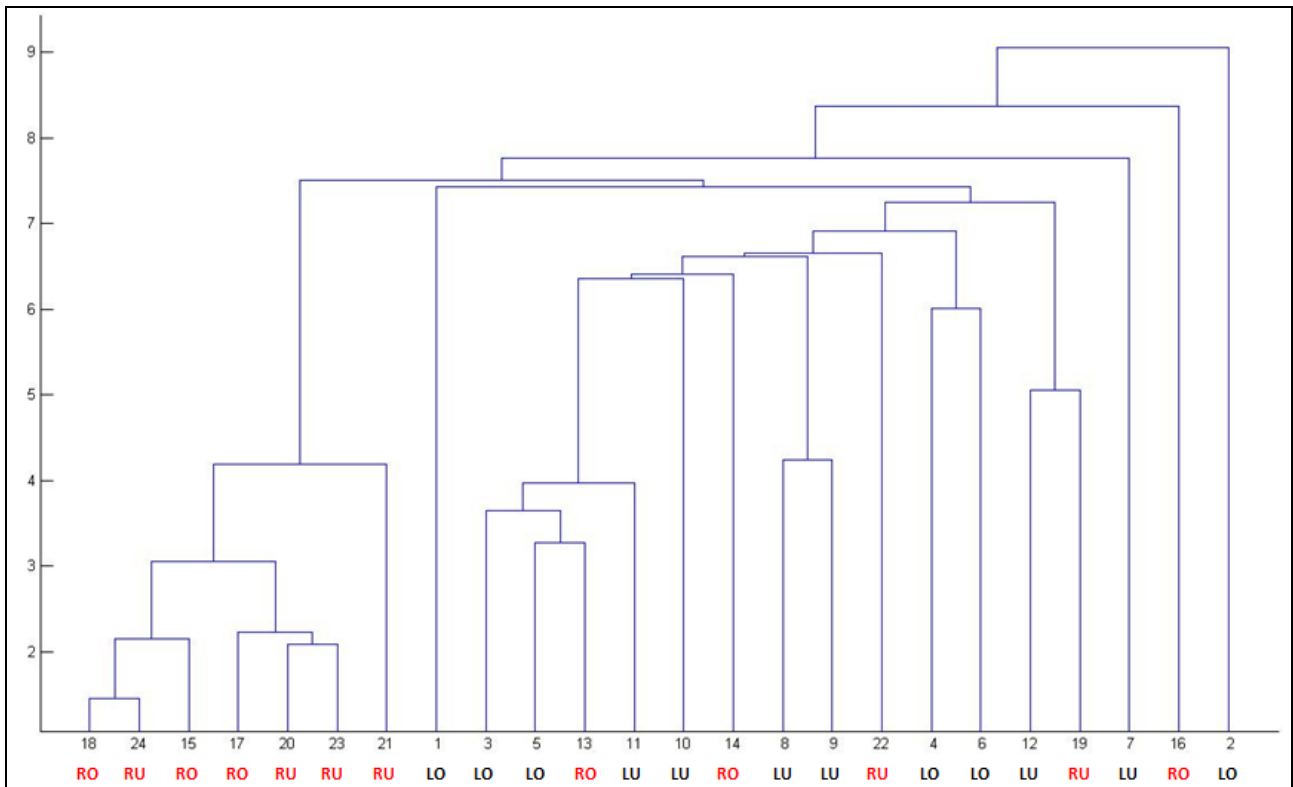


Abb. 67. Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LLS-STB (Keeper-independent)

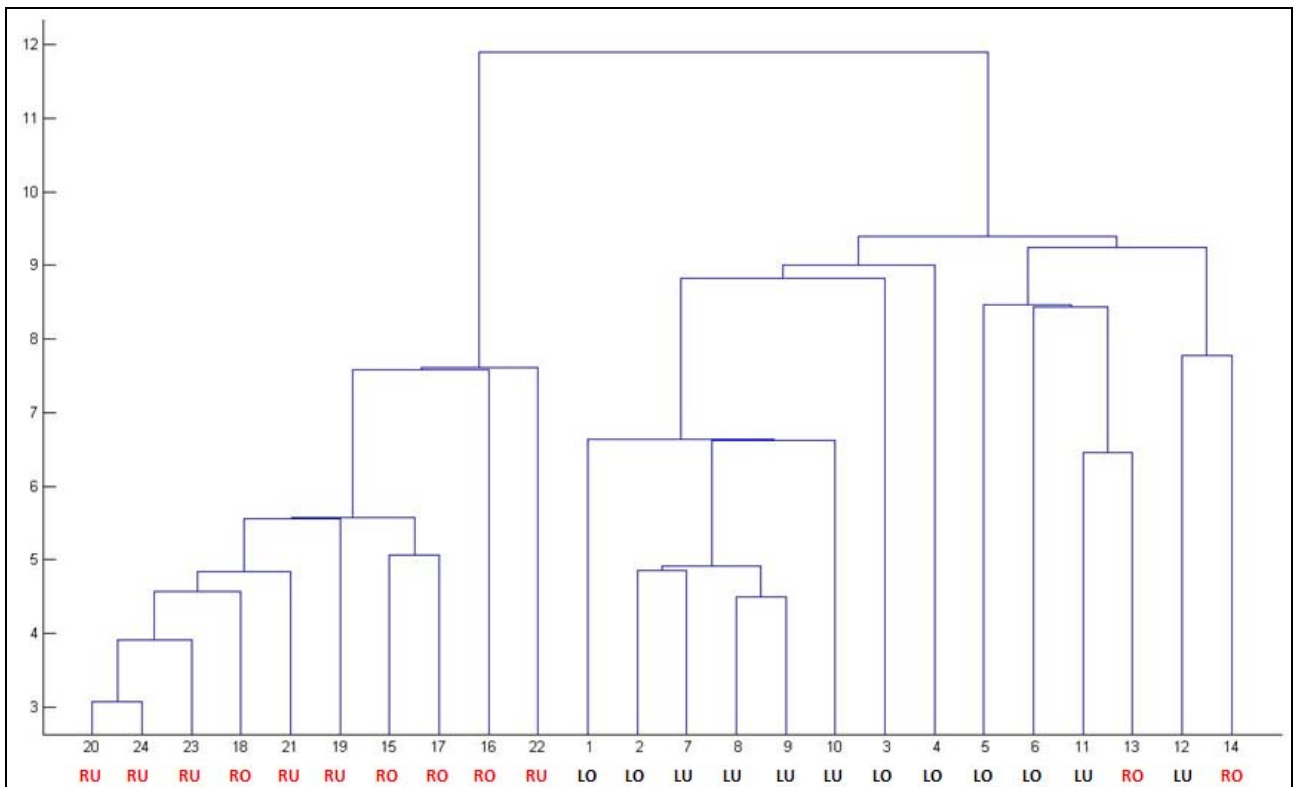


Abb. 68. Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Keeper-independent)

## (b) Interpretation

Die phasenbezogene Erkennung der Bewegungsmuster für die unterschiedlichen Schussrichtungen ergibt einen Mittelwert für jede Phase von etwa 50%. Die Erkennungsrate ist von der ersten Phase LVS-LLS (52,4%) bis zur letzten Phase STB-BK (50,6%) im Mittel leicht abnehmend. Bei Betrachtung der individuellen Ergebnisse zeigen sich stärkere Schwankungen in den Erkennungsraten zwischen den Bewegungsphasen. Die Trennungsquoten von fünf Spielern nehmen von der ersten zur letzten Phase ab. Große Veränderungen sind bei den Spielern CS (LLS-STB: 58,3%; STB-BK: 37,5%) und MV (LVS-LLS: 71,3%; LLS-STB: 38,6%) in den Phasenmittelwerten zu sehen. Es fallen aber auch in gleicher Weise Steigerungen der Erkennungsraten zwischen den Phasen auf (DH, MM). Die höchste Separierung erzielt die Clusteranalyse über alle Probanden in der Phase LLS-STB für die Schussrichtung links mit einem Wert von 63,4%. In dieser Phase ist auch die geringste Trennungsrate von 40,4% für die Strafstöße auf die rechte Seite festzuhalten. Entgegen der Erkennungsraten für die ganzheitlichen Bewegungsmuster treten bei den Probanden DH (rechts) und UR (links) die höchsten Separierungsquoten von 100% in der Phase STB-BK auf. Die anderen Spieler weisen dazu in dieser Phase sehr viel geringere Trennungsraten zwischen 25% und 71,5% auf. Bei Betrachtung der Erkennungsraten in den ersten beiden Bewegungsphasen heben sich die Werte von CS, MV (links) und SE (rechts) in der Phase LVS-LLS sowie CS, UR (links) und MM (beide Schussrichtungen) in der Phase LLS-STB aus der Gruppe ab. Die undeutlichste Trennung der Schussrichtungen über alle Phasen zeigen die Dendrogramme von AZ, welche höchstens 50% der Schüsse für eine Richtung separieren. Die durchschnittlich deutlichste Trennung ist in den Abbildungen 66, 67 und 68 für die drei Phasen von UR zu sehen.

Spieler UR weist für das ganzheitliche Bewegungsmuster eine Separierungsquote von 83,3% (links) und 41,6% (rechts) auf. Die phasenbezogenen Bewegungsmuster werden durchschnittlich mit einer höheren Trennungsrate von 69,5% nach Richtungen gruppiert. Bezogen auf die Phase LVS-LLS bilden sieben Schüsse nach links und sechs Schüsse nach rechts ein separates mehrheitliches Cluster. Vier Strafstöße werden zu Beginn beim Clustern abgegrenzt und bilden aufgrund ihrer größeren Distanzen zu den anderen Versuchen Einzelcluster (Abbildung 66). In den mehrheitlichen Clustern für die Schussrichtungen links und rechts bestehen im Dendrogramm jeweils reine Subgruppierungen einer Schussrichtung (33,3%). Die übrigen Versuche in die gleiche Schussrichtung fallen in ein Mischcluster mit Schüssen der Gegenseite. In der zweiten Phase LLS-STB werden durch die Clusteranalyse drei Versuche in Einzelcluster separiert (Abbildung 67). Auf der vierten Ebene des Dendrogramms bilden sich zwei Gruppen nach Schussrichtungen. Das Cluster „rechts“ trennt sich deutlich von den anderen Clustern ab und enthält nur Strafstöße, die die rechten Zielfelder treffen. Die Schüsse auf die linken Zielfelder zeigen ein variables Bewegungsmuster mit größeren Distanzen. Die Strafstöße fallen in mehrere kleine Gruppen oder Einzelcluster und sind durchmischt mit vier Schüssen der rechten Seite. Es ergibt sich eine Trennung in Höhe von 75% (links) und 50% (rechts). Eine Erkennung der Schusshöhen ist weder für die Strafstöße

auf die rechte noch auf die linke Seite möglich. Eine von der ersten Ebene ab deutliche richtungsspezifische Trennung der Schussrichtungen zeigt das Dendrogramm für die Phase STB-BK (Abbildung 68). Lediglich zwei Schüsse in das Zielfeld RO werden dem großen Cluster „links“ zugeordnet. Dort bilden sie mit Schüssen in das Zielfeld LO ein Subcluster, das mehrheitlich die oberen Zielzonen enthält. Das zweite Subcluster auf der rechten Seite des Dendrogramms stellt ein reines Cluster dar (66,6%). Am linken Rand zeigt sich das Cluster für die Schüsse auf die rechte Seite des Tores. 83,3% der Schüsse nach rechts sind dort eingruppiert. Eine Separierung der Schusshöhe ist nur bedingt für die Strafstöße gegeben. Die Strafstöße in das Zielfeld RU trennen sich klarer ab als die Schüsse in das Zielfeld RO. Gleichermaßen bildet sich ein Subcluster für die Schüsse in das Zielfeld LU heraus, in dem die Distanzen untereinander geringer sind.

#### 5.2.3.2.3 Intra-individueller Vergleich phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster

##### (a) Darstellung

Tab. 28. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse für das psBM Standbein (Keeper-independent)

Spieler	Schussrichtung links	Schussrichtung rechts
AZ	42,9	20
CS	50	91,6
DH	50	75
MM	35,7	20
MV	57,1	10
NA	25	50
SE	41,6	83,3
UR	41,6	83,3
$\bar{x}$	<b>43,0</b>	<b>54,2</b>



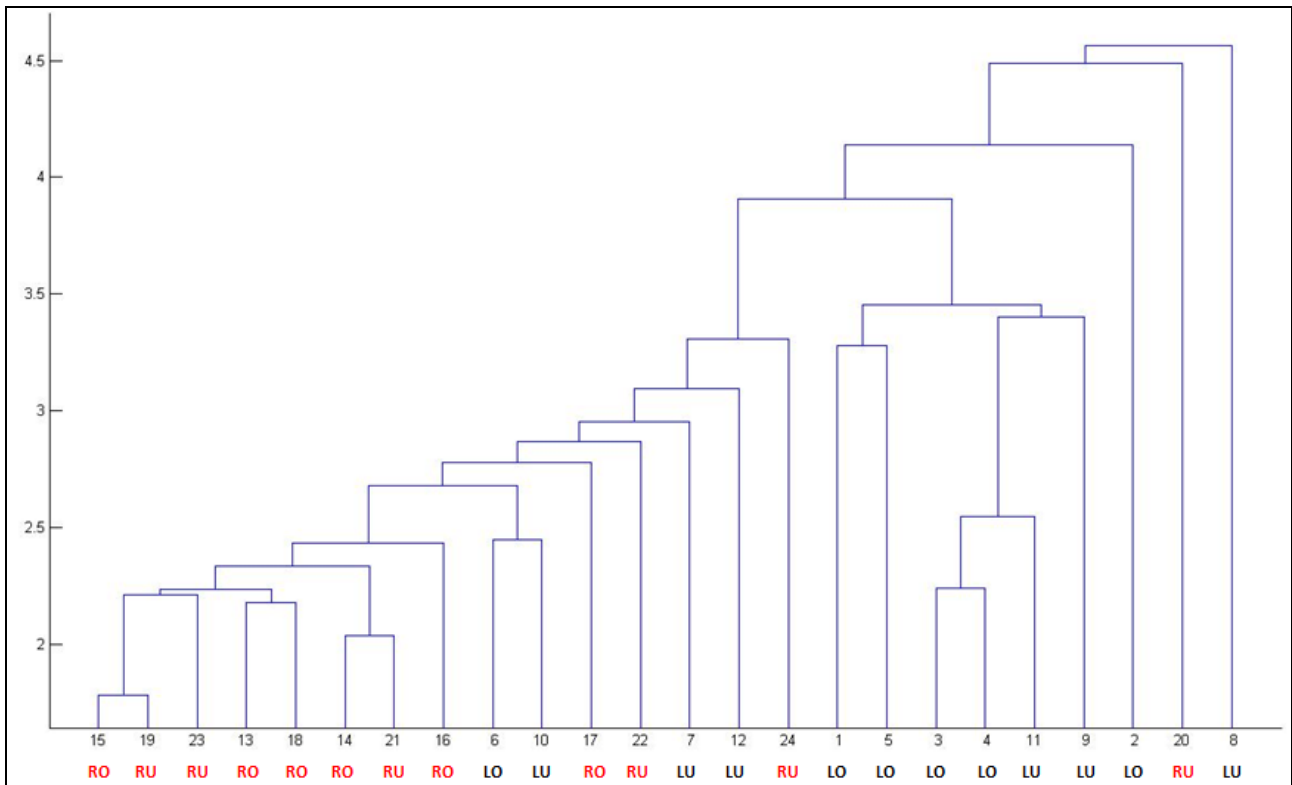


Abb. 69. Dendrogramm des Spielers CS anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-independent)

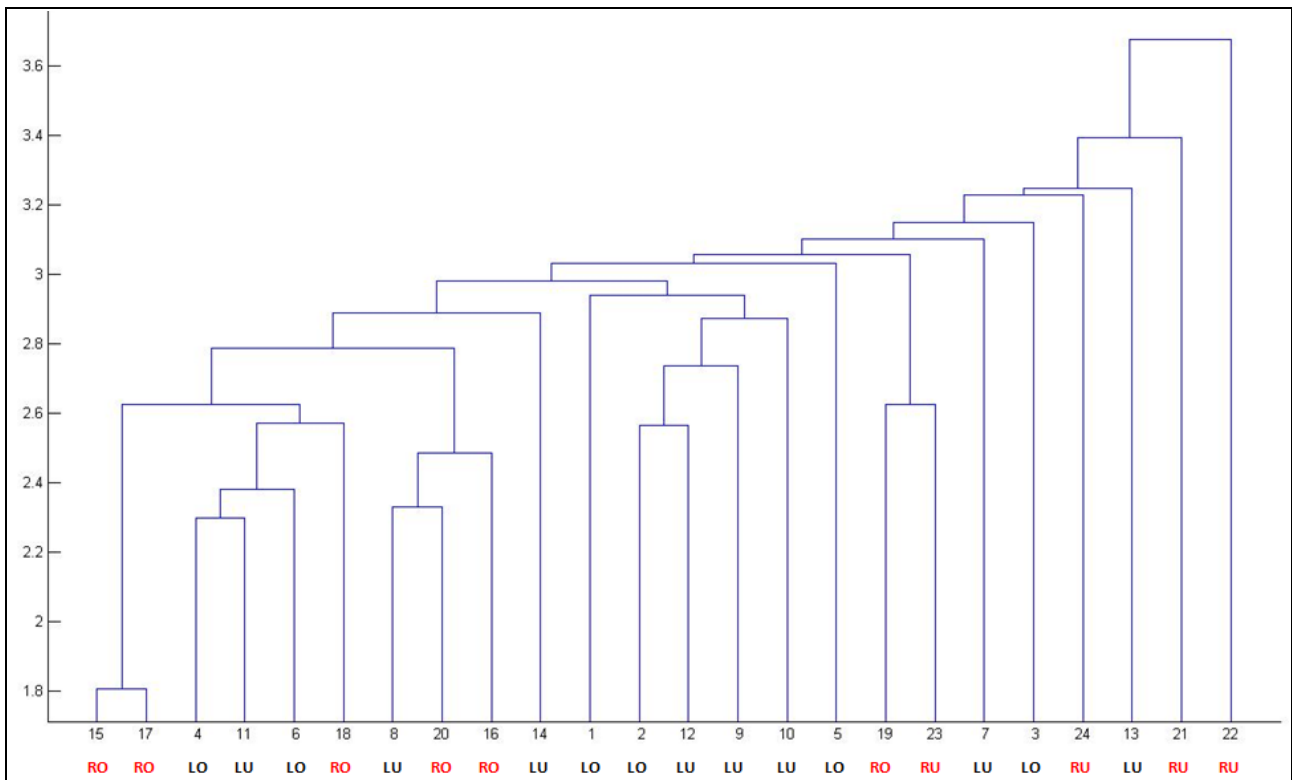


Abb. 70. Dendrogramm des Spielers MM anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-independent)

### (b) Interpretation

Das richtungsspezifische Hinweismerkmal Standbein kann die Strafstöße für die Probanden CS, DH, SE und UR mit hohen Separierungsquoten trennen. Für andere Spieler liegt die Trennungsrate im Durchschnitt deutlich unter 50%. Somit klassifiziert die Clusteranalyse die Schussrichtung über alle Probanden zu 43% (links) und 54,2% (rechts). Die undeutlichste Erkennungsrate weist Spieler MV mit 57,1% (links) und 10% (rechts) auf. Am deutlichsten trennt die Clusteranalyse die Schussrichtungen mit 50% (links) und 91,6% (rechts) für den Probanden CS. Stärkere Differenzen sind im Vergleich zur Analyse der phasenbezogenen Bewegungsmuster STB-BK bei den Spielern CS und SE festzustellen. In der Erkennung des phasenbezogenen Bewegungsmusters schwanken die Werte für beide Probanden zwischen 25% und 50%. Die isolierte Untersuchung von Bewegungsmustern des Standbeins erzielt dagegen Trennungsquoten von 41,6% und 91,6%. Anhand des Dendrogramms des Spielers MM sind umgekehrte Verhältnisse abzulesen. Das phasenbezogene Bewegungsmuster STB-BK separiert deutlich besser die Schussrichtung (links: 71,5%; rechts: 50%) im Vergleich zum Segment Standbein dieser Phase mit 35,7% (links) und 20% (rechts).

Die Abbildung 69 führt das Dendrogramm des Spielers CS auf. Eine klare Struktur ist ab der vierten Ebene im Dendrogramm zu erkennen. Sechs Schüsse auf die linken Zielfelder trennen sich von 11 Schüssen auf die rechte sowie vier weiteren Schüssen auf die linke Torhälfte. Das große mehrheitliche Cluster auf der linken Seite für die Zielfelder RU und RO zeigt auf den weiteren Trennungsebenen einen kettenförmigen Verlauf, um dann zwei Schüsse der linken Seite abzutrennen und in einem reinen Subcluster mit Schüssen auf die rechte Seite des Tores zu enden (66,6%). Die Strafstöße auf die rechte Seite weisen Großteils mehr Stabilität auf als Strafstöße der linken Seite.

Die unklarste Trennung der Schussrichtungen ist im Dendrogramm von MM zu sehen (Abbildung 70). Die Clusteranalyse gruppiert fünf Schüsse in die Zielfelder LU und LO in ein reines Cluster. Die Schüsse auf die rechte Seite des Tores sind über das Dendrogramm verteilt und zeigen keine deutliche Abtrennung zu den Schüssen auf die linken Zielfelder. Am linken Rand des Dendrogramms trennt die Clusteranalyse eine Gruppe ab, die mit 70% hauptsächlich Strafstöße in die Zielfelder LO und RO enthält.

5.2.3.2.4 Vergleich der Bewegungsmuster *Baseline* und *Keeper-independent*

## (a) Darstellung

Tab. 29. Gruppenbezogene Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für die Bedingungen *Baseline* und *Keeper-independent* im Vergleich bei *gBM*, *pBM* und *psBM*

Bedingung	gBM		pBM						psBM	
			LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK			
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
Baseline	62,5	76,0	50,0	50,0	59,3	60,4	82,3	81,2	77,1	86,4
Keeper-independent	62,9	29,2	58,3	46,5	63,4	40,4	47,9	53,3	43,0	54,2
<b>Differenz</b>	<b>0,4</b>	<b>-46,8</b>	<b>8,3</b>	<b>-3,5</b>	<b>4,0</b>	<b>-20,0</b>	<b>-34,3</b>	<b>-27,9</b>	<b>-34,1</b>	<b>-32,3</b>

Tab. 30. Separierungsquoten (%) der kombinierten Clusteranalyse über *Baseline* und *Keeper-independent* anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei *gBM*, *pBM* und *psBM*; \* = zusätzliche Separierung nach Bedingungen erkennbar

Spieler	gBM		pBM						psBM	
			LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK			
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AZ	23,1	63,6	38,5	36,4	30,8	72,7	46,2*	72,7	61,5	50
CS	50	16,7	83,3	12,5	58,3	12,5	62,5	79,2	79,2	95,8
DH	54,2	12,5	62,5	16,7	62,5	41,7	25	16,7	50	25
MM	80,8	59,1	42,3	22,7	84,6	77,3	69,2	31,8	30,8	36,4
MV	73,1	50*	100	36,4	80,8	40,9	57,7*	40,9*	53,9	59,1*
NA	45,8	33,3	25	16,7	58,3	8,3	45,8	58,3	58,3	70,8
SE	25	95,8	20,8	58,3	25	37,5	25	79,2	58,3	95,8
UR	62,5	29,2	8,3	54,2	25	41,7	75	87,5	37,5	70,8
$\bar{x}$	<b>51,8</b>	<b>45,0</b>	<b>47,6</b>	<b>31,7</b>	<b>53,2</b>	<b>41,6</b>	<b>50,8</b>	<b>58,3</b>	<b>53,7</b>	<b>63,0</b>

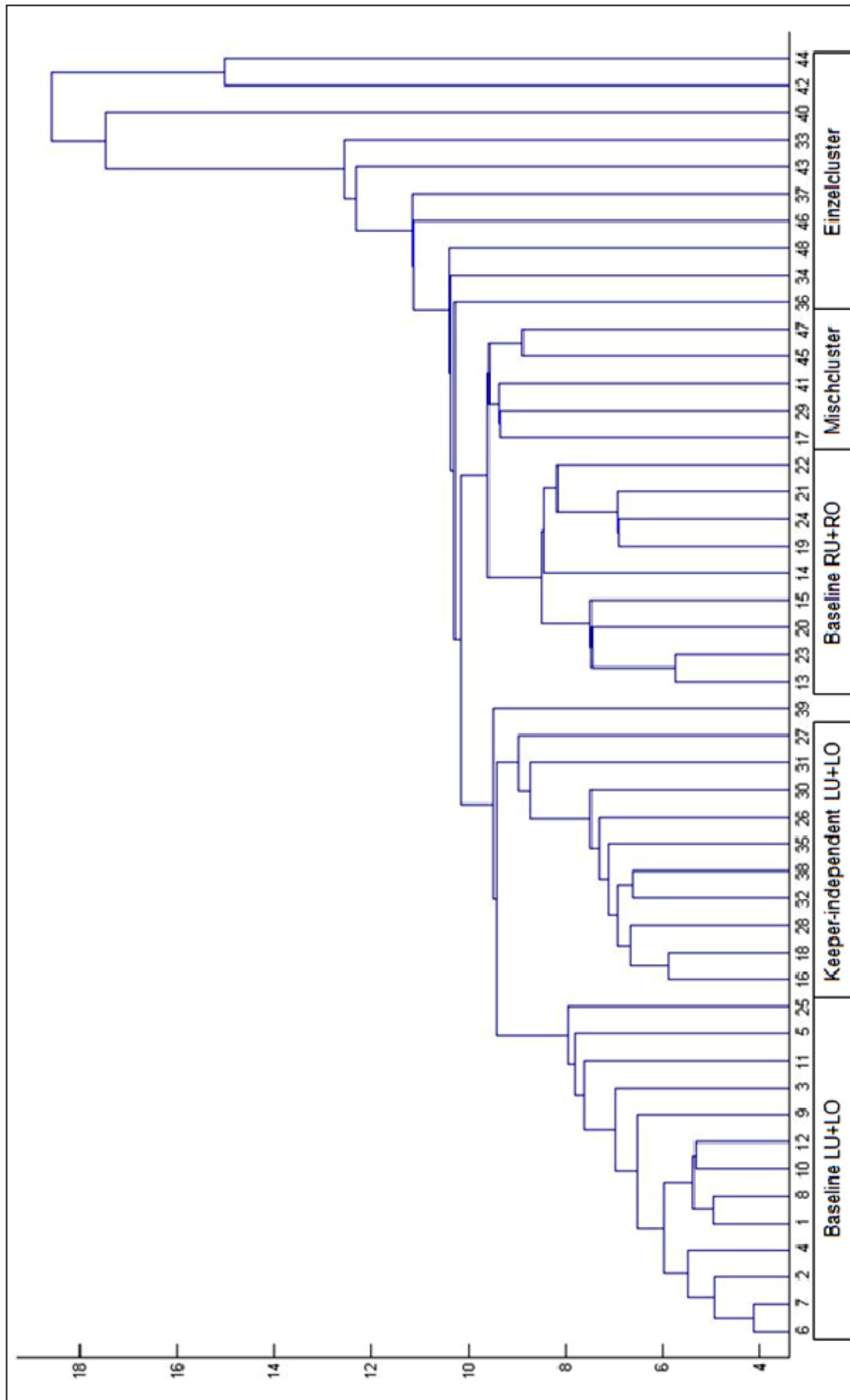


Abb. 71. Dendrogramm des Spielers MM anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Vergleich Baseline mit Keeper-independent); Nummerierung: 1-12 und 25-38 = links; 13-24 und 39-48 = rechts

## (b) Interpretation

Der Vergleich der acht Probanden für die Bedingungen *Baseline* und *Keeper-independent* deutet für die Analyse der ganzheitlichen Bewegungsmuster eine Abnahme der Erkennungsraten an. Strafstöße, welche in die rechten Zielfelder geschossen werden, sind durch die Clusteranalyse nur noch zu 29,2% erkennbar. Der Unterschied zur Bedingung *Baseline* beträgt -46,8%. Die Trennungsraten für die Strafstöße der linken Seite des Tores bleiben auf gleichem Niveau (*Baseline*: 62,5%; *Keeper-independent*: 62,9%). Im nächsten Schritt, der differenzierten Analyse der einzelnen Bewegungsphasen der Anlauf- und Schussbewegung, ist von der Phase LVS-LLS bis zur Phase STB-BK eine Abnahme der durchschnittlichen Erkennungsraten in der Bedingung *Keeper-independent* im Vergleich zur Bedingung *Baseline* zu erkennen. In der ersten Phase LVS-LLS liegt die Separierungsquote für die Bedingung *Keeper-independent* leicht erhöht bei 52,4% (+2,4%), fällt aber in den Phasen LLS-STB (-8%) und STB-BK (-31,1%) stark ab. Ebenso ist ein Rückgang der Erkennungsraten für das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster Standbein festzuhalten. Hier zeigen sich im Durchschnitt zu den Analysen der ganzheitlichen und phasenbezogenen Bewegungsmuster die größten Veränderungen (links: -34,1%; rechts: 32,3%). Die stark unterschiedliche Separierung für die Bedingungen weckt den Anschein, dass die Spieler Hinweisreize in ihrem Bewegungsablauf unterdrücken wollen. Aufgrund der Aufgabenstellung versuchen möglicherweise die Spieler ihre beschränkten Handlungsmöglichkeiten zu verbessern, indem sie ein frühzeitiges Antizipieren der Schussrichtung durch den Torwart vermeiden wollen.

Im direkten Vergleich der ganzheitlichen, phasenbezogenen und phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster beider Bedingungen in einer Clusteranalyse können keine klaren Zuweisungen von Strafstößen zu einer Untersuchungsbedingung vorgenommen werden. Vereinzelt treten bei den untersuchten Bewegungsmustern der Spieler innerhalb eines richtungsspezifischen Clusters Subcluster auf, die die Schüsse nach Bedingungen trennen. In Bezug auf die richtungsspezifische Unterscheidung der Strafstöße fallen durchschnittlich zwischen 31,7% und 63% einer Schussrichtung in ein gemeinsames Cluster. Für den Probanden MM ist der Vergleich der ganzheitlichen Bewegungsmuster in Abbildung 71 aufgeführt. Das Dendrogramm zeigt für die Strafstöße auf die linke Seite des Tores eine gute Trennung einerseits zu den Schüssen der rechten Seite und andererseits zwischen den Bedingungen (*Baseline*: 100%; *Keeper-independent*: 57,1%). In einem zweiten Cluster werden neben einem gemischten Subcluster 75% der Schüsse auf die rechten Zielfelder der Bedingung *Baseline* gruppiert.

Die höchsten Separierungsraten weist die Clusteranalyse für die Strafstöße phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster mit 53,7% (links) und 63,0% (rechts) auf (Tabelle 30). In der Einzelbetrachtung fällt auf, dass die höchsten Erkennungsraten für die Schussrichtungen bei den Probanden über die verschiedenen Bewegungsmuster streuen. Zum Beispiel zeigt das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster Standbein für den Spieler CS und SE sehr hohe Trennungsraten zwischen den Bedingungen im Vergleich zu DH oder MM. Veränderungen in den indi-

viduellen Bewegungsmustern zwischen beiden Bedingungen treten unterschiedlich stark hervor.

### 5.2.3.2.5 Schlussfolgerung

In dieser Bedingung wird die torwartunabhängige Strategie angewendet. Die zu lösende Aufgabe der Schützen verändert sich demnach zwischen den Bedingungen *Baseline* und *Keeper-independent* nicht. In beiden Bedingungen wird gemäß der torwartunabhängigen Strategie das Zielfeld anvisiert und der Strafstoß ausgeführt. Dass die Anwesenheit eines Torhüters dennoch einen Einfluss auf die Bewegungsausführung der Spieler hat, zeigen die Ergebnisse über alle untersuchten Bewegungsmuster. Sehr deutlich wird dies über den Verlauf der Erkennungsraten zwischen den phasenbezogenen Bewegungsmustern (LVS-LLS: 2,4%; LLS-STB: -8,0%; STB-BK: -31,1%) sowie der großen Differenz zwischen den phasen-segmentbezogenen Bewegungsmustern der Bedingungen *Baseline* und *Keeper-independent* (links: -34,1; rechts: -32,3). Die Veränderungen könnten als Verschleierungsstrategie angesehen werden. Auch die Anlaufzeit deutet eine Veränderung an. Im Vergleich der Bedingungen ist bei sechs Probanden eine leichte Abnahme der Anlaufzeit festzuhalten ( $\bar{x}=-124\text{ms}$ ). Ungeklärt in dieser Bedingung ist jedoch, inwiefern die Probanden die torwartunabhängige Strategie umsetzen. Diese Tatsachen sind im Hinblick auf videobasierte Studien zu berücksichtigen, wenn Stimuli für Probanden aufgenommen werden, um richtungsspezifische Hinweise zu prüfen. Eine ungestörte Ausführung in der Strafstoßsituation ist trotz gleicher Strategie nicht gleichzusetzen mit einer wettkampfnahen Situation, in der ein Torwart agiert.

### 5.2.3.3 Bedingung Keeper-dependent

#### 5.2.3.3.1 Intra-individueller Vergleich ganzheitlicher Bewegungsmuster

##### (a) Darstellung

Tab. 31. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (Keeper-dependent)

Spieler	Schussrichtung links	Schussrichtung rechts
DR	18,2	84,6
MB	66,6	25
ML	46,2	27,3
MR1	50	75
RP	83,3	41,6
RS	61,5	72,7
SZ	62,5	75
TS	38,5	90,9
$\bar{x}$	<b>53,4</b>	<b>61,5</b>

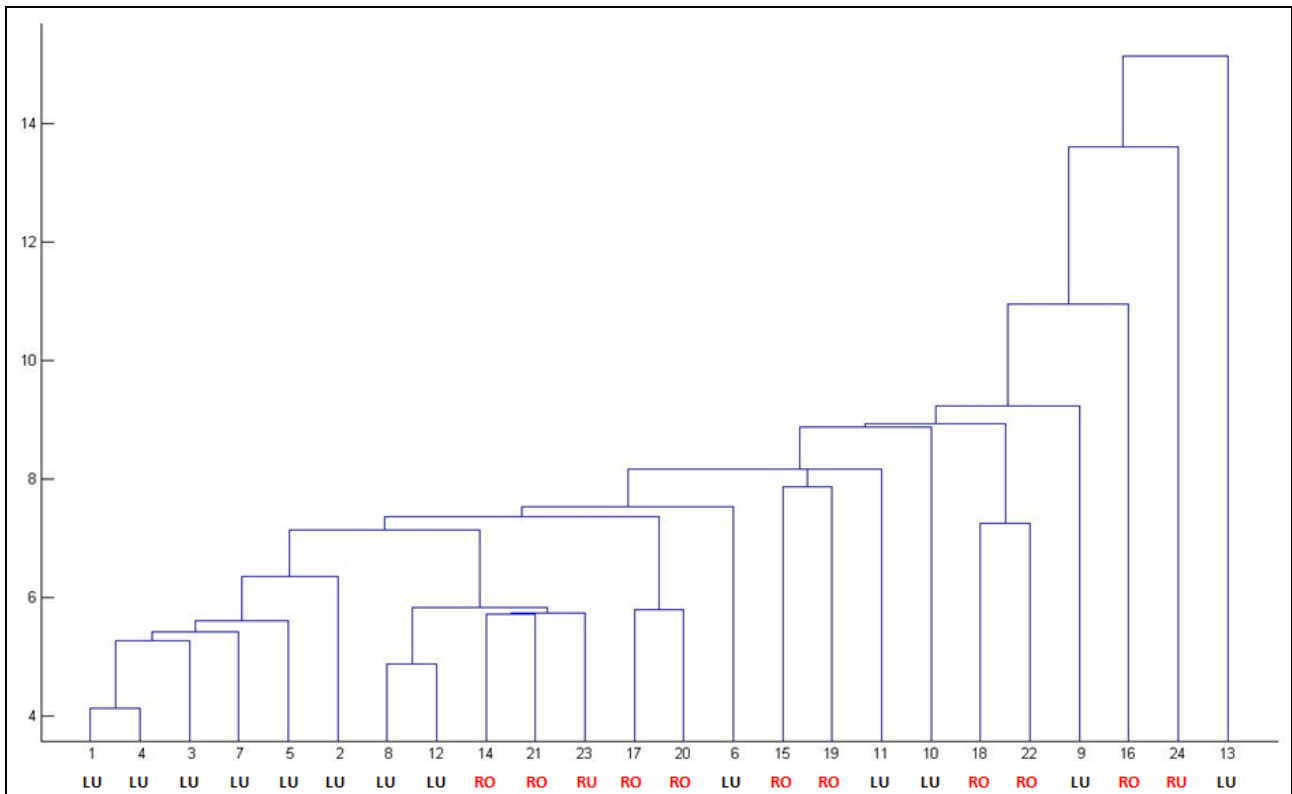


Abb. 72. Dendrogramm des Spielers ML anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-dependent)

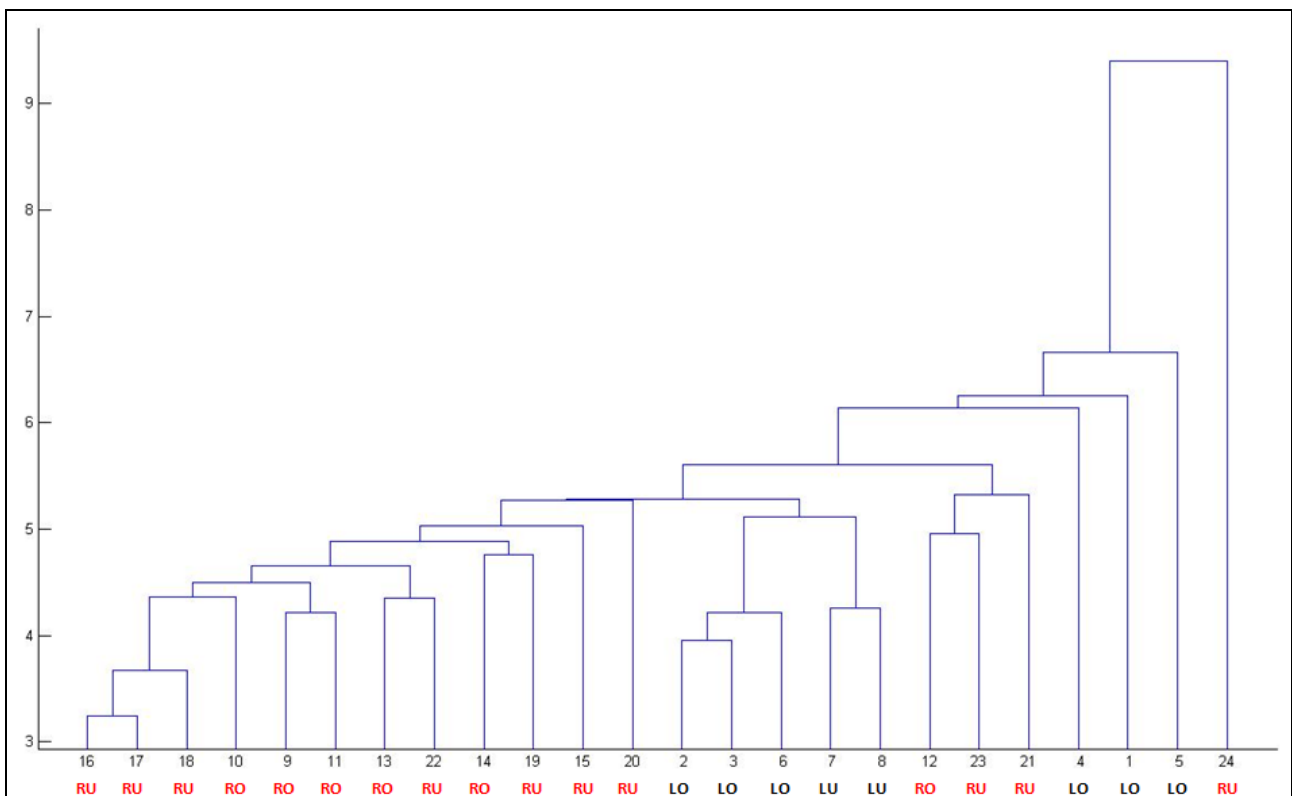


Abb. 73. Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Keeper-dependent)

### (b) Interpretation

Die Erkennung der Schussrichtungen bei ganzheitlichen Bewegungsmustern in der Bedingung *Keeper-dependent* liegt für Strafstöße auf die linken Zielfelder bei 53,4% und auf die rechten Zielfelder bei 61,5%. Bei Betrachtung der intra-individuellen Separierungen ist für die Spieler MR1, RP, RS, SZ und TS eine gute Trennung vorzufinden. Teilweise weisen die Erkennungsraten einer Schussrichtung deutlich geringere Prozentwerte im Vergleich zur Gegenseite auf, so dass die ausgewogene Erkennung von richtungsspezifischen Bewegungsmustern für Individuen im Vergleich zum Gruppenmittelwert differiert. Die höchste Trennungsquote erzielt die Clusteranalyse für Proband TS (90,9%). Am undeutlichsten können die Schüsse von Spieler DR (18,2%) auf die linke Torseite abgegrenzt werden. Gleichermaßen auf geringerem Trennungsniveau liegen die Erkennungsraten für den Probanden ML (links: 46,2%; rechts: 27,3%).

Die undeutlichste Trennung wird in Abbildung 72 gezeigt. Die Clusteranalyse von Proband ML gibt zahlreiche Einzelcluster und kleinere Gruppierungen zurück, die auf der rechten Seite des Dendrogramms keine Struktur erkennen lassen. Lediglich für die Schussrichtung links ist eine deutliche Trennung zu anderen Schüssen auf der linken Seite des Dendrogramms ersichtlich. Ein zweites größeres Cluster enthält mehrheitlich Schüsse in die rechten Zielzonen. In zwei Subcluster werden die Strafstöße richtungsspezifisch getrennt.

Eine deutliche Separierung der richtungsspezifischen Bewegungsmuster präsentiert Abbildung 73 anhand des Dendrogramms von Spieler SZ. Nach Abgrenzung von vier Strafstößen auf den ersten Separierungsebenen bilden sich im Dendrogramm drei Cluster heraus. Zwei Cluster stellen reine Gruppierungen für Schüsse auf die rechten Zielfelder dar. Die Trennung zwischen den Zielfeldern RU und RO besteht in diesen Clustern nicht. Die dritte Gruppe enthält fünf Strafstöße in die Zielfelder auf der linken Torseite. In zwei Subcluster werden die wenigen Schüsse nach den Zielfeldern LU und LO eingruppiert.



5.2.3.3.2 Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster

(a) Darstellung

Tab. 32. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM (Keeper-dependent)

Spieler	LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
DR	18,2	38,5	18,2	46,2	81,8	100
MB	58,3	25	83,3	75	33,3	33,3
ML	53,9	27,2	84,6	90,9	46,2	90,9
MR1	31,3	25	43,8	25	37,5	62,5
RP	16,6	75	83,3	83,3	41,6	66,6
RS	23,1	63,6	61,5	27,3	92,3	72,7
SZ	62,5	50	37,5	75	87,5	68,8
TS	23,1	54,5	46,2	63,6	53,9	54,5
$\bar{x}$	<b>35,9</b>	<b>44,9</b>	<b>57,3</b>	<b>60,8</b>	<b>59,3</b>	<b>68,7</b>

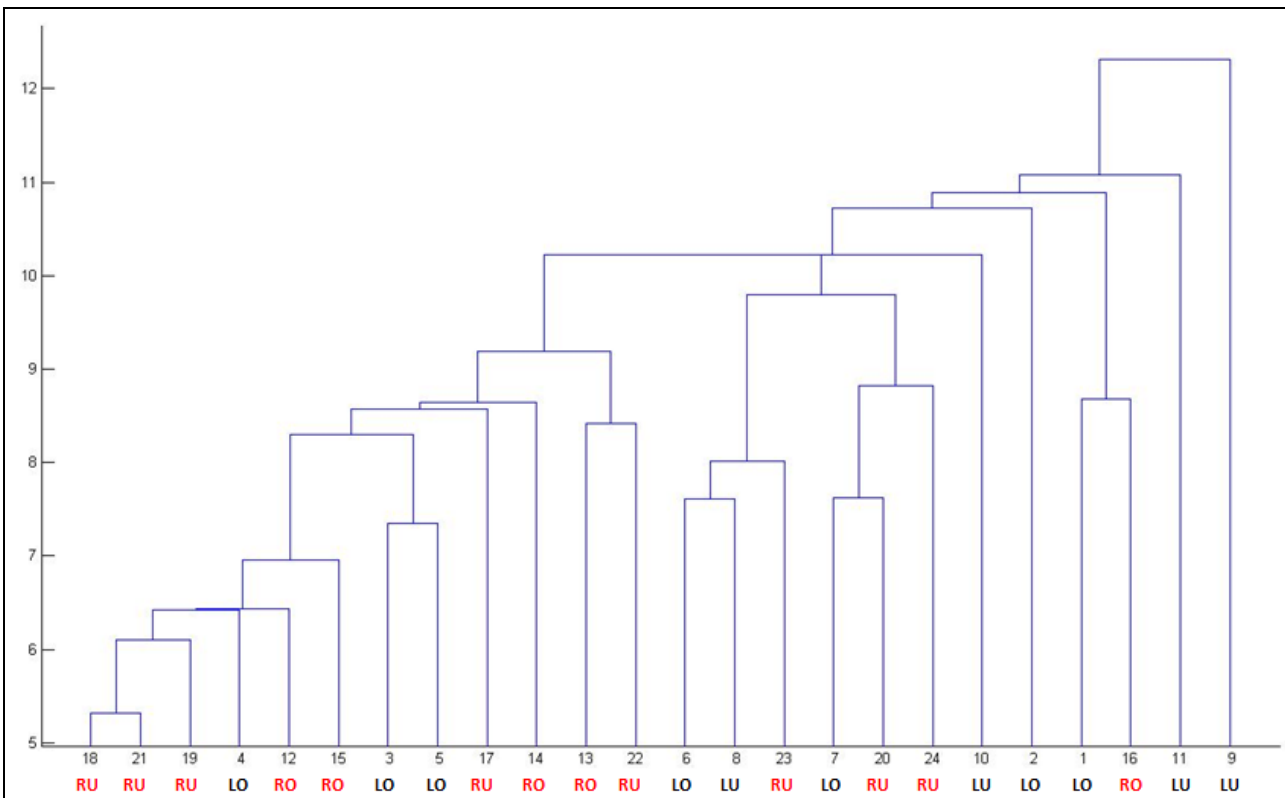


Abb. 74. Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LVS-LLS (Keeper-dependent)

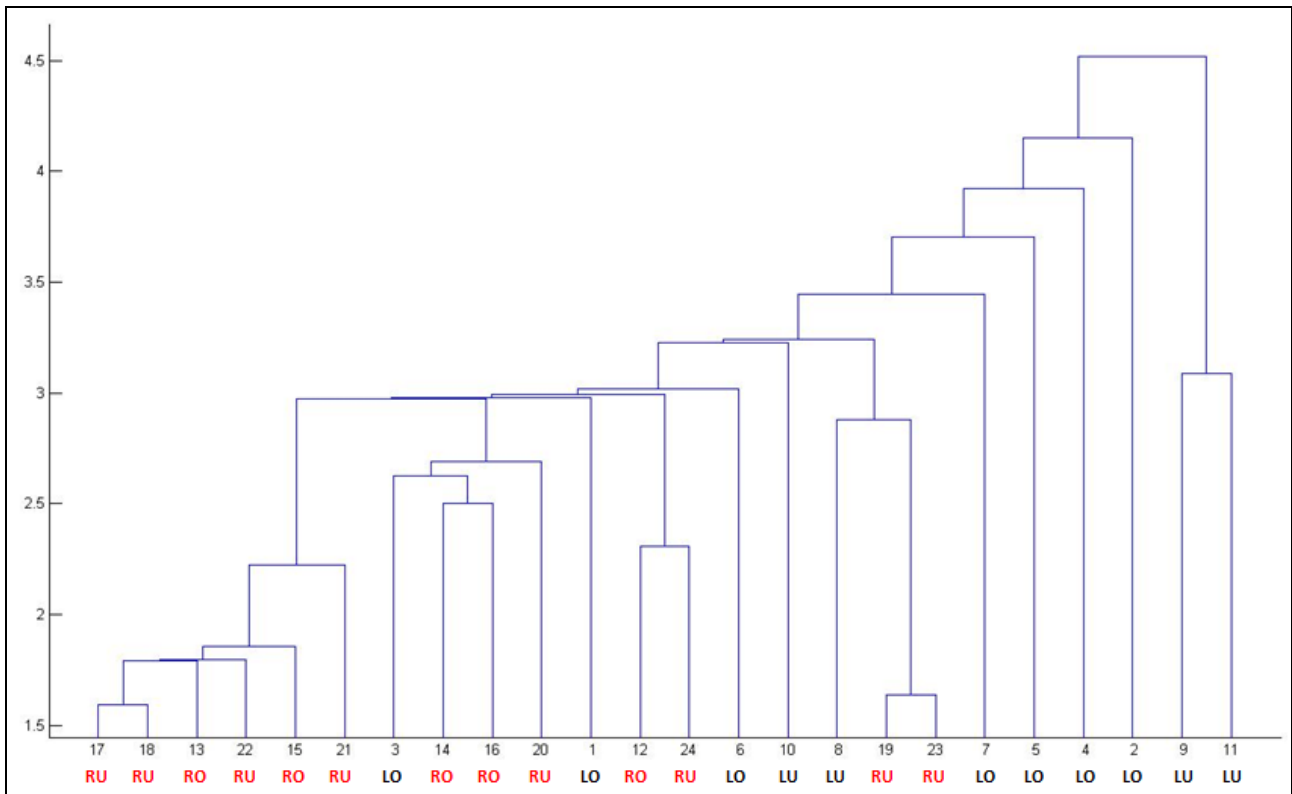


Abb. 75. Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LLS-STB (Keeper-dependent)

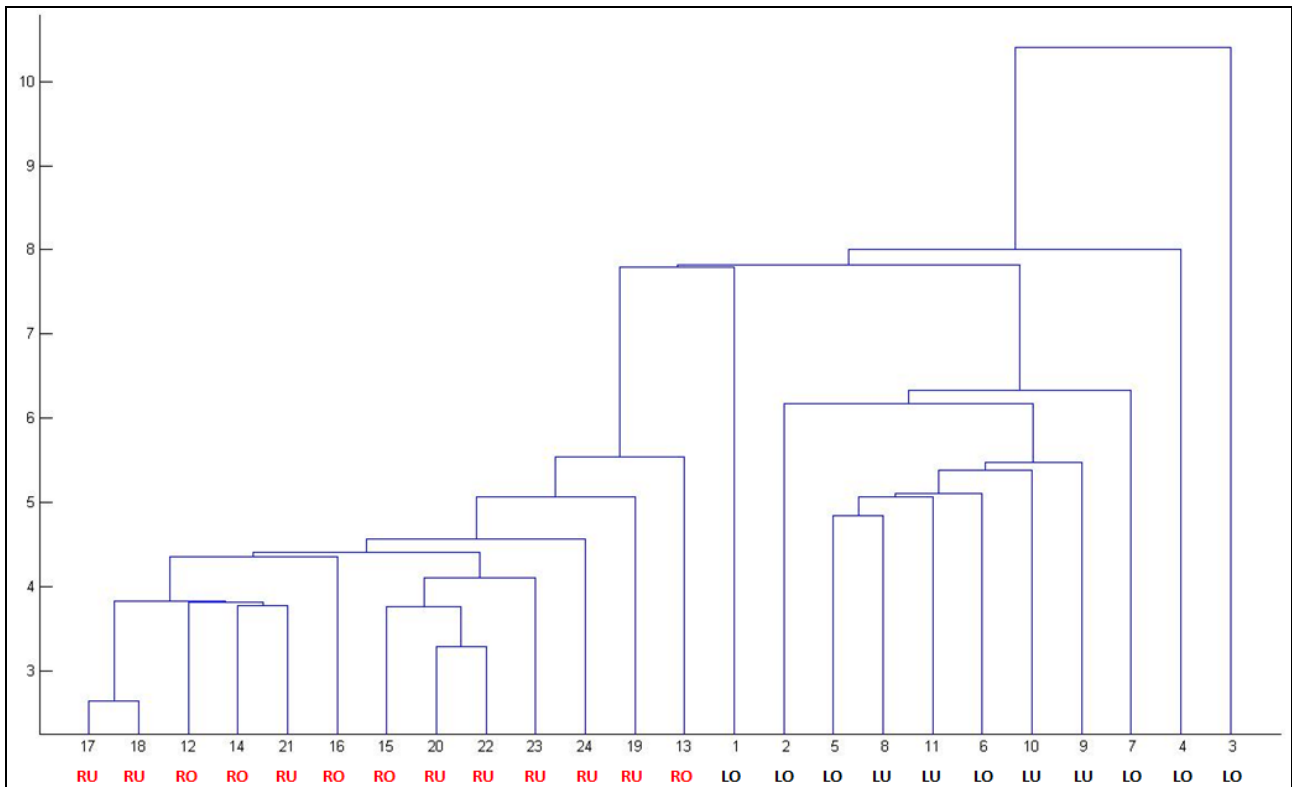


Abb. 76. Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Keeper-dependent)

### (b) Interpretation

Die Separierungsquote steigt im Gruppenmittel von Phase LVS-LLS (40,4%) zur Phase LLS-STB (59,0%) stärker an. Auf ähnlichem Niveau können auch die Erkennungsraten für die letzte Phase (64,0%) festgehalten werden. Die Entwicklung der Trennungsquoten im intra-individuellen Vergleich zeigt unterschiedliche Verläufe an. Die Probanden DR, MR1, RS und SZ erreichen anhand ihrer Clusteranalysen für die ersten beiden Phasen intra-individuell ähnliche Erkennungsraten, um nach einem deutlichen Anstieg in der Phase STB-BK die höchsten Separierungen vorzuweisen. Im Gegensatz dazu erzielen die Erkennungsraten für die Spieler MB, ML und RP in der Phase LLS-STB nach einem durchschnittlichen Anstieg um 41% bereits die höchste richtungsspezifische Separierung. In der letzten Phase STB-BK fallen die Trennungsquoten wieder deutlich ab, liegen aber über dem Niveau von Phase LVS-LLS. Einen unterschiedlichen Verlauf in den Trennungsraten zeigt Spieler TS, dessen Werte nach einem Anstieg von der ersten zur zweiten Phase keine Veränderung in der Phase STB-BK vorweisen. Durchschnittlich die geringsten Separierungsquoten über alle Phasen werden für den Probanden MR1 bestimmt.

Die deutlichste Trennung zumindest in der letzten Phase STB-BK zeigt Proband DR mit 81,8% (links) und 100% (rechts). In den Phasen LVS-LLS und LLS-STB liegen die Erkennungsraten deutlich unterhalb von Phase STB-BK (-55,7%). Nach wenigen Separierungsebenen sind für die Phase LVS-LLS des Spielers DR zwei große Cluster zu sehen, die beide Strafstöße von der linken und rechten Seite enthalten (Abbildung 74). Am linken Rand besteht ein mehrheitliches Cluster für die Schussrichtung rechts mit drei weiteren Schüssen auf die linke Seite. Fünf Strafstöße sind sich in dieser Gruppe aufgrund der Distanzen ähnlicher als die übrigen Schüsse auf die rechte Seite. Im zweiten Cluster ist in Bezug auf die Anzahl der Schüsse für eine Schussrichtung eine Gleichverteilung gegeben. In der Phase LLS-STB trennen sich die Schüsse auf die rechten Zielfelder besser ab im Vergleich zur ersten Phase (Abbildung 75). Die unklare Struktur für die Strafstöße der linken Torzonen bleibt weiterhin bestehen und zeigt sich über die Kettenbildung auf den ersten Separierungsebenen. Die Bestimmung der Erkennungsrate für die Schussrichtung rechts erfolgt über das reine Cluster am linken Rand des Dendrogramms. Durch die große Distanz zur nächst höheren Separierungsebene werden die benachbarten Schüsse auf die rechte Seite des Tores nicht für ein mehrheitliches Cluster berücksichtigt. Unter Einschluss dieser Schüsse bis zum nächsten größeren Anstieg der Distanz würden 84,6% der Schüsse auf die rechten Zielfelder gruppiert werden. Eine starke Erhöhung der Trennungsquote zeigt Abbildung 76 für die Phase STB-BK. Bis auf drei einzeln abgetrennte Schüsse in das Zielfeld LO bilden die Strafstöße für die Schussrichtungen deutliche Cluster. Innerhalb der Gruppierung für die Strafstöße der rechten Zielfelder werden in Subclustern weitere Abtrennungen aufgeführt, die mehrheitlich die Schusshöhe gruppieren.

5.2.3.3.3 Intra-individueller Vergleich phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster

(a) Darstellung

Tab. 33. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse für das psBM Standbein (Keeper-dependent)

Spieler	Schussrichtung links	Schussrichtung rechts
DR	27,3	38,5
MB	16,6	50
ML	15,4	45,5
MR1	87,5	75
RP	58,3	33,3
RS	30,8	63,6
SZ	87,5	37,5
TS	23,1	45,5
$\bar{x}$	<b>43,0</b>	<b>48,6</b>

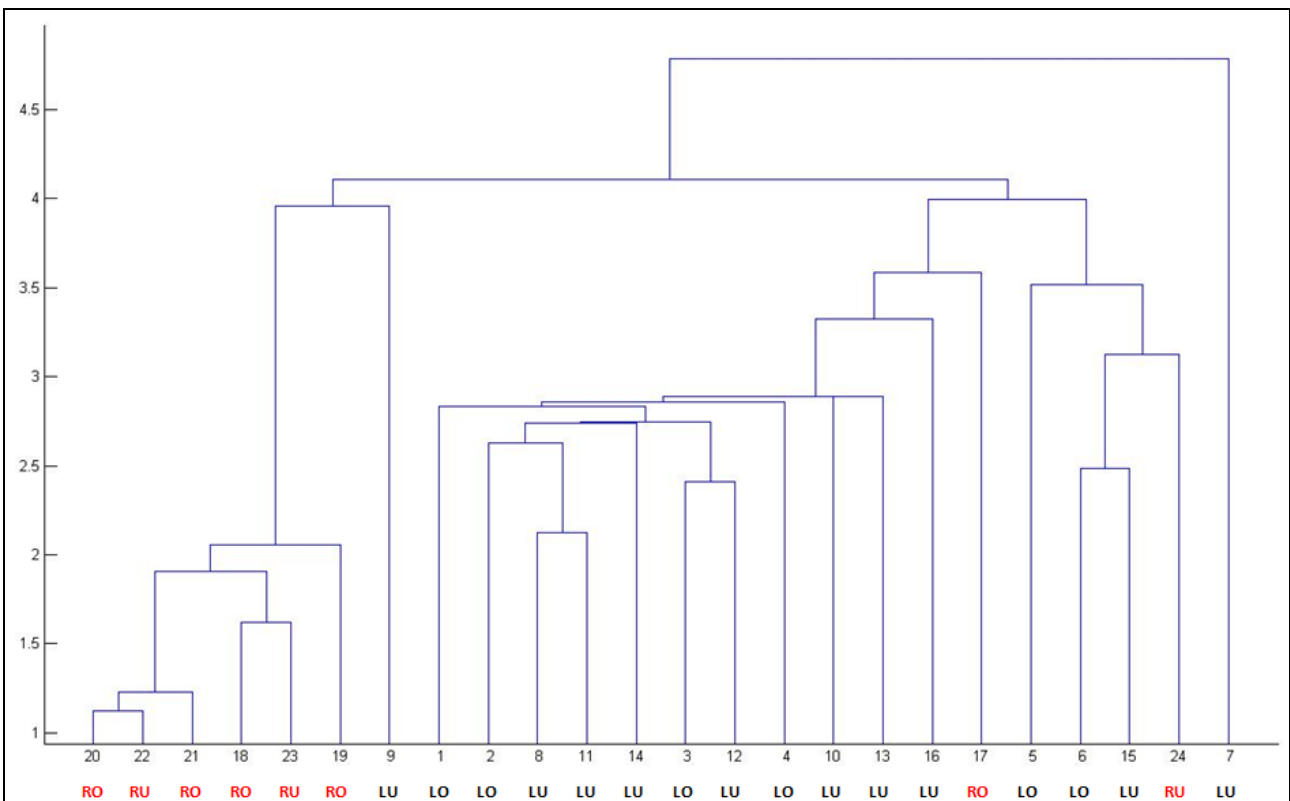


Abb. 77. Dendrogramm des Spielers MR1 anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-dependent)

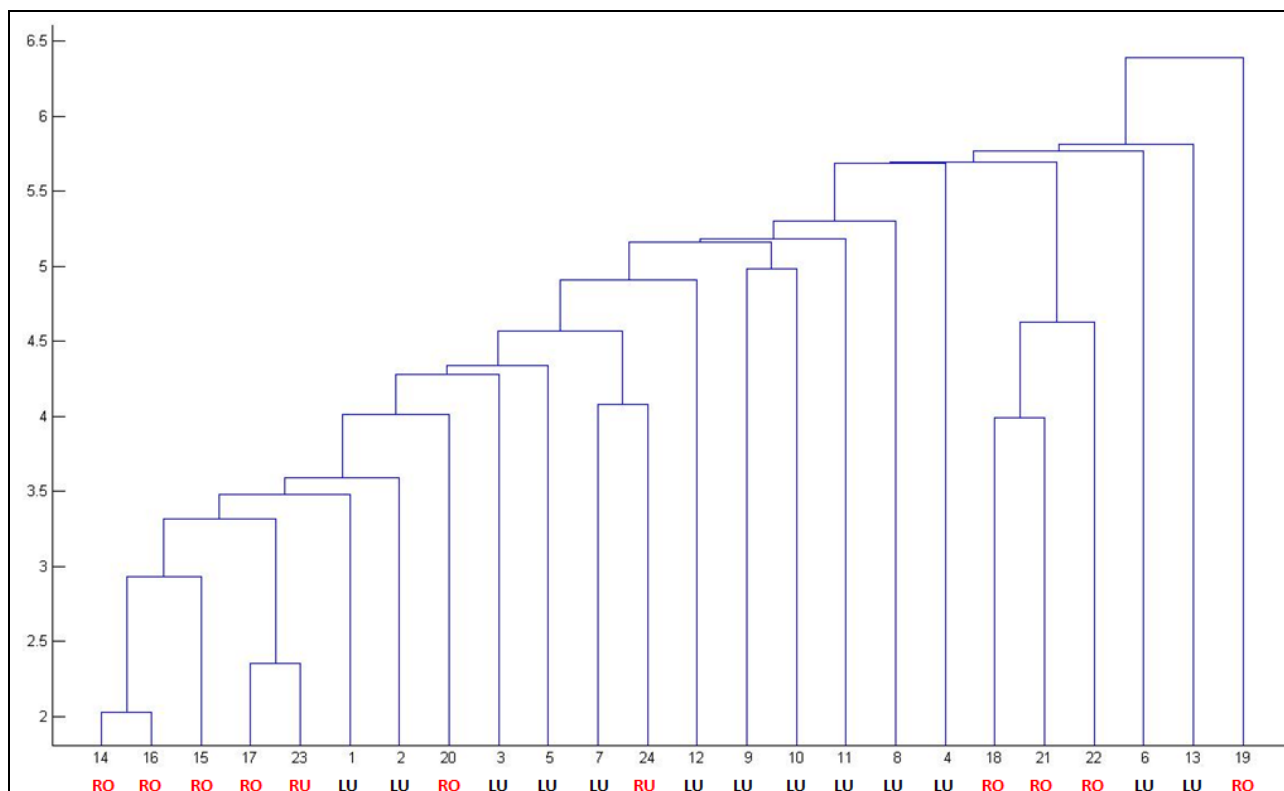


Abb. 78. Dendrogramm des Spielers ML anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Keeper-dependent)

#### (b) Interpretation

Die Separierung anhand des Merkmals Standbein ergibt für die Bedingung *Keeper-dependent* keine deutliche Trennung für die Schussrichtungen links und rechts. Das Gruppenmittel liegt für beide Schussrichtungen unter 50% Trennungsrate. Herauszuheben ist der Proband MR1, der für die Zielfelder LU und LO eine Erkennungsrate von 87,5% sowie für die Zielfelder RU und RO eine Separierungsquote in Höhe von 75% aufweist. Ebenso deutlich ist die Abgrenzung der Schüsse auf die linke Torseite bei Spieler SZ (87,5%). Bis auf die Separierungsraten von RP (58,3%) und RS (63,6%) führen alle Clusteranalysen zu Werten kleiner als 50%. Die gemeinsame Betrachtung der Ergebnisse von phasen-segmentbezogenen und phasenbezogenen Bewegungsmuster STB-BK verdeutlicht die Qualität des Standbeins als intra-individuelles Erkennungsmerkmal. Bei MR1 liegen die Erkennungsraten deutlich höher als für das phasenbezogene Bewegungsmuster STB-BK. Im Gegensatz dazu klassifiziert das Standbein von DR Schussrichtungen deutlich schlechter im Vergleich zum phasenbezogenen Bewegungsmuster STB-BK. Alle weiteren Spieler weisen ähnliche oder leicht reduzierte Erkennungsraten für das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster beim Vergleich mit dem phasenbezogenen Bewegungsmuster STB-BK auf.

MR1 trennt die Strafstöße auf der zweiten Separierungsebene im Dendrogramm richtungsspezifisch (Abbildung 77). Es besteht ein reines Cluster für die Zielfelder auf der rechten Seite mit 6 von 8 Schüssen. Bis auf einen Schuss in das Zielfeld LU, der auf der ersten Ebene ausgruppiert wird, fallen alle Schüsse nach links in ein großes Cluster. Innerhalb der Gruppe bilden sich zwei Subcluster heraus, die

aber keinen Hinweis auf die Schusshöhe liefern. Im Vergleich der beiden Schussrichtungen sind die Distanzen zwischen den Schüssen nach rechts geringer und zeigen eine größere Ähnlichkeit als die Schüsse zur Gegenseite.

Die undeutlichste Separierung von Strafstößen durch die Clusteranalyse anhand des Standbeins ergibt sich für Spieler ML (Abbildung 78). Lediglich die Strafstöße auf die rechte Seite werden durch die Clusteranalyse deutlicher separiert. Es besteht ein reines Cluster mit fünf sowie mit drei Schüssen. Somit zeigt Spieler ML zwei unterschiedliche Bewegungsmuster, um auf das Zielfeld RO zu schießen. Die Strafstöße nach links bilden sehr häufig Einzelcluster. Das größte Cluster für diese Schussrichtung liegt bei zwei Schüssen.

#### 5.2.3.3.4 Vergleich der Bewegungsmuster *Baseline* und *Keeper-dependent*

##### (a) Darstellung

Tab. 34. Gruppenbezogene Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für die Bedingungen *Baseline* und *Keeper-dependent* im Vergleich bei *gBM*, *pBM* und *psBM*

Bedingung	gBM		pBM						psBM	
			LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK			
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
Baseline	97,9	86,4	82,3	72,9	73,9	71,9	84,4	84,4	90,6	79,1
Keeper-dependent	53,4	61,5	35,9	44,9	57,3	60,8	59,3	68,7	43,3	48,6
<b>Differenz</b>	<b>-44,6</b>	<b>-24,9</b>	<b>-46,4</b>	<b>-28,0</b>	<b>-16,6</b>	<b>-11,1</b>	<b>-25,1</b>	<b>-15,7</b>	<b>-47,3</b>	<b>-30,5</b>

Tab. 35. Separierungsquoten (%) der kombinierten Clusteranalyse über *Baseline* und *Keeper-dependent* anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei *gBM*, *pBM* und *psBM*; \* = zusätzliche Separierung nach Bedingungen erkennbar

Spieler	gBM		pBM						psBM	
			LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK			
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
DR	39,1	80*	30,4	24	47,8*	72*	91,3*	100*	47,8	39,1
MB	70,8*	25	37,5	16,7	37,5	37,5	45,8	16,7	50	70,8
ML	56	30,4	36	30,4	24	21,7	24	37,9	24	56
MR1	35,7*	60	39,3	25	64,3*	45	42,9	65	78,6	35,7
RP	95,8	45,8	54,2	83,3	75	41,7	50	58,3	58,3	95,8
RS	44*	52,2*	44	52,2	32	52,2	48	52,2	48	52,2
SZ	65*	67,9	55	35,7	55	42,9	90	50	60*	65
TS	52*	52,2	44	43,5	44	30,4	72	73,9	48	52
$\bar{x}$	<b>59,2</b>	<b>51,6</b>	<b>42,3</b>	<b>36,9</b>	<b>49,7</b>	<b>41,6</b>	<b>59,4</b>	<b>57,4</b>	<b>52,4</b>	<b>59,2</b>

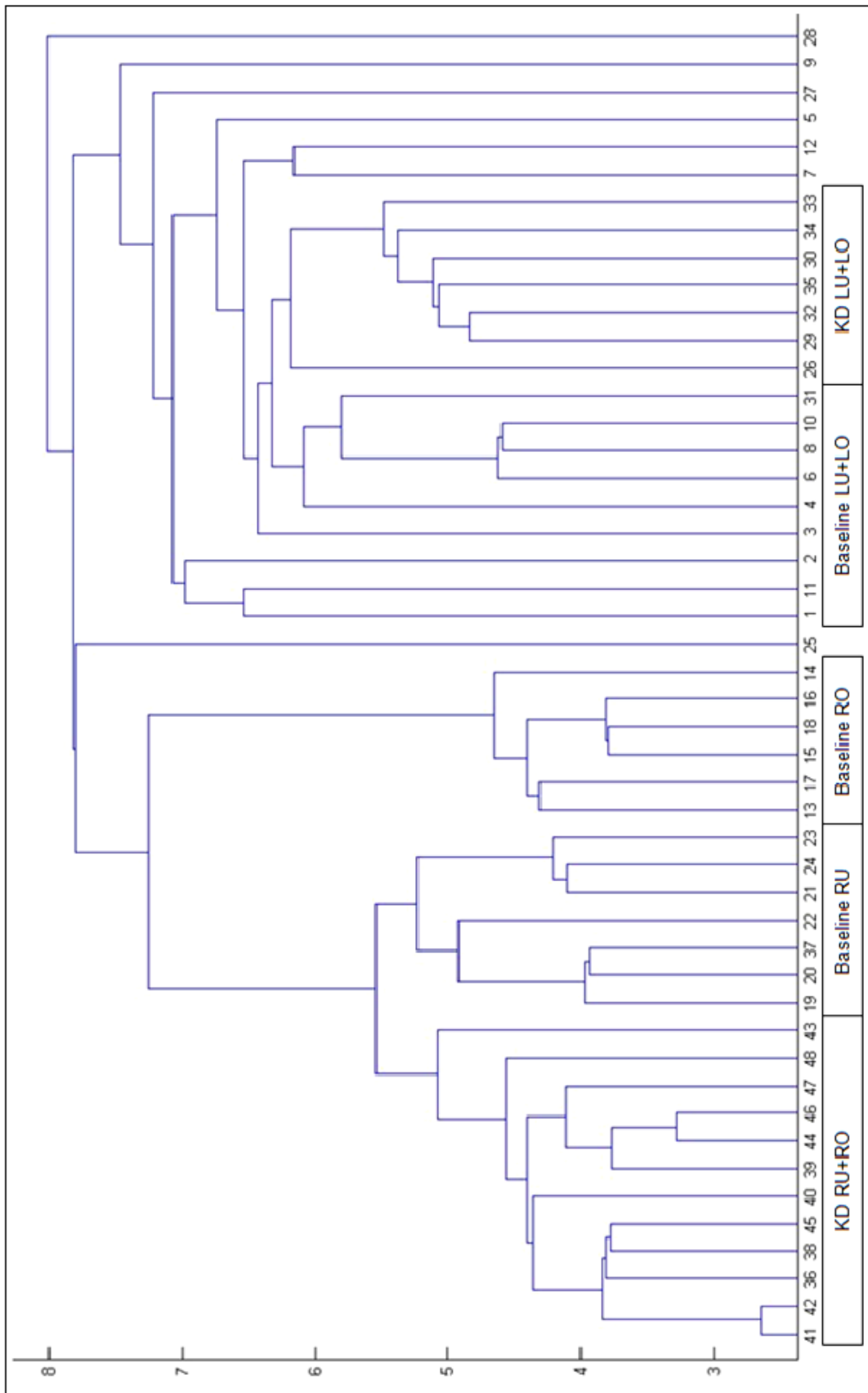


Abb. 79. Dendrogramm des Spielers DR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Vergleich Baseline mit Keeper-dependent); Nummerierung: 1-12 und 25-35 = links; 13-24 und 36-48 = rechts

## (b) Interpretation

Im Vergleich der Bewegungsmuster aus den Bedingungen *Baseline* und *Keeper-dependent* gehen aus Tabelle 34 durchgängig geringere Erkennungsraten für die Schussrichtungen links und rechts hervor. Am stärksten zeigt sich ein Abfall bei den Zielfeldern auf der linken Seite des Tores für die ganzheitlichen Bewegungsmuster, phasenbezogenen Bewegungsmuster LVS-LLS und phasensegmentbezogenen Bewegungsmuster um etwa 45%. Die Separierungsquoten zeigen beidseitig beim phasenbezogenen Bewegungsmuster LLS-STB sowie den Strafstoßen nach rechts beim phasenbezogenen Bewegungsmuster STB-BK der Bedingung *Keeper-dependent* im Vergleich zu den Trennungsraten der Bedingung *Baseline* die geringsten Unterschiede.

Die Gruppenmittelwerte der phasenbezogenen Bewegungsmuster für die Bedingung *Baseline* fallen von Phase LVS-LLS (77,6%) zur Phase LLS-STB (72,9%) und steigen in der letzten Phase stärker an (84,4%). Im Vergleich hierzu zeigen die prozentualen Gruppenmittelwerte der Bedingung *Keeper-dependent* einen kontinuierlichen Anstieg von Phase LVS-LLS (40,4%) zur Phase STB-BK (64,0%) auf einem geringeren Separierungsniveau. Der Spieler DR zeigt bei den phasenbezogenen Bewegungsmustern LVS-LLS und LLS-STB geringe Erkennungsraten. Seine Bewegungsmuster werden in der letzten Phase STB-BK sehr gut separiert (siehe Kapitel 5.5.3.2). Dieser Verlauf spiegelt sich in den phasenbezogenen Bewegungsmustern der Bedingung *Baseline* nicht wieder. Bereits in der Phase LLS-STB werden die Strafstoße für die Schussrichtungen links (100%) und rechts (91,6%) sehr deutlich getrennt. Die festgestellte Veränderung des Anlaufes bei Proband RS führt in allen Phasen der Bedingung *Baseline* zu einer richtungsspezifischen Trennung von 100%. In der Bedingung *Keeper-dependent* kann keine eindeutige Trennungsquote festgehalten werden (links: 61,5%; rechts: 72,7%). Dies ist bedingt durch eine ausbleibende Veränderung des Anlaufwegs zum Ball zwischen den Schussrichtungen, wie es in der Bedingung *Baseline* der Fall ist. Spieler MR1 weist anhand der Clusteranalysen für die phasenbezogenen Bewegungsmuster LVS-LLS und STB-BK der Bedingung *Baseline* deutliche Separierungsraten auf. Im Vergleich mit der Bedingung *Keeper-dependent* sind für MR1 über alle phasenbezogenen Bewegungsmuster die undeutlichsten Trennungsquoten festzuhalten.

Beim direkten Vergleich aller Strafstoße aus beiden Bedingungen ist aus Tabelle 35 abzulesen, dass wenige Spieler eine Abgrenzung der Schüsse nach den Bedingungen in der Clusteranalyse zeigen und somit keine grundsätzliche Veränderung der Bewegungsmuster für einzelne Bedingungen auftreten. In Bezug auf das Erkennen der Schussrichtungen schwanken die Prozentwerte für die verschiedenen Bewegungsmuster zwischen 16,7% und 100%. Die Schussrichtungen links und rechts werden für die Strafstoße der Bedingung *Baseline* deutlicher abgetrennt als die Schüsse der Bedingung *Keeper-dependent*. Das Dendrogramm der Phase STB-BK von Spieler DR trennt auf der zweiten Separierungsebene die Schüsse nach den Bedingungen in zwei Cluster (Abbildung 79). Am linken Rand des Dendrogramms gruppiert die Clusteranalyse alle Schüsse auf die rechten Zielfelder. Innerhalb der Gruppierung bilden sich drei Subcluster heraus. Zwei reine Sub-



cluster beinhalten 92,3% (*Keeper-dependent*) und 50% (*Baseline*) der Strafstöße. Die übrigen Schüsse fallen in ein drittes mehrheitliches Subcluster mit Strafstößen aus der Bedingung *Baseline*. Die beiden Cluster für die Bedingung *Baseline* separieren die Schüsse für die Zielfelder RU und RO zu 100%. Für die Strafstöße auf die linken Zielfelder grenzt die Clusteranalyse vier bzw. sieben Schüsse der Bedingungen ab. Weitere Schüsse fallen in Einzelcluster oder kleinere Gruppierungen. Die Struktur der Schüsse auf die linke Seite ist nicht so deutlich wie für das Cluster der Schussrichtung rechts, so dass stärkere Veränderungen bei den Bewegungsmustern auf die rechten Zielfelder anzunehmen sind.

#### 5.2.3.3.5 Schlussfolgerung

Die Anwendung der torwartabhängigen Strategie zeigt bei der richtungsspezifischen Erkennung von Bewegungsmustern in der Bedingung *Keeper-dependent* eine geringere Separierungsquote im Vergleich zur Bedingung *Baseline*. Die Mittelwerte der phasenbezogenen Bewegungsmuster nehmen zum Ballkontakt hin deutlich zu. Somit ist wahrscheinlich eine Unterdrückung der Bewegungsabsichten – eine Vermutung für die Bedingung *Keeper-independent* – in dieser Aufgabenstellung weniger gegeben, da aufgrund der beobachteten Torwartaktion eine adäquate Bewegungsantwort ausgeführt werden könnte. Eine andere Erklärung wäre ein bewusstes Anzeigen einer Schussrichtung als Täuschungsmanöver, um dann kurz vor dem Ballkontakt in das entgegengesetzte Zielfeld zu schießen. In Bezug auf die Anlaufzeit treten keine Veränderungen im Mittelwert auf. Die individuelle Betrachtung der Anlaufzeiten im Vergleich zur Bedingung *Baseline* zeigt bei fünf Probanden eine Tendenz in der Bedingung *Keeper-dependent* schneller anzulaufen (-103ms). Aus praktischer Sicht scheint diese geringe Anpassung ungünstig, da grundsätzlich bei kürzerer Anlaufzeit die Bewegung dynamischer wird und somit eine Bewegungsreaktion auf den Torwart schwieriger umzusetzen ist.

#### 5.2.3.4 *Point of no return*

##### 5.2.3.4.1 Intra-individueller Vergleich mittels ganzheitlicher Bewegungsmuster

###### (a) Darstellung

Tab. 36. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei gBM (*Point of no return*)

Spieler	Schussrichtung links	Schussrichtung rechts
AM	75	58,7
DJ	73,3	33,3
EH	53,9	45,5
MR2	23,1	45,5
SW	58,3	36,4
SZ	44,4	85,7
UR	78,6	30
$\bar{x}$	<b>58,1</b>	<b>47,9</b>

Tab. 37. Mittelwert ( $\bar{x}$ ) und Standardabweichung ( $s$ ) der Verarbeitungszeit (ms) bei Strafstoßen mit einem Wechsel der Schussrichtung (Point of no return)

Spieler	$\bar{x}$	s
AM	638,08	75,55
DJ	548,08	85,92
EH	492,00	101,11
MR2	407,58	105,88
SW	582,08	97,04
SZ	667,50	57,57
UR	635,67	130,50
$\bar{x}$	<b>567,29</b>	<b>93,37</b>

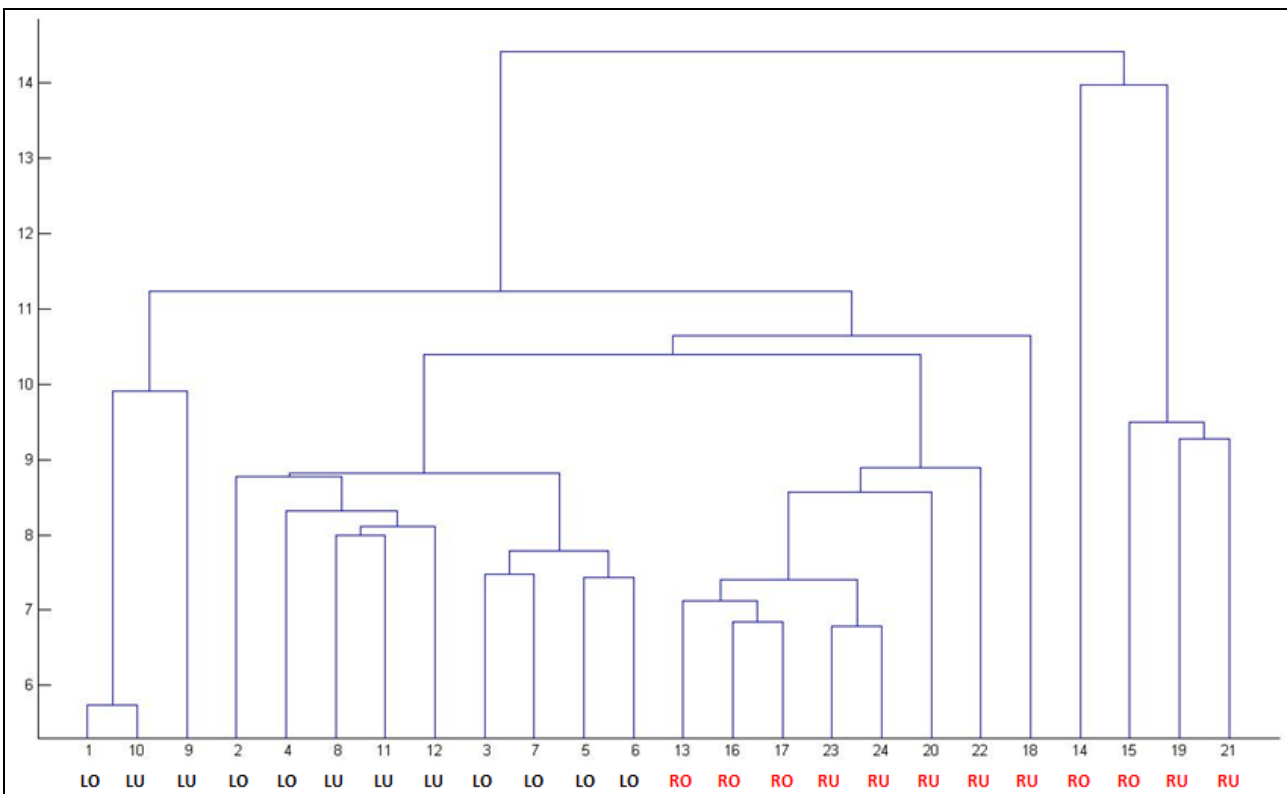


Abb. 80. Dendrogramm des Spielers AM anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Point of no return)

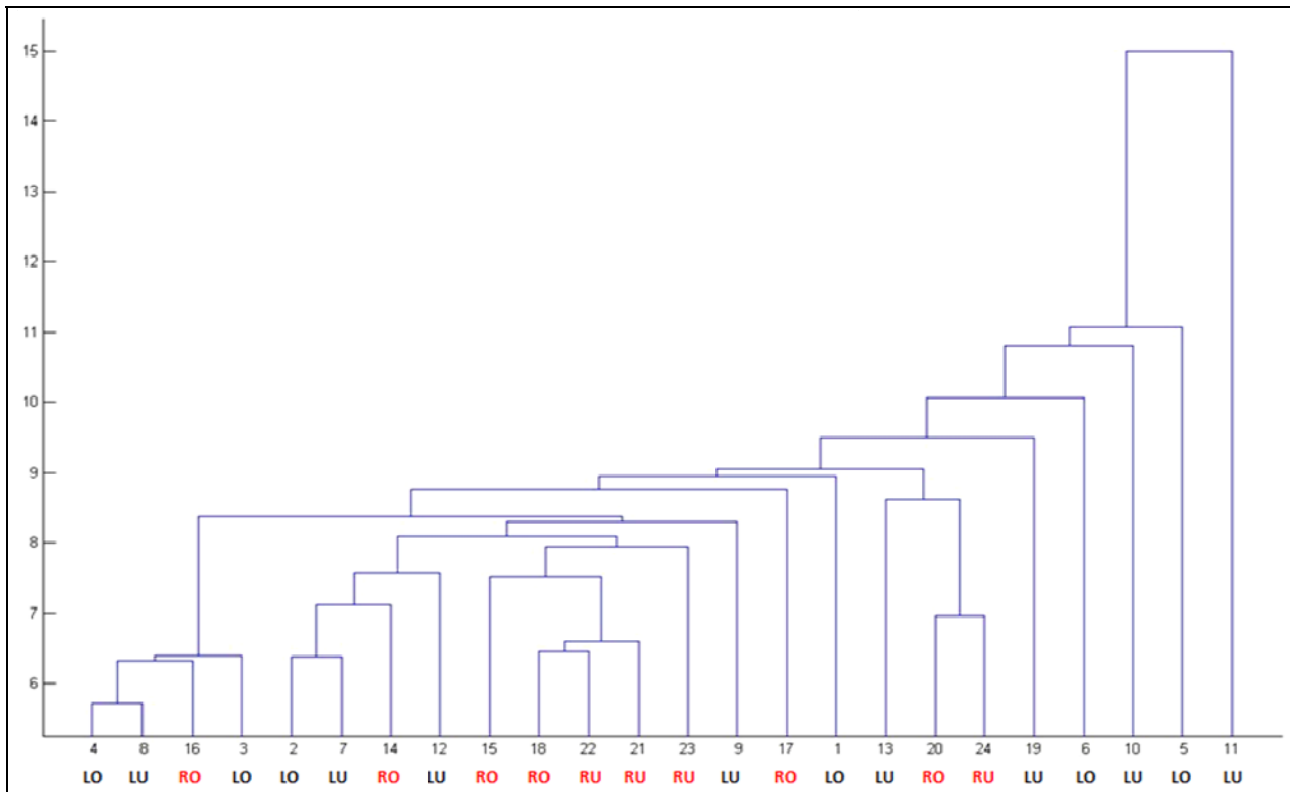


Abb. 81. Dendrogramm des Spielers MR2 anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten bei gBM (Point of no return)

### (b) Interpretation

Die Clusteranalysen über Bewegungsmuster von sieben Spielern ergeben eine Trennung nach Schussrichtungen von 58,1% (links) und 47,9% (rechts). Über alle Spieler zeigt sich eine Streuung für die richtungsspezifischen Cluster zwischen 23,1% und 85,7%. Die drei höchsten Erkennungsraten treten bei den Probanden AM, SZ und UR auf. Ursache für dieses Ergebnis könnten die unterschiedlichen Zeitpunkte der LED-Aktivierung sein, welche unterschiedlich lange Verarbeitungszeiten  $\Delta t_V$  bis zum Ballkontakt ergeben (Tabelle 37). Die Betrachtung der durchschnittlichen  $\Delta t_V$  von 12 Strafstößen mit Richtungswechsel deutet an, dass die Erkennungsraten der individuellen Clusteranalysen deutlichere Trennungen zwischen den Schussrichtungen vorweisen, wenn  $\Delta t_V$  größer ist. Die Probanden AM, SZ, UR haben bei ihren Ausführungen der Strafstöße die längsten Zeitphasen zwischen Aktivierung der LED-Lampe und Ballkontakt. Im Gegensatz bleiben Spieler MR2 bei den Schüssen mit Wechsel der Schussrichtung durchschnittlich  $407,58 \pm 105,88\text{ms}$  bis zum Ballkontakt. Die Clusteranalyse von MR2 gibt die geringste Separierungsquote von 23,1% (links) und 45,5% (rechts) zurück.

In den Abbildungen 80 und 81 sind die Spieler AM und MR2 mit einer deutlichen und undeutlichen Trennung gegenüber gestellt. Die Clusteranalyse von AM trennt eine kleine Gruppe von Strafstößen in die Zielfelder RU und RO auf der ersten Ebene ab. Auf der zweiten Ebene des Dendrogramms wird ein Cluster mit drei Schüssen auf die linken Zielfelder abgegrenzt. Eine gute richtungsspezifische Trennung erfolgt auf der nächsten Ebene, so dass 75% (links) und 58,7% (rechts) der Schüsse gruppiert werden. Innerhalb des großen Clusters „links“ ist die Sepa-

rierung nach Schusshöhe zu erkennen. Des Weiteren stellt die Gruppe mit den Versuchen 3, 5, 6 und 7 Schüsse mit Richtungswechsel und die Nummern 2, 4, 8 und 11 Schüsse ohne Richtungswechsel dar. Diese klare Trennung ist für die Strafstöße nach rechts nicht festzustellen.

Abbildung 81 präsentiert das Ergebnis der Clusteranalyse für den Probanden MR2, welches nach einem kettenförmigen Beginn drei Cluster herausbildet. Am linken Rand besteht ein mehrheitliches Cluster für die Schussrichtung links. Ein großes gemischtes Cluster unterteilt sich in zwei Subcluster. Auf der einen Seite enthält es mehrheitlich Strafstöße der linken Zielfelder und auf der anderen Seite bildet es eine reine Gruppierung „rechts“. Das dritte Cluster auf der rechten Seite schließt drei Schüsse beider Richtungen ein. Mit einem Blick auf die Anforderungen der Strafstöße zeigt sich, dass die gebildeten Gruppen die Strafstöße auch bezüglich eines Schusswechsels separieren. Das Cluster mit den Schüssen 3, 4, 8 und 15 umfasst drei von vier Strafstößen mit einem Richtungswechsel während des Anlaufs. Das große Cluster unterteilt in seinen Subclustern Bewegungsmuster von Strafstößen ohne Richtungswechsel nach den Schussrichtungen mehrheitlich (75% bzw. 80%). Die Gruppierung mit den Schüssen 13, 20 und 24 beinhaltet nur Strafstöße ohne Richtungswechsel.

#### 5.2.3.4.2 Intra-individueller Vergleich phasenbezogener Bewegungsmuster

##### (a) Darstellung

Tab. 38. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM (Point of no return)

Spieler	LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AM	66,6	33,3	25	75	83,3	91,6
DJ	66,6	33,3	86,7	22,2	80	44,4
EH	23,1	54,5	15,4	63,6	69,2	72,7
MR2	7,7	27,3	30,8	90	100	100
SW	16,6	18,2	16,6	45,5	41,6	54,5
SZ	22,2	14,3	22,2	57,1	100	100
UR	54,1	20	85,7	100	100	100
$\bar{x}$	<b>36,7</b>	<b>28,7</b>	<b>40,3</b>	<b>64,8</b>	<b>82,0</b>	<b>80,5</b>

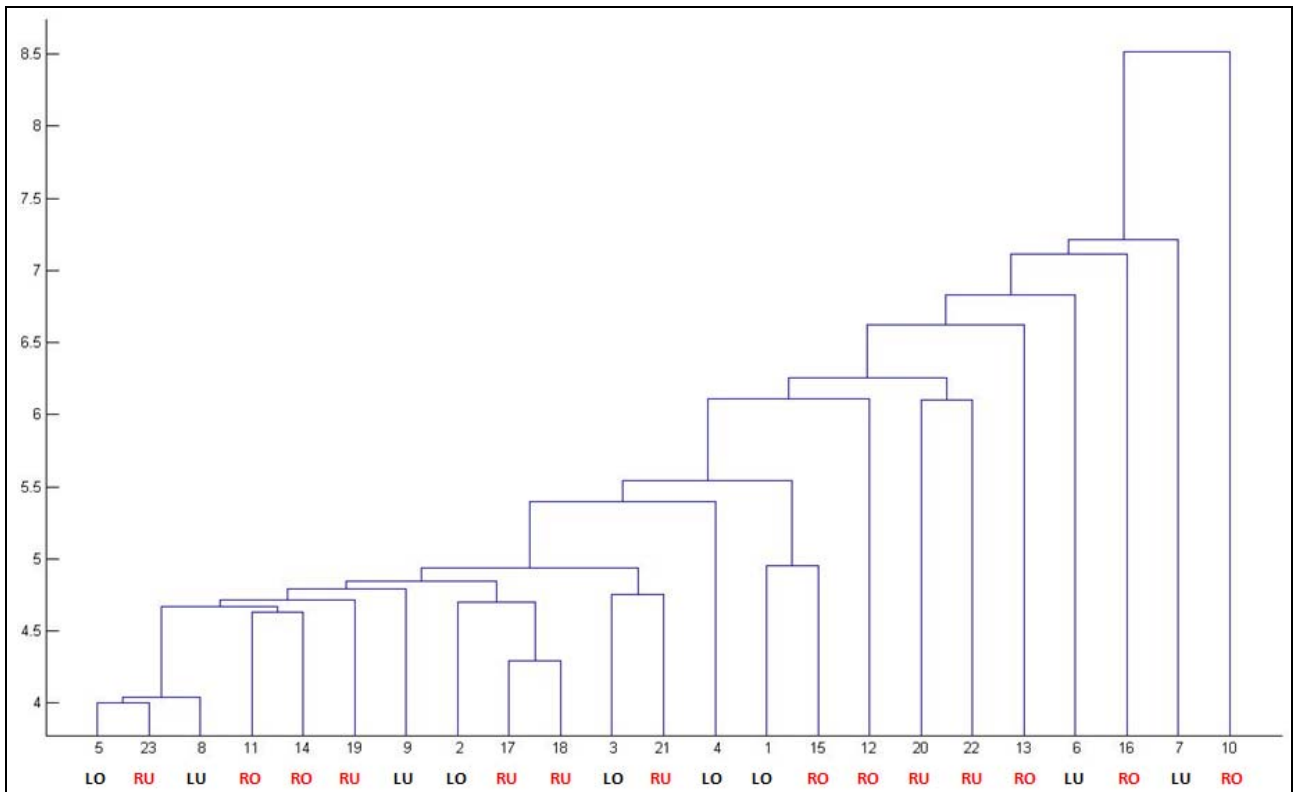


Abb. 82. Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LVS-LLS (Point of no return)

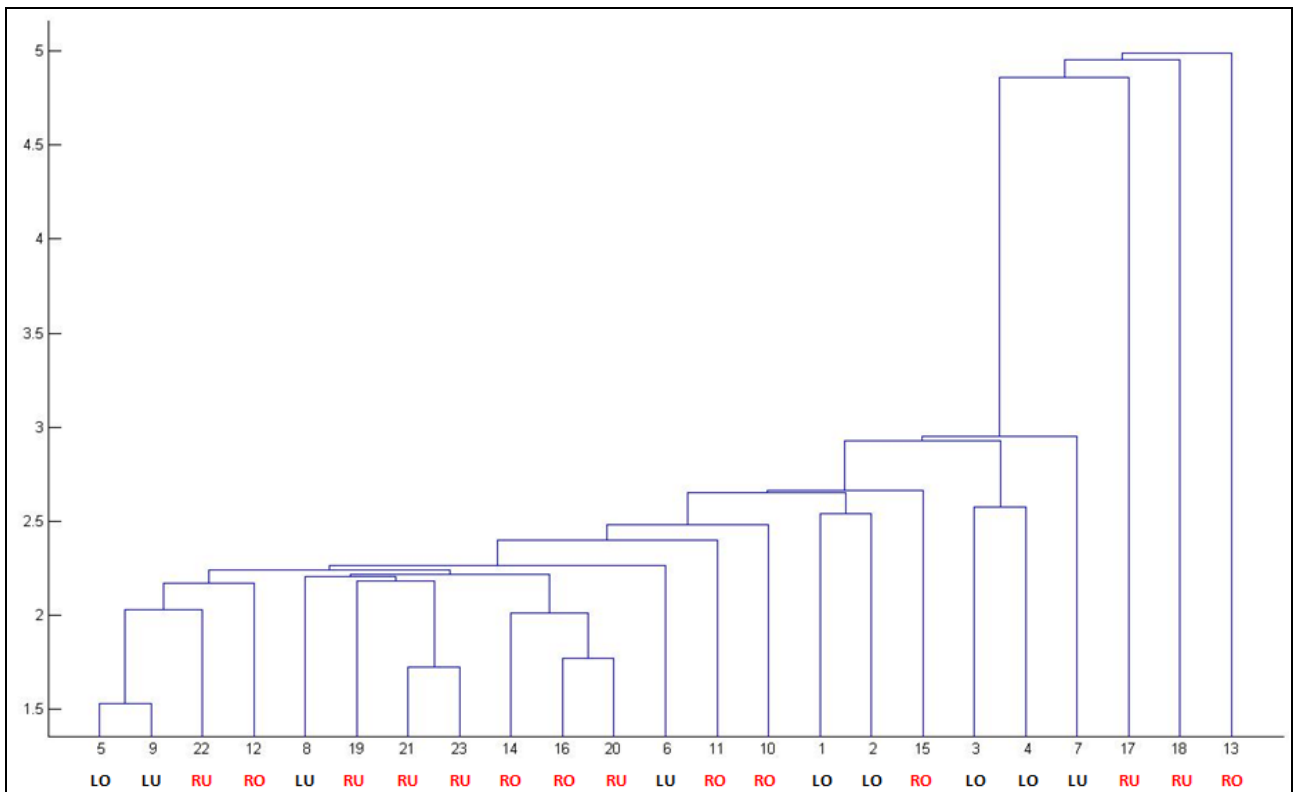


Abb. 83. Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM LLS-STB (Point of no return)

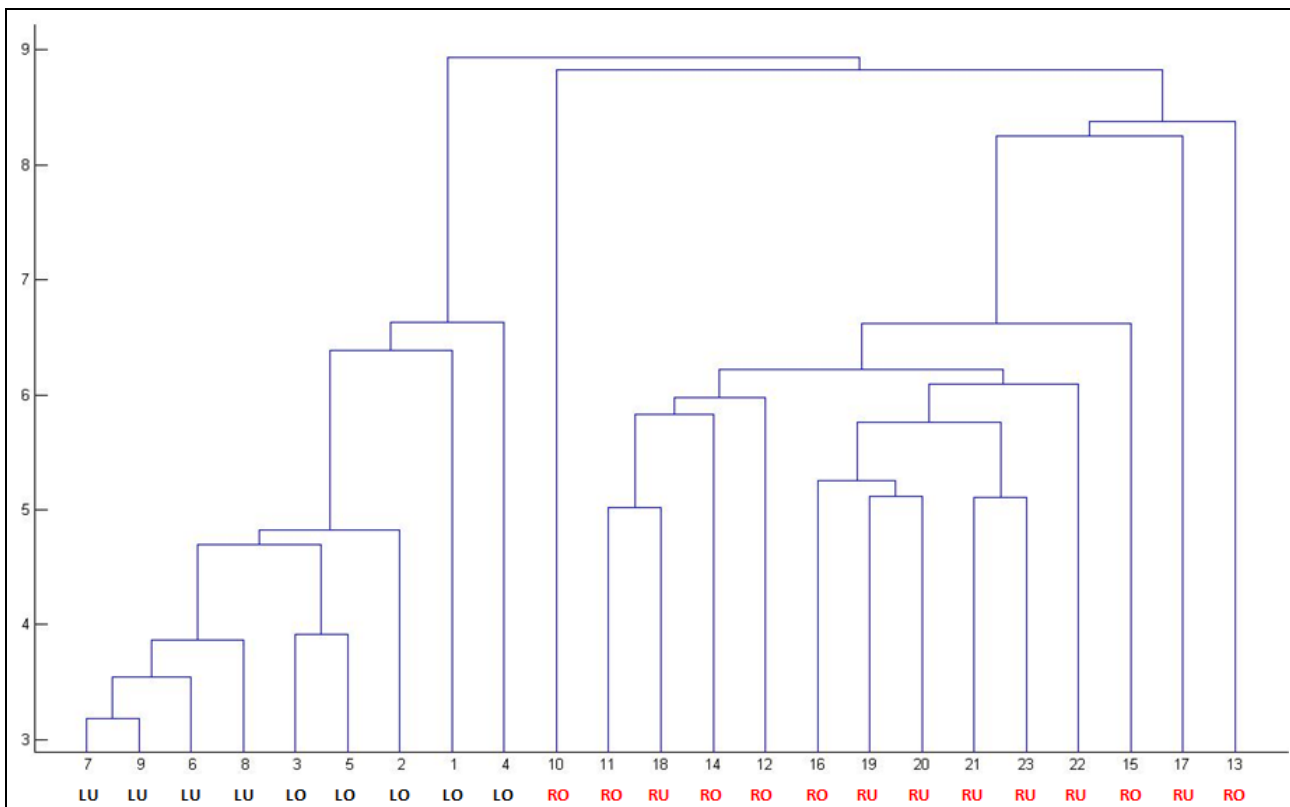


Abb. 84. Dendrogramm des Spielers SZ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM STB-BK (Point of no return)

### (b) Interpretation

Die phasenbezogene Untersuchung der Bewegungsmuster ergibt eine steigende Erkennungsrate von der ersten Phase LVS-LLS (links: 36,7%; rechts: 28,7%) bis zur letzten Phase STB-BK (links: 82,0%; rechts: 80,5%). Früh im Anlauf können die Bewegungsmuster der Spieler AM und DJ im Vergleich zu den anderen Trennungsquoten richtungsspezifisch unterschieden werden. In der Phase LLS-STB gibt die Clusteranalyse die deutlichste Trennung der Schussrichtungen für Proband UR mit 85,7% (links) und 100% (rechts) zurück. Mehrheitlich über dem Schnitt liegen die Separierungsraten in der letzten Phase STB-BK. Stärker fallen die Erkennungsraten von den Spielern SW (links: 41,6%; rechts: 54,5%) und DJ (rechts: 44,4%) ab.

Im Folgenden werden die Dendrogramme des Spielers SZ angeführt, da dieser einen sprunghaften Anstieg der Erkennungsraten von der Phase LLS-STB zur Phase STB-BK zeigt. In der ersten Phase LVS-LLS ergibt die Clusteranalyse keine großen richtungsspezifischen Gruppierungen (Abbildung 82). Es bilden sieben Schüsse ein Einzelcluster, die übrigen Strafstöße werden in Clustern mit zwei oder drei Versuchen eingeordnet. Die wenig klare Struktur auf der linken Seite des Dendrogramms lässt sich durch Ergänzung der Informationen, ob ein Strafstoß mit Schussrichtungswechsel durchgeführt wird oder nicht, besser deuten. Bis auf Schuss 8, bilden alle Schüsse zwischen Nummer 5 und 9 ein mehrheitliches Cluster mit Strafstößen ohne Schussrichtungswechsel. Die Gruppe mit den Strafstößen 2, 17 und 18 beinhaltet Schüsse, bei denen während des Anlaufs die Schussrichtung wechselte. Das angrenzende Cluster der nächsten Ebene (Nummer 3 und 21) enthält wiederum

Schüsse ohne Wechsel der Schussrichtung. Das phasenbezogene Bewegungsmuster LLS-STB zeigt eine sehr undeutliche Trennung für die Schussrichtung links (Abbildung 83). Im Vergleich zur ersten Phase des Bewegungsmusters steigert sich die Erkennungsrate für die Strafstöße auf die rechten Zielfelder von 14,3% (LVS-LLS) auf 57,1% (LLS-STB). Auf einer tiefen Ebene des Dendrogramms gruppiert die Clusteranalyse acht Schüsse auf die rechte Seite in ein mehrheitliches Cluster. Dieses Cluster teilt sich weiter in drei Untergruppen auf. Zwei Subcluster enthalten Schüsse der Gegenseite. Betrachtet man wiederum die Strafstöße nach den Richtungswechseln, liefert die Separierung für alle drei Subcluster mehrheitliche Zusammensetzungen entweder für Schüsse mit (rechtes Subcluster) oder ohne Richtungswechsel (links, mittig). Die Phase STB-BK in Abbildung 84 separiert von der ersten Ebene an alle Strafstöße richtungsspezifisch in zwei Cluster. Am linken Rand des Dendrogramms werden die Strafstöße in das Zielfeld LU von Strafstößen in die Zone LO abgetrennt. Auch innerhalb des Clusters mit den Strafstößen auf die rechten Zielfelder ist eine Separierung von drei (RO) bzw. fünf (RU) Schüssen nach Schusshöhe zu erkennen. Die Zuweisung der Strafstöße nach Schüssen mit und ohne Wechsel der Schussrichtung ergibt in den bestehenden Clustern nur für die Gruppe 11, 12, 14 und 18 eine gruppenbezogene Separierung von 75%. Abschließend könnte aus den phasenbezogenen Erkennungsraten geschlossen werden, dass zu Beginn der Anlauf- und Schussbewegung die Spieler einen neutralen Bewegungsablauf ausführen, um auf einen möglichen Wechsel der Schussrichtung adäquat reagieren zu können. In der Phase STB-BK könnten sich die Spieler für eine Schussrichtung festgelegt haben, was sich durch die hohen Erkennungsraten für diese Phase ausdrückt. Der Beginn der letzten Phase mit dem Knotenpunkt STB liegt unterhalb von 200ms vor dem Ballkontakt. Somit erhalten die Spieler deutlich vor Beginn dieser untersuchten Phase die Information über einen Wechsel des Zielfelds (siehe Tabelle 38).

#### 5.2.3.4.3 Intra-individueller Vergleich mittels phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster

##### (a) Darstellung

Tab. 39. Separierungsquoten (%) der Clusteranalyse für das psBM Standbein (Point of no return)

Spieler	Schussrichtung links	Schussrichtung rechts
AM	58,3	75
DJ	13,3	11,1
EH	23,1	54,5
MR2	53,9	18,2
SW	83,3	63,6
SZ	88,9	85,7
UR	71,4	100
$\bar{x}$	<b>56,0</b>	<b>58,3</b>

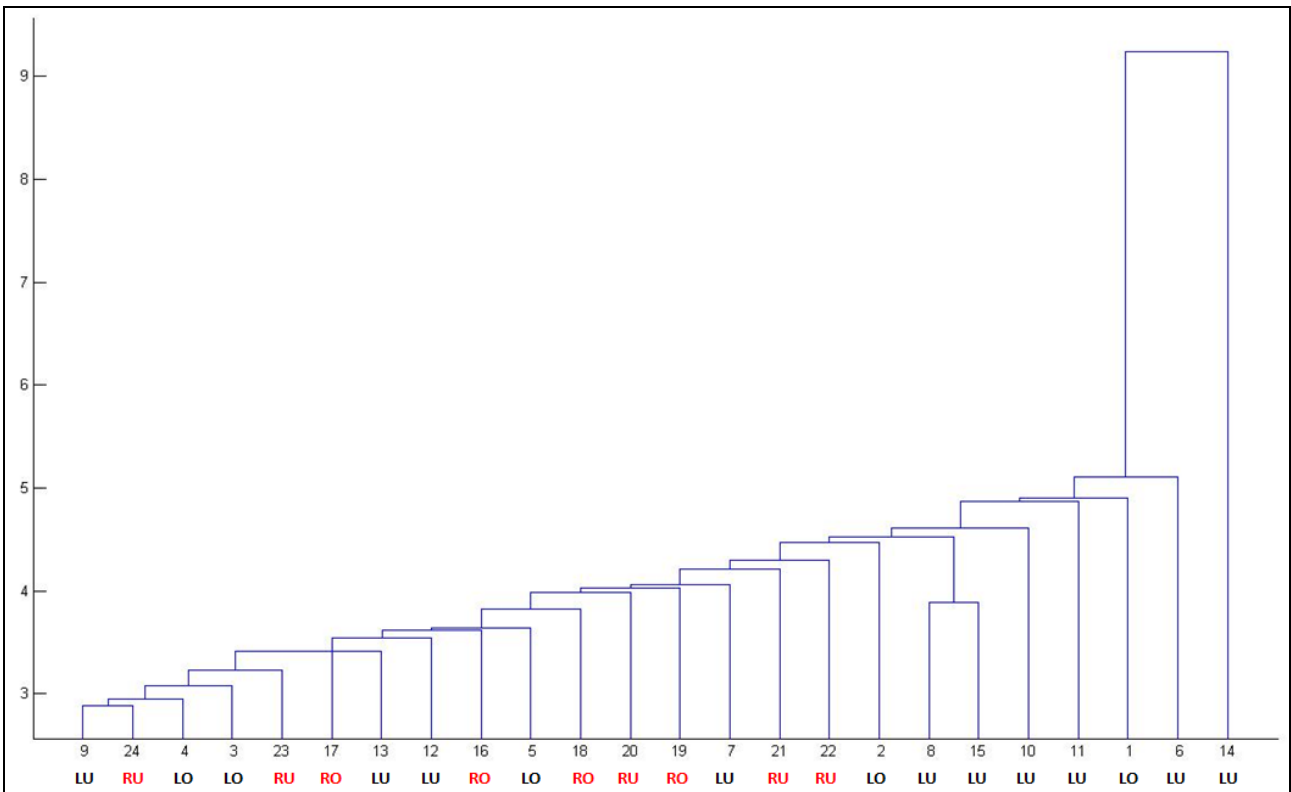


Abb. 85. Dendrogramm des Spielers DJ anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Point of no return)

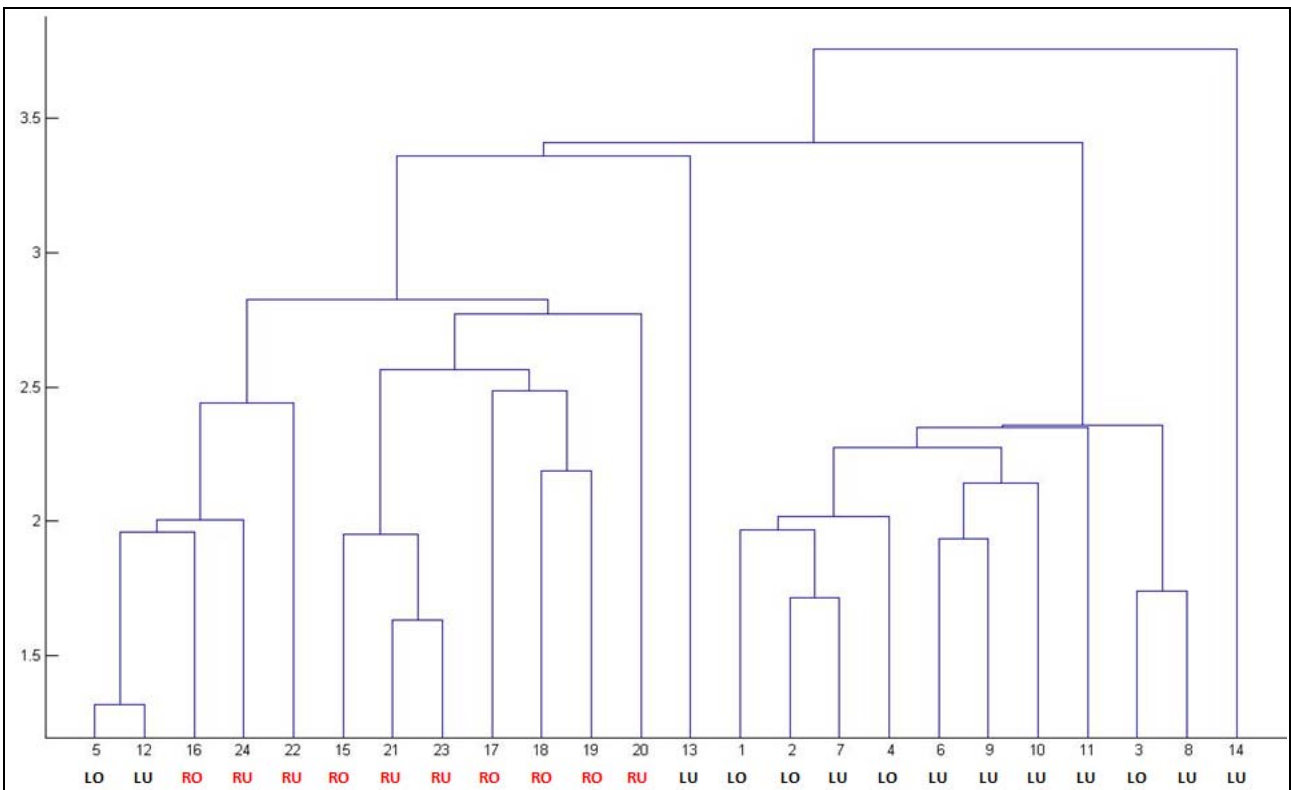


Abb. 86. Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das psBM Standbein (Point of no return)



### (b) Interpretation

Die Separierung der richtungsspezifischen Bewegungsmuster anhand des phasen-segmentbezogenen Bewegungsmusters Standbein liegt für die Gruppe bei 56% (links) und 58,3% (rechts). Deutlich höhere Erkennungsraten weisen die Spieler SW, SZ und UR auf. Für den Spieler DJ liegt eine sehr schlechte Trennung der Bewegungsmuster über dieses Merkmal vor. Die Clusteranalyse führt bei Spieler DJ zu einer Kettenbildung und zeigt keine Struktur im Dendrogramm (Abbildung 85). Im Vergleich zum phasenbezogenen Bewegungsmuster separiert das Bewegungsmuster des Segments Standbein die Schussrichtungen auf deutlich geringem Niveau. Die Bewegungsmuster des Standbeins zwischen den Schussrichtungen scheinen nicht stark zu variieren, so dass andere Körpersegmente einen größeren Anteil an der klaren Separierung der Strafstöße besitzen könnten.

Für den Probanden UR stellt das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster ein gutes Separierungsmerkmal dar. Abbildung 86 zeigt auf der ersten Ebene eine Abgrenzung eines einzelnen Strafstoßes in das Zielfeld LU. Ab der zweiten Ebene im Dendrogramm ergeben sich richtungsspezifische Gruppierungen. Die Distanzen zwischen den Schüssen innerhalb des Clusters „links“ sind etwas geringer im Vergleich zur Gegenseite. Eine weitere Aufteilung der Strafstöße nach der Schusshöhe ist nicht klar abzulesen. Die Zielfelder LU, LO und RO gruppieren jeweils 50% der Schüsse in einem Cluster.

5.2.3.4.4 Vergleich der Bewegungsmuster *Baseline* und *Point of no return*

## (a) Darstellung

Tab. 40. Gruppenbezogene Separierungsquoten (%) der Clusteranalysen anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte für die Bedingungen *Baseline* und *Point of no return* im Vergleich bei *gBM*, *pBM* und *psBM*

Bedingung	gBM		pBM						psBM	
			LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK			
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
Baseline	76,2	66,7	54,7	53,5	39,8	71,4	69,9	76,2	64,3	67,8
Point of no return	58,1	47,9	36,7	28,7	40,3	64,8	82,0	80,5	56,0	58,3
<b>Differenz</b>	<b>-18,1</b>	<b>-18,8</b>	<b>-18,0</b>	<b>-24,8</b>	<b>0,5</b>	<b>-6,6</b>	<b>12,1</b>	<b>4,3</b>	<b>-8,2</b>	<b>-9,5</b>

Tab. 41. Separierungsquoten (%) der kombinierten Clusteranalyse über *Baseline* und *Point of no return* anhand von Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei *gBM*, *pBM* und *psBM*; \* = zusätzliche Separierung nach Bedingungen erkennbar

Spieler	gBM		pBM						psBM	
			LVS-LLS		LLS-STB		STB-BK			
	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts
AM	79,2*	41,7	20,8	20,8	25	50*	69,6	58,3	34,8	45,8
DJ	14,8	33,3	37,3	33,3	22,2	14,3	40,7	19	55,5	28,6
EH	28*	43,5	12	30,4	20	47,8*	54,2*	82,6	33,3*	30,4*
MR2	36*	73,9	36	52,2	33,3	65,2	36	91,3	28*	52,2
SW	70,8	34,8*	37,5	34,8	29,2	56,5	62,5	65,2	75	82,6
SZ	61,9	26,9	28,6	30,8	19	19,2	76,2*	38,5	85,7	69,2
UR	73,1	22,7	38,5	13,6	38,5	54,5	76,9*	95,5*	38,5	81,8*
$\bar{x}$	<b>52,0</b>	<b>39,5</b>	<b>30,1</b>	<b>30,8</b>	<b>26,7</b>	<b>43,9</b>	<b>59,4</b>	<b>64,3</b>	<b>50,1</b>	<b>55,8</b>

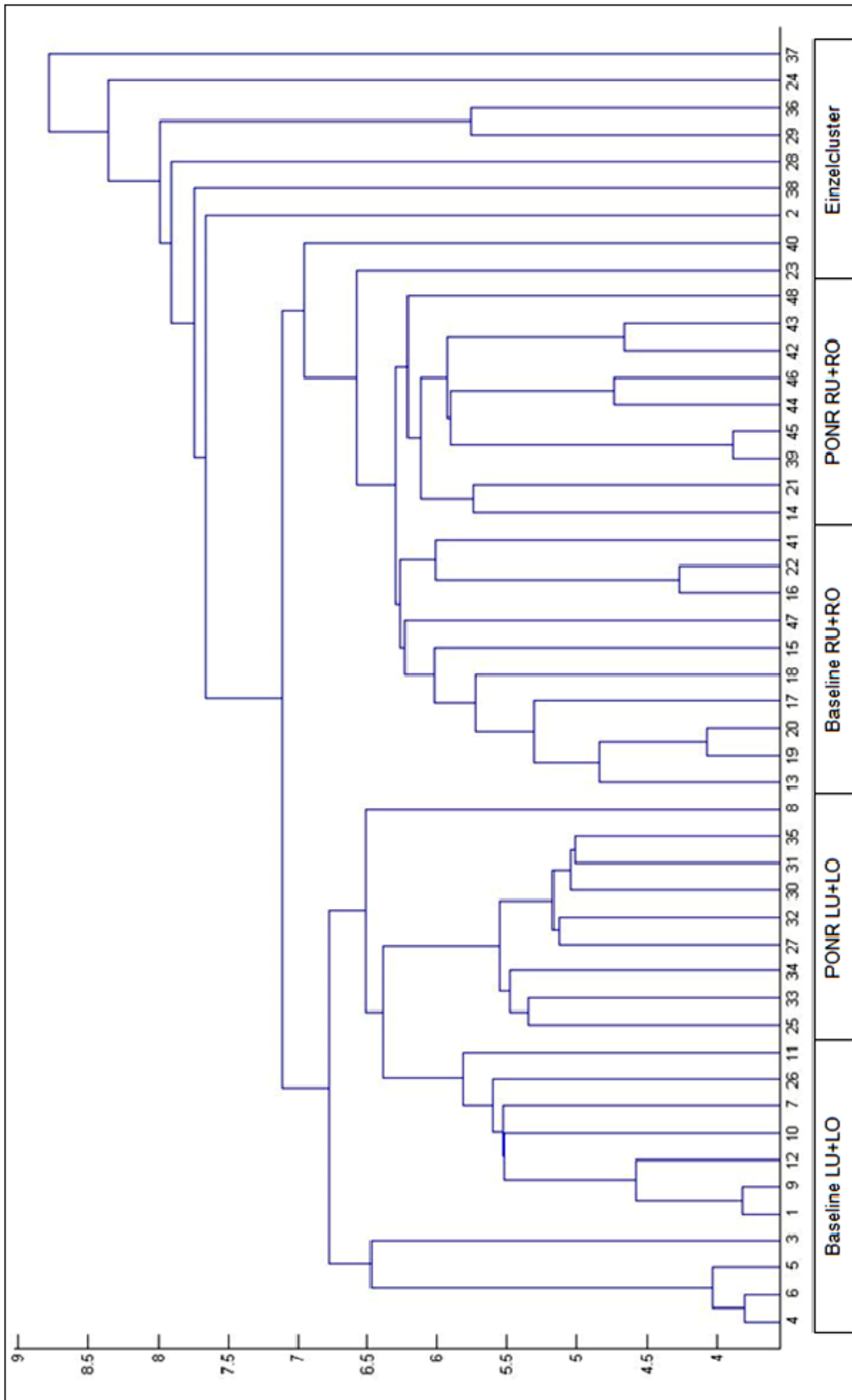


Abb. 87. Dendrogramm des Spielers UR anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten für das pBM-STB-BK (Vergleich Baseline mit Point of no return (PONR)); Nummerierung: 1-12 und 25-38 = links; 13-24 und 39-48 = rechts

### (b) Interpretation

Der Vergleich der sieben Probanden für die Bedingungen *Baseline* und *Point of no return* zeigt für ganzheitliche Bewegungsmuster eine Abnahme der Erkennungsraten für beide Richtungen um etwa 18% an. Die Analyse der einzelnen Bewegungsphasen der Anlauf- und Schussbewegung resultiert in steigenden Separierungsquoten von der Phase LVS-LLS bis zur Phase STB-BK und zeigt im Vergleich zu ganzheitlichen Bewegungsmustern ein differenzierteres Bild. In der ersten Phase LVS-LLS liegt die Separierungsquote für die Bedingung *Point of no return* deutlich unter den Erkennungsraten der Bedingung *Baseline* (links: -18,0%; rechts: -24,8%). In der mittleren Phase LLS-STB liegt die Trennungsquote beider Bedingungen auf ähnlichem Niveau. Die Erkennung der Strafstöße auf die rechte Seite fällt leicht um -6,6% ab. In der Phase STB-BK übertreffen die Separierungsraten der Bedingung *Point of no return* die Bedingung *Baseline* um 12,1% (links) und 4,3% (rechts) und trennen die Schüsse für beide Schussrichtungen ausgewogen auf hohem Niveau. Ein Rückgang der Erkennungsraten ist für das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster Standbein mit -8,2% (links) und -9,5% (rechts) festzuhalten.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die ganzheitlichen Bewegungsmuster ähnlicher sind und daher eine schlechtere Erkennung der Schussrichtungen gegeben ist. Durch die phasenbezogenen Bewegungsmuster ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den Bewegungsmustern in der letzten Phase am größten sein müssten, da hier eine gute Trennung durch die Clusteranalyse erreicht wird. Ein möglicher Erklärungsansatz für die niedrigen Erkennungsraten der ersten Phase LVS-LLS wäre ein neutral gewählter Anlauf, um auf einen möglichen Wechsel der Schussrichtung reagieren zu können. Diese mögliche Veränderung könnte zu ähnlicheren Bewegungsmustern führen. Für das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster Standbein ist im Vergleich zum phasenbezogenen Bewegungsmuster STB-BK eine deutlich geringere Separierung zu verzeichnen. Das Standbein ist für die Spieler dieser Gruppe im Durchschnitt kein eindeutiger kinematischer Hinweisreiz.

Im direkten Vergleich der ganzheitlichen, phasenbezogenen und phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster beider Bedingungen in einer Clusteranalyse sind vereinzelt bedingungsbezogene Trennungen zu erkennen. Die Spieler AM und EH zeigen in ihren Dendrogrammen eine gute Trennung für die Bedingungen innerhalb der Schussrichtung links bei ganzheitlichen Bewegungsmustern. Das Clustern nach Bedingungen ist in der Phase LVS-LLS nicht festzustellen. In der zweiten Phase trennen die Clusteranalysen für AM und EH (rechts) und UR (links) einen Teil der Schüsse nach Bedingungen. Die beste Separierung nach Bedingungen liegt in der letzten Phase mit steigender Erkennungsrate vor (AM, EH und UR). Ähnliche Ergebnisse ergeben sich anhand der Clusteranalysen mit phasen-segmentbezogenen Bewegungsmustern.

Abbildung 87 zeigt die Clusteranalyse für Proband UR in der Phase STB-BK. Als erstes Trennungskriterium bildet sich die Schussrichtung heraus (links: 76,9%; rechts: 95,5%). In Subclustern werden die Schüsse nach den Bedingungen gruppiert. Die Zuteilung der Strafstöße für die linke Seite beträgt 50% (*Baseline*) bzw.

57,1% (*Point of no return*). Eine Gruppe mit vier Strafstoßen in das Zielfeld LU wird gesondert geclustert. Für die Gegenseite fallen 66,6% (*Baseline*) und 70% (*Point of no return*) in ein Cluster.

#### 5.2.3.4.5 Schlussfolgerung

Die Bedingung *Point of no return* ist von der Handlungsstrategie der Schützen mit der Bedingung *Keeper-dependent* gleichzusetzen. Die Trennungsquoten bei ganzheitlichen Bewegungsmustern und die Entwicklungstendenz von phasenbezogenen Bewegungsmustern spiegeln dies auch wieder. Ein erheblicher Unterschied besteht jedoch in der Höhe von Separierungsraten in der Phase STB-BK mit einer durchschnittlichen Differenz von 17,2%. Zudem stellt die Erkennungsrate in dieser Phase die deutlichste Klassifizierung der ganzen Untersuchung dar, obwohl gezielt unter Zeitdruck eine Bewegungsantwort von den Spielern verlangt wird. Eine Erklärung könnten zum einen unterschiedliche Zeitpunkte der „Torwartaktion“ sein. Es wäre zu prüfen, ob in der Bedingung *Point of no return* die Aktivierung der LED-Lampen bei einem Schusswechsel deutlich früher als die reale Torwartaktion in der Bedingung *Keeper-dependent* auftritt. Zum anderen wird das Fehlen eines aktiven Torwarts seine Wirkungen haben, die aber hier nicht festgestellt werden können. Zudem stellt es einen Unterschied dar, bei 12 von 24 Schüssen einen Wechsel in der Bedingung *Point of no return* auszuführen oder bei 24 Schüssen in der Bedingung *Keeper-dependent* stets auf eine mögliche gleichgerichtete Torwarthandlung zu reagieren.

#### 5.2.4 Zusammenfassung

In vier Untersuchungsbedingungen, in denen durch einbinden eines Torwarts wett-kampfnah Handlungsstrategien eingesetzt wurden, sind sowohl resultatbezogene als auch prozessorientierte Merkmale erhoben worden, um Veränderungen über die Aufgabenstellungen festzustellen. Die verlaufsorientierten Merkmale sind Grundlage für die Individuen bezogene, richtungsspezifische und bedingungsabhängige Mustererkennung in der Strafstoßsituation.

Die Spieler zeigen die höchste durchschnittliche Trefferquote in der Bedingung *Baseline*. Im Vergleich hierzu sind die Trefferquoten in den weiteren Bedingungen geringer. Der Abfall könnte zum einen über den erhöhten Druck in den Bedingungen *Keeper-independent* und *Keeper-dependent* durch Hinzunehmen eines Torhüters und zum anderen über die vorgegebenen Strategien erklärt werden.

Die Anlaufzeit ist über alle Bedingungen sehr schwankend. Es zeigen sich keine einheitlichen Veränderungen im zeitlichen Anlaufverhalten für eine Gruppe, wenn die Zeiten zwischen den Bedingungen verglichen werden. Am schnellsten laufen die Spieler in der Bedingung *Point of no return* an. Nur unwesentlich länger benötigen die Spieler für die letzten drei Meter in der Bedingung *Keeper-independent*. Auf ähnlichem Niveau liegen die Anlaufzeiten der Bedingungen *Baseline* und *Keeper-dependent*. Die Erwartung, dass die Differenz der Anlaufzeit in der Bedingung *Keeper-independent* zur Bedingung *Baseline* am geringsten wäre, zeigen die Ergebnisse nicht. Möglicherweise versuchen die Spieler, vor dem Hintergrund der strategi-

schen Vorgabe nicht mehr auf die Torwartbewegung reagieren zu können, die Bewegung schneller auszuführen, um die Zeit des Torwarts zur Antizipation zu reduzieren. Im Gegensatz könnte die ähnlich lange Anlaufzeit der Bedingung *Keeper-dependent* zur *Baseline* durch eine Verlängerung der Antizipationszeit des Schützen bedingt sein. Zudem wäre eine Änderung der Schussrichtung und somit des Bewegungsvollzugs einfacher bei geringerer Geschwindigkeit durchzuführen.

Die Variabilitätskoeffizienten für die ganzheitlichen Bewegungsmuster der Merkmale Winkel und Winkelgeschwindigkeit nehmen kleinere Werte an als für die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte. Die Gruppenmittel für die Zielfelder schwanken bei allen Merkmalen wenig. Im intra-individuellen Vergleich der Variabilitätskoeffizienten zeigen sich teilweise starke Vergrößerungen oder Verkleinerungen bei den Variabilitätskoeffizienten. In Bezug auf die Variabilitätskoeffizienten der phasenbezogenen Bewegungsmuster zeigt sich ein ähnliches Bild. Die bestehenden Schwankungen für einzelne Zielfelder treten nicht stabil über alle Phasen hinweg auf, so dass keine gleichbleibende Struktur zu erkennen ist. Die Variabilitätskoeffizienten für das Merkmal Winkel-Verlauf liegen im Durchschnitt der einzelnen Zielfelder auf einem Niveau. Zur Phase STB-BK nehmen bei 76,2% der Spieler die Variabilitätskoeffizienten ab. Auch die Variabilitätskoeffizienten des Merkmals Winkelgeschwindigkeit sind stabil und erhöhen sich nur leicht von der Phase LVS-LLS bis zur Phase STB-BK. Diese Tendenz ist bei 66,7% der Probanden zu beobachten. Die Variabilitätskoeffizienten für die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte zeigen größere Veränderungen zwischen den Phasen. Entweder steigt der Variabilitätskoeffizient von der Phase LVS-LLS zur Phase LLS-STB an, um in der letzten Phase wieder abzunehmen. Oder es tritt ein stetiger Abfall der Variabilität über die Phasen hinweg auf. Bei 90,5% der Spieler sind in der letzten Phase STB-BK die Variabilitätskoeffizienten am niedrigsten. Die grundlegende Variabilität zwischen den Bewegungsausführungen kann nach Egan et al. (2007) unter dem Aspekt ‚motor equivalence‘ betrachtet werden. Unterschiedliche motorische Ausführungen können demnach zum gleichen Bewegungsergebnis führen. Die in der Literatur aufgeführte funktionale Variabilität besagt, dass größere Schwankungen in der Bewegung dazu dienen, konstante Endbedingungen zu erreichen (vgl. Schmidt, 2010). Bezogen auf die Strafstoßbewegung würden die Spieler über eine erhöhte Variabilität in der Phase vor dem endgültigen Standbeinaufsatz eine günstige Ausgangsposition erzielen, um den Ball situationsgerecht zu schießen.

Die Unterscheidung von Individuen anhand ihrer ganzheitlichen Bewegungsmuster kann für die Merkmale Winkel-Verlauf (91%), Winkelgeschwindigkeit (93%) und Verlauf der Gelenkmittelpunkte (81%) auf hohem Niveau gezeigt werden. Winkelbezogene Merkmale scheinen am deutlichsten eine individuelle Ausprägung im Bewegungsablauf darzustellen. Im Vergleich zur Studie von Schorer et al. (2007), bei denen die Zuteilungsraten von Versuchen zu Individuen bei durchschnittlich 83,2% liegen, können mindestens gleichwertige Separierungsraten erreicht werden.

Eine intra-individuelle Erkennung der Schussrichtungen in der Bedingung *Baseline* führt anhand der Clusteranalysen von ganzheitlichen Bewegungsmustern für die

Merkmale Winkel (links: 72,2%; rechts: 41,2%) und Winkelgeschwindigkeit (links: 66,2%; rechts: 41,5%) zu ähnlichen Separierungsquoten. Bessere Trennungsquoten erzielt das Clustern der Strafstöße für die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte (links: 78,2%; rechts: 77,4%). Die detailliertere Analyse von phasenbezogenen Bewegungsmustern ergibt für das Merkmal Winkel eine konstante Separierung über alle Phasen mit etwa durchschnittlich 50%. Die Clusteranalysen des Merkmals Winkelgeschwindigkeit erzielen die geringsten Erkennungsraten. Am deutlichsten werden die Strafstöße nach Schussrichtungen durch die Clusteranalyse anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten separiert. In den Phasen LVS-LLS und LLS-STB werden die Schüsse auf die linken und rechten Zielfelder jeweils durchschnittlich zu 64% getrennt. Die Erkennungsrate der Schussrichtungen steigt in der letzten Phase auf einen durchschnittlichen Wert von 81,3%. Im Vergleich zu Wahrnehmungsstudien bestätigen die vorliegenden Erkennungsraten die Ergebnisse in ihrer Höhe. Savelsbergh et al. (2002) sowie Williams und Burwitz (1995) führen eine korrekte Antizipation der Schussrichtungen links und rechts bei Experten zwischen 82,7% und 84% auf. Aus methodischer Sicht können im Vergleich zur Untersuchung von Diaz et al. (2012) mit dem holistischen Verfahren der Hauptkomponentenanalyse gleichwertige Ergebnisse erzielt werden.

Aufgrund der Ergebnisse für die ganzheitlichen und phasenbezogenen Bewegungsmuster der Bedingung *Baseline* wird eine Einschränkung der Beschreibungsgrößen vorgenommen und im Folgenden die richtungsspezifische Trennung für die Trajektorien der Gelenkmittelpunkte analysiert.

Die exemplarische Untersuchung der richtungsspezifischen Bewegungshinweise Standbein, Schussbein, Hüfte und Arme resultiert für alle gewählten Merkmale in einer guten Trennungsrate von über 70%. Die deutlichste Separierung erzielt die Clusteranalyse für die Segmente Schuss- und Standbein mit jeweils durchschnittlich 79,3%. Die Ergebnisse entsprechen den Untersuchungen von Diaz et al. (2012) sowie Franks und Harvey (1997), die ebenfalls für Schuss- und Standbein Erkennungsraten um die 80% bestimmten. Die Entscheidung für die Beschränkung auf das Merkmal Standbein bei weiteren phasen-segmentbezogenen Analysen wird aufgrund der Bedeutsamkeit als Hinweisreiz (Erkennungsrate, Zeitpunkt des Auftretens) getroffen (vgl. Diaz et al., 2012; Franks & Harvey, 1997).

Die Clusteranalysen der ganzheitlichen Bewegungsmuster für die Bedingungen *Keeper-independent*, *Keeper-dependent* und *Point of no return* ergeben durchgehend geringere Separierungsraten im Vergleich zur *Baseline*. Am besten werden die Schussrichtungen für die Bedingung *Keeper-dependent* mit 53,4% (links) und 61,5% (rechts) getrennt. Auf ähnlichem Niveau gruppieren die Clusteranalysen für die Bedingung *Point of no return* die Schussrichtungen (links: 58,1%; rechts: 47,9%). Deutlicher abfallen die Trennungsquoten für die Schussrichtungen der Bedingung *Keeper-independent* (links: 62,9%; rechts: 29,2%).

Die Analyse der phasenbezogenen Bewegungsmuster zeigen im Durchschnitt über alle Phasen ähnliche Erkennungsraten zwischen 51,6% und 55,5%. Bei Betrachtung einzelner Phasen fällt eine unterschiedliche Entwicklung bei der Separierung der Strafstöße auf. Die Clusteranalyse für die Bedingung *Keeper-independent* se-

pariert die Schüsse auf die linken und rechten Zielfelder mit 52,4% (LVS-LLS), 51,9% (LLS-STB) und 50,6% (STB-BK). Die Trennungsraten nehmen leicht zum Ballkontakt hin ab. Die Bedingungen *Keeper-dependent* (LVS-LLS: 40,4%; LLS-STB: 59,0%; STB-BK: 64,0%) und *Point of no return* (LVS-LLS: 32,7%; LLS-STB: 52,6%; STB-BK: 81,2%) weisen aufsteigende Separierungsraten von Phase LVS-LLS bis STB-BK auf. Speziell die Erkennungsrate in der Bedingung *Point of no return* liegt in der letzten Phase über dem Niveau der Bedingung *Baseline*, obwohl die Ausführung des Strafstoßes unter zeitlichem Druck realisiert werden muss.

Ein Grund für die geringste Separierungsquote könnte bei der Bedingung *Keeper-independent* eine Verschleierung der Bewegungsabsichten sein, da die Spieler durch die Vorgabe torwartunabhängig zu schießen, keine Möglichkeiten besitzen auf den Torwart zu reagieren. Die Bedingungen *Keeper-dependent* und *Point of no return* setzen die Strafstöße mit einer torwartabhängigen Strategie um. Damit das Schießen auf beide Torseiten umzusetzen ist, könnten die Spieler einen neutralen oder gleichen Anlauf gewählt haben, der speziell in der ersten Phase die geringe richtungsspezifische Trennung erklären könnte. In der Phase LLS-STB und STB-BK steigen die Trennungsraten stärker an, weil die Spieler möglicherweise eine Festlegung der Schussrichtung getroffen oder gezielt eine Schusstäuschung eingebaut haben könnten. Eine andere Strategie der Spieler wäre entgegen der Ergebnisse von Bakker et al. (2006) eine Blicktäuschung kurz vor dem Ballkontakt. Durch peripheres Sehen könnte in diesem Fall auch die Torwarthandlung wahrgenommen werden, um letztendlich als Schütze darauf zu reagieren. In welchem Ausmaß eine durchgeführte Blicktäuschung sich auf das Bewegungsmuster auswirkt bleibt in diesem Fall ungeklärt.

In Bezug auf das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster Standbein trennen die Clusteranalysen die Schussrichtungen für die Bedingungen *Keeper-independent* (48,6%), *Keeper-dependent* (46%) und *Point of no return* (57,2%) auf deutlich geringerem Niveau im Vergleich zur Bedingung *Baseline*. Die Ergebnisse phasen-segmentbezogener Bewegungsmuster zeigen, dass das Merkmal Standbein individuell sehr unterschiedlich die Strafstöße nach den Schussrichtungen separieren kann. Aufgrund der betrachteten Videoaufnahmen von Strafstößen wird angenommen, dass durch Verschleierung oder Täuschungen sowie spontane Veränderungen in der Bewegung zur Realisierung eines Wechsels der Schussrichtung die Bewegungsmuster nicht deutlich durch die Clusteranalyse abgegrenzt werden können. Als einziger Vergleich können die Ergebnisse von Franks und Harvey (1997) herangezogen werden, die ihre videobasierte Auswertung mit Wettspielszenen ausgeführt haben. Die ermittelte Erkennungsrate des Standbeins von 80% wird hier nicht annähernd erreicht.

Der Vergleich von Strafstößen zwischen zwei Bedingungen zeigt, dass eine Separierung der Schüsse nach Bedingungen individuell unterschiedlich ist und vom Bewegungsmuster abhängt. Die Analyse über ganzheitliche Bewegungsmuster trennt zum Beispiel die Schüsse in der Bedingung *Keeper-dependent* klarer als phasenbezogene und phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster. In der Regel werden die Strafstöße nach dem Kriterium Schussrichtung und dann nach Bedingungen



separiert. Innerhalb einer Schussrichtung bilden sich häufig mehrheitliche Cluster für die Bedingungen, die im intra-individuellen Vergleich mehr oder weniger deutlich ausgeprägt sind. Am deutlichsten werden Strafstöße im Vergleich von Bedingung *Baseline* und *Keeper-dependent* getrennt. In Bezug auf die Separierung der Schussrichtungen links und rechts bei kombinierten Analysen können Erkennungsraten jeweils zwischen 8,3% und 100% über alle Bedingungsvergleiche festgehalten werden. Dieses Ergebnis deutet zumindest auf eine Veränderung der Bewegungsmuster von der einen zur anderen Aufgabenstellung hin.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit untersucht prozessorientierte kinematische Bewegungsmuster am Beispiel der Strafstoßsituation im Fußball. Der analytische Ansatz basiert auf dem holistischen Verfahren linearer Distanzmaße, um die Anlauf- und Schussbewegung beim Strafstoß über verlaufsorientierte Bewegungsmuster zu erforschen.

Das holistische Verfahren stellt neben Hauptkomponentenanalyse (PCA), Support Vector Machine (SVM) und Künstlicher Neuronaler Netze (KNN) ein Analysewerkzeug dar, welches Bewegungen über Bewegungsmuster mit einer großen Anzahl an Variablen untersucht. Die komplexen Bewegungsmuster beschreiben umfangreich den Bewegungsablauf und beschränken sich im Vergleich zu elementaristischen Verfahren nicht auf segmentale koordinative Zusammenhänge. Über den verlaufsorientierten Ansatz werden Variablenausprägungen, die eine Bewegung abbilden, kontinuierlich zu allen Messzeitpunkten gespeichert. Durch prozessorientierte Untersuchungen können neben der Aussage über die Intensität eines körperbezogenen bzw. bewegungsrelevanten Merkmals struktur- bzw. verlaufsbezogene Charakteristika über die Zeit festgehalten werden (vgl. Baumann et al., 1996; Button et al., 2006). Somit wird im Vergleich zu einer zeitdiskreten Analyse neben quantitative auch qualitative Informationen erfasst. Der methodische Zugang lehnt sich an die Analysen von Jaitner (2002a, 2002b, 2007) an, der in seinen Studien individuelle Bewegungsmuster und Technikvarianten sowie strukturelle Unterschiede zwischen Bewegungen identifiziert hat. Entsprechend der Erkenntnisse des Forschungsstandes über die Strafstoßsituation werden Aufgabenstellungen erarbeitet, die eine spielgerechte Realisierung der Strafstöße umsetzen.

Die inhaltliche Konzeption der Untersuchungsbedingungen leitet sich aus den Erkenntnissen wahrnehmungsbasierter sowie strafstoßbezogener Studien ab. Wood und Wilson (2010a) zeigen in ihrer Studie auf, dass Schützen bei der Ausführung eines Strafstoßes drei Strategien verwenden. Erstens besteht die Möglichkeit, dass die Schützen die Handlungen des Torwarts ausblenden und somit torwartunabhängig – ‚keeper-independent‘ – den Strafstoß schießen. Zweitens können Spieler bewusst die Abwehrhandlungen des Torhüters in ihre Entscheidung einfließen lassen und torwartabhängig – ‚keeper-dependent‘ – die Schussrichtung festlegen. Die dritte Strategie ‚opposite-independent‘ nach Wood und Wilson (2010a) besagt, dass die Spieler entgegengesetzt zu ihrer Blickrichtung den Ball platzieren. Dabei beachten die Spieler nicht den Bereich des Torhüters, sondern halten ihren Blick auf den Zielbereich nahe am Pfosten gerichtet, um letztendlich in die gegensätzliche Richtung zu schießen. Der Vorteil der torwartunabhängigen Strategie besteht in einem optimalen Zielvorgang durch Anvisieren des Zielbereichs und Ausblenden überflüssiger Informationen. Nachteilig könnte sein, dass ein Schütze nicht auf die Abwehrhandlung des Torhüters reagieren kann, wenn sich die Schuss- und Sprungrichtung gleichen. Dieser Nachteil entfällt bei der torwartabhängigen Strategie, weil die Entscheidung der Schussrichtung anhand des Verhaltens des Torhüters festgelegt wird. Problematisch aus Sicht des Schützen wäre jedoch eine sehr späte Bewe-

gung des Torhüters kurz vor dem Ballkontakt. In diesem Fall könnten die Informationen durch den Spieler nicht mehr verarbeitet werden und in die Bewegungssteuerung einfließen, wenn zu wenig Zeit bis zum Ballkontakt zur Verfügung steht. Der Zeitpunkt, zu dem keine Reaktion des Schützen auf die Abwehrhandlung des Torwarts mehr möglich ist und der Schütze seine begonnene Handlung ausführen muss, wird ‚point of no return‘ genannt. Van der Kamp (2006) und Bowtell et al. (2009) bestimmen in einem Strafstoß-Experiment, dass etwa 600ms vor dem Ballkontakt die Schussrichtung in Abhängigkeit der Torwartaktion nicht mehr zu 100% gewechselt werden kann.

Es liegen zahlreiche Wahrnehmungsstudien vor, die Erkenntnisse über richtungsspezifische Bewegungshinweise in der Strafstoßsituation liefern (vgl. Franks & Harvey, 1997; Keller et al., 1979; Kim & Lee, 2006; McMorris & Colenso, 1996; McMorris et al., 1995; Savelsbergh et al., 2005; Savelsbergh et al., 2002; Williams & Burwitz, 1995). Die Ergebnisse basieren auf subjektiven Eindrücken, Auswertungen von videobasierten Filmsequenzen oder auf der Erfassung der Blickrichtungen von Schützen. Somit stellt sich die Frage, inwieweit die berichteten Körpermerkmale durch kinematische Beschreibungsgrößen zu belegen sind. Und ungeklärt ist auch, welche Informationen die Torhüter durch peripheres Sehen aufnehmen können. Objektive Ergebnisse aus biomechanischen Studien berichten Goktepe et al. (2008), Lees und Owens (2011) sowie Diaz et al. (2012). Aus den biomechanisch ausgerichteten Forschungsarbeiten wird deutlich, dass keine Untersuchung vorliegt, welche mit einem verlaufsorientierten Ansatz eine Mustererkennung in wett-kampfgerechten Strafstoßsituationen durchführt.

Anhand der Forschungserkenntnisse wird ein Untersuchungsdesign mit vier unterschiedlichen Bedingungen entwickelt, in dem die Probanden spielgerecht Strafstoße ausführen. Das Ziel der Untersuchung ist unter Einbezug der Strafstoßstrategien von Schützen mittels eines holistischen Verfahrens eine Mustererkennung über verlaufsorientierte komplexe Bewegungsmuster in der Strafstoßsituation auszuführen. Die erste Aufgabenstellung erfasst die Strafstoße ungestört ohne Gegnereinwirkung (*Baseline*). In der zweiten und dritten Aufgabenstellung werden die Strafstoße jeweils gegen einen Torhüter unter Verwendung der Strategien *Keeper-independent* und *Keeper-dependent* ausgeführt. Die vierte Aufgabenstellung entspricht ebenfalls einer torwartabhängigen Ausführung. Eine Änderung stellt die simulierte Abwehrhandlung eines Torhüters über LED-Lampen dar, die etwa 600ms vor dem Ballkontakt angezeigt wird (*Point of no return*).

Die Bewegungen bei der Ausführung des Strafstoßes werden zeitkontinuierlich über eine kinematische Bewegungsanalyse erfasst. Die berechneten Winkel-Verläufe, Winkelgeschwindigkeiten und Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte aus dem Körpermodell von Schulter-, Ellbogen-, Hand-, Hüft-, Knie- und Sprunggelenk beider Körperseiten werden zur Bildung eines ganzheitlichen Bewegungsmusters (gBM) verwendet. Um detailliertere Erkenntnisse über die richtungsspezifische Erkennung in einzelnen Bewegungsabschnitten zu erhalten, wird die Gesamtbewegung über phasenbezogene Bewegungsmuster (pBM) untersucht. Die Gesamtbe-

wegung unterteilt sich über die festgelegten Knotenpunkte ‚Lösen des vorletzten Schritts‘ (LVS), ‚Lösen des letzten Schritts‘ (LLS), ‚Standbeinaufsatz‘ (STB) und ‚Ballkontakt‘ (BK) in die Bewegungsabschnitte LVS-LLS, LLS-STB und STB-BK. Darüber hinaus werden die aus Wahrnehmungsstudien extrahierten körperlichen Hinweisreize Arme, Hüfte, Stand- und Schussbein des Schützen über phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster (psBM) erforscht. Durch das Absolvieren von zwei Bedingungen können Vergleiche innerhalb und zwischen Bedingungen für einen Spieler durchgeführt werden. Eine Erkennung von Individuen erfolgt über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße.

Zur Erforschung der Bewegungsmuster in Bezug auf eine richtungsspezifische, Individuen bezogene und bedingungsabhängige Separierung werden Vergleiche von Bewegungsmustern basierend auf den Variablen-Zeit-Verläufen der Beschreibungsgrößen durchgeführt. In Anlehnung an das Verfahren nach Jaitner et al. (2001) und Schorer et al. (2007) werden die Daten zeit- und amplitudennormiert (Datentransformation), Datenreihen jedes Versuchs eines Probanden paarweise miteinander verglichen und als Ähnlichkeitsmaß euklidische Distanzen berechnet (Matrizenvergleich) sowie Bewegungsmuster über eine hierarchische agglomerative Clusteranalyse unter Verwendung des ‚Single Linkage‘ Algorithmus auf Basis der Distanzmatrix klassifiziert.

Bezugnehmend auf die in der Problemstellung (Kapitel 3) formulierten Fragen, werden im Folgenden die Kernaussagen der Untersuchungsergebnisse wiedergegeben.

Eine Erkennung von Individuen ist durch ganzheitliche Bewegungsmuster für die Beschreibungsgrößen Winkel-Verlauf, Winkelgeschwindigkeit und Verlauf der Gelenkmittelpunkte mit bis zu 93% möglich. Grundsätzlich trennen beide betrachteten winkelbezogenen Beschreibungsgrößen (Winkel: 91%; Winkelgeschwindigkeit: 93%) die Individuen auf sehr hohem Niveau. Anhand der Ortskoordinaten von Gelenkmittelpunkten ist eine Erkennungsrate von 81% gegeben. Ein Separierungskriterium bei den Beschreibungsgrößen Winkel und Winkelgeschwindigkeit ist das Schussbein. Für die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte ist das Einteilungskriterium auf der ersten Ebene im Dendrogramm die Altersklasse der Spieler (U19 vs. Männer) und erst auf der zweiten Ebene das Schussbein.

Die bestehenden Unterschiede zwischen den winkel- und raumbezogenen Merkmalen bei der Klassifizierung der Bewegungsmuster könnte dahingehend begründet werden, dass Stellung und Dynamik in den Gelenken individuellere Kennwerte darstellen als der Verlauf der Gelenkmittelpunkte.

Die Separierungsraten für die Clusteranalysen der richtungsspezifischen Mustererkennung mit ganzheitlichen Bewegungsmustern in der Bedingung *Baseline* sind im Vergleich zu den anderen Bewegungsmustern am höchsten. Nur das phasenbezogene Bewegungsmuster STB-BK für das Merkmal Gelenkmittelpunktverlauf kann die Trennungsquote des entsprechenden ganzheitlichen Bewegungsmusters im Gruppenmittel übertreffen (links: 80,4%; rechts: 82,1%). Für die intra-individuelle

Analyse können die klarsten Gruppierungen von Schussrichtungen sowohl bei den ganzheitlichen Bewegungsmustern als auch phasenbezogenen Bewegungsmustern über die Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte festgehalten werden. Die Clusteranalysen für ganzheitliche Bewegungsmuster der Gelenkmittelpunktverläufe separieren die Strafstöße mit 78,2% (links) und 77,4% (rechts). Bei den phasenbezogenen Bewegungsmustern steigt die Trennungsquote für Schussrichtungen im Gruppenmittel von der Phase LVS-LLS (63,7%) zur Phase STB-BK (81,3%) deutlich an. Die Erkennungsraten der Merkmale Winkel-Verlauf und Winkelgeschwindigkeit liegen bei den intra-individuellen Vergleichen der Strafstöße deutlich unter diesem Niveau (45,2-56,7%). Die vier phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster der Bedingung *Baseline* erreichen Erkennungsraten von 71,8% bis 81,3% und trennen deutlich die Schussrichtungen kurz vor dem Ballkontakt. Am deutlichsten trennen gleichauf die Hinweisreize Stand- und Schussbein mit durchschnittlich 79,3% die Strafstöße richtungsspezifisch.

Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Wahrnehmungsstudien können für das Merkmal Gelenkmittelpunktverlauf die ganzheitlichen Bewegungsmuster, phasenbezogenen Bewegungsmuster STB-BK sowie alle phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster die Erkennungsraten bestätigen (vgl. Franks & Harvey, 1997; Savelsbergh et al., 2002; Williams & Burwitz, 1995). In Bezug auf die Studie von Diaz et al. (2012) stimmen die Erkennungsraten der phasenbezogenen Bewegungsmuster mit der berechneten Reliabilität einzelner Hinweisreize nicht in allen Bedingungen überein. Die Höhe und der Verlauf der Erkennungsraten phasenbezogener Bewegungsmuster anhand des Merkmals Gelenkmittelpunktverlauf in der Untersuchungsbedingung *Baseline* erreichen bzw. überbieten die Prozentwerte der Reliabilitätsbestimmung. Die Bedingungen *Keeper-dependent* und *Point of no return* zeigen die gleiche Entwicklung der Erkennungsraten im Vergleich zu den Reliabilitätswerten, liegen aber speziell in der Phase LVS-LLS deutlich unter dem Berechnungsmodell von Diaz et al. (2012). Die Ergebnisse des phasenbezogenen Bewegungsmusters STB-BK bestätigen die bestimmte Zuverlässigkeit von verteilten Bewegungshinweisen kurz vor dem Ballkontakt.

Für die Bedingung *Keeper-independent* werden die deutlichsten Separierungen mit den phasenbezogenen Bewegungsmustern erzielt. Unwesentlich geringere Erkennungsraten erreicht das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster. Anhand des ganzheitlichen Bewegungsmusters ergeben die Analysen undeutlichere und für die Schussrichtungen ungleiche Separierungsquoten. Alle Bewegungsmuster dieser Bedingung erreichen im Durchschnitt für die Gruppe höchsten eine Separierungsquote von 52,4%. Im intra-individuellen Vergleich werden die Strafstöße zwischen 10% und 100% für die Schussrichtungen separiert.

In der Bedingung *Keeper-dependent* zeigen die Auswertungen für die phasenbezogenen Bewegungsmuster LLS-STB, STB-BK und das ganzheitliche Bewegungsmuster die deutlichsten Trennungen zwischen den Schussrichtungen links und rechts. Die Separierungsrate für die Bewegungsmuster aus der Phase LVS-LLS ist am niedrigsten. Der Gruppenmittelwert für die Bedingung *Keeper-dependent* liegt

zwischen 40,4% und 64% und die richtungsspezifische Trennung für die Probanden streut zwischen 12,5% und 100%.

Die deutlichste Erkennungsrate von Schussrichtungen über alle Bedingungen und Bewegungsmuster ist für das phasenbezogene Bewegungsmuster STB-BK der Bedingung *Point of no return* gegeben (links: 82,0%; rechts: 80,5%). Im Gegensatz dazu ergibt bei dieser Bedingung die Analyse für die Phase LVS-LLS die undeutlichste Separierung der Schussrichtungen im Vergleich zu den Bewegungsmustern anderer Bedingungen (links: 36,7%; rechts: 28,7%). Die Clusteranalyse trennt die Bewegungsmuster zwischen durchschnittlich 32,7% und 81,2% richtungsspezifisch. Die intra-individuelle Analyse ergibt eine Streuung für die Separierung der Schussrichtungen zwischen 7,7% und 100%.

Somit kann festgehalten werden, dass die Erkennungsraten zum Ball hin in drei von vier Bedingungen ansteigen. Bewegungsmuster, die in der Phase STB-BK alle Segmente des Körpers abbilden, ergeben im Durchschnitt deutlichere Separierungen als die Analyse eines Segments. Die Bedingungen, welche eine aktive oder simulierte Abwehrhandlung eines Torhüters integrieren, können die hohen Erkennungsraten nicht bestätigen. Die individuelle Betrachtung stimmt mit diesen gruppenspezifischen Tendenzen jedoch nicht immer überein. Vereinzelt zeigen Spieler für das phasenbezogene Bewegungsmuster undeutlichere Trennungen als für das phasen-segmentbezogene Bewegungsmuster. Die Streuungen der intra-individuellen Separierungsraten deuten an, dass die Klassifizierung der Schussrichtungen in Bezug auf ein Individuum großen Schwankungen unterliegt.

Eine Separierung nach Bedingungen beim Vergleich von Strafstößen aus unterschiedlichen Aufgabenstellungen ist nicht eindeutig gegeben. Die Analyse zeigt, dass der Vergleich von Strafstößen zweier Bedingungen in der Regel zunächst eine Trennung nach Schussrichtungen ergibt und dann auf einer tieferen Ebene zum Teil eine Separierung nach Bedingungen vorliegt. Ausnahmen stellen die Analysen für einzelne Bewegungsmuster von Spieler EH (phasen-segmentbezogenes Bewegungsmuster), TS (ganzheitliches Bewegungsmuster), MV (ganzheitliches und phasenbezogenes Bewegungsmuster STB-BK) und RS (ganzheitliches Bewegungsmuster, alle phasenbezogenes Bewegungsmuster) dar, bei denen die Trennung von Strafstößen zuerst nach der Bedingung vorgenommen wird. Die bedingungsspezifische Gruppierung ist am häufigsten für den Vergleich der Bedingungen *Baseline* und *Keeper-dependent* zu sehen. Vor allem das ganzheitliche Bewegungsmuster führt zu einer deutlicheren Trennung von Strafstößen einzelner Bedingungen.

Aus praktischer Sicht lässt sich feststellen, dass für den Torwart entscheidende Bewegungshinweise zumeist nach dem Standbeinaufsatz deutlich wahrzunehmen sind. Diese Tatsache trifft für die torwartunabhängige Strategie nur in der Bedingung *Baseline* sowie für die torwartabhängige Strategie in den Bedingungen *Keeper-dependent* und *Point of no return* zu. Die Erkennungsraten von Bewegungsmustern für die Bedingung *Keeper-independent* steigen dagegen zum Ballkontakt

hin nicht an, so dass ein Schütze basierend auf den Separierungsraten weniger Merkmale für den Antizipationsprozess des Torwarts zur Verfügung stellt.

Welche Gründe für diese Ergebnisse sprechen, kann an dieser Stelle nur vermutet werden. Lediglich die Gespräche mit wenigen Spielern geben einen kleinen Einblick, welches strategische Vorgehen vor allem in den Torwart einbindenden Aufgabenstellungen angewendet wird. Die Strategie in der Bedingung *Keeper-dependent* könnte ein immer gleicher Anlauf sein, um dem Torwart keine frühzeitige Information über die Schussrichtung zu geben. Es könnte aber auch verstärkt ein Schuss in eine der Ecken angedeutet werden. Aus Sicht eines Rechtsfußes wäre eine Schusstäuschung in die rechte Ecke sinnvoll, da ein Wechsel von der rechten (unnatürliche Seite) in die linke Torhälfte (natürliche Seite) durch eine kurze Drehung im Sprunggelenk kurz vor dem Ballkontakt möglich ist. Eine andere Strategie wäre ein gezielter Blick mit den Augen, um den Torhüter zu täuschen. In welchem Ausmaß diese Handlung sich auf den Bewegungsvollzug und somit auf das Bewegungsmuster auswirkt bzw. durch das Bewegungsmuster aufgezeigt wird, kann nicht beantwortet werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass das eingesetzte Verfahren zur Mustererkennung in der Strafstoßsituation geeignet ist, weil die Ergebnisse wahrnehmungsbasierter und kinematischer Studien zur Erkennung von Schussrichtungen bestätigt werden können und im Vergleich zu weiteren Studien zur Mustererkennung (vgl. Schorer et al., 2007) gleichwertige Ergebnisse liefert. Es wäre somit denkbar das Verfahren auf weitere Fragestellungen im Fußball (z.B. direkte Freistöße) oder andere Sportarten und Disziplinen anzuwenden.

In Bezug auf die durchgeführte Arbeit bestehen mehrere methodische Erweiterungen, die bereits im vorherigen Abschnitt angeklungen sind:

- Die Anzahl der Probanden für die Bedingungen *Keeper-independent*, *Keeper-dependent* und *Point of no return* könnten erhöht werden, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu verbessern und mehr Klarheit über die doch großen inter-individuellen Schwankungen zu erhalten
- Aufgrund der streuenden Trefferbereiche bei den Strafstoßen wäre eine nachträgliche Ausdifferenzierung der Zielbereiche denkbar, um die Erkennung von richtungsspezifischen Bewegungsmustern zu verfeinern. In diesem Zusammenhang wäre die Verwendung von Eye-Tracking-Systemen eine Erweiterung, um das anvisierte Ziel mit den tatsächlichen Treffpunkten abzugleichen und Aussagen über die Schusspräzision treffen zu können. Darüber hinaus könnte über die Erfassung der Blickrichtungen die Einhaltung der vorgegebenen Strategie bei der Ausführung geprüft werden
- Eine Erweiterung stellt auch eine direkte Befragung der Probanden nach jedem durchgeführten Strafstoß dar, um die resultat- und bewegungsbezogenen Ergebnisse mit einer persönlichen Handlungsbeschreibung zu ergänzen

- Die biomechanische Analyse könnte neben den sichtbaren Bewegungsausführungen, welche durch kinematische Beschreibungsgrößen erfasst werden, über elektromyographische Messungen interne Prozesse abbilden und in die Analyse integrieren
- Neben dem Einsatz linearer Verfahren ist methodisch eine Analyse über nicht-lineare Verfahren (KNN, SVM) als Vergleich heranzuziehen
- Die subjektive Auswertung der Clusteranalysen, welche einer interpretativen Herangehensweise unterliegt, könnte durch ein objektives Auswertungsverfahren zur Clustervalidierung ersetzt werden (z. B. Hubert  $\Gamma$  Algorithmus)
- Die vorgenommene Einschränkung bei der Auswertung der Daten in Bezug auf die Beschreibungsgrößen und richtungsspezifischen Hinweisreize könnte dahingehend erweitert werden, dass zum einen winkelbezogene Beschreibungsgrößen und zum anderen die phasen-segmentbezogenen Bewegungsmuster für alle Bedingungen uneingeschränkt analysiert werden. Darüber hinaus wäre neben den phasen-segmentbezogenen Bewegungsmustern, die auf segmentaler Ebene mehr lokalen Hinweisreizen entsprechen, die Abbildung und Analyse von verteilten Hinweisreizen neben ganzheitlichen Bewegungsmustern eine Ergänzung

Weiterführende Fragestellungen könnten sich auf den Unterschied zwischen erfolgreichen und nicht erfolgreichen Strafstoßen beziehen, wenn bei der Datenerfassung zusätzlich die Interaktion Fuß-Ball erfasst würde. Unter bewegungswissenschaftlicher Perspektive wäre interessant, inwiefern das Training von Verschleierungstaktiken sich auf das Bewegungsmuster und deren richtungsspezifischen Erkennung auswirkt sowie Veränderungen im Bewegungsmuster über den Übungsprozess ergeben.



## Literaturverzeichnis

- Amiri-Khorasani, M., Osman, N. A. A. & Yusof, A. (2009). Biomechanical Responses of Instep Kick between Different Positions in Professional Soccer Players. *Journal of Human Kinetics*, 22, 21-28.
- Andresen, R. (Hrsg.). (1984). *Steuerung des Sportspiels in Training und Wettkampf*. 5. Internationales Berliner Sportspiel-Symposium. Ahrensburg bei Hamburg: Czwalina.
- Baca, A. & Kornfeind, P. (2012). Stability analysis of motion patterns in biathlon shooting. *Human Movement Science*, 31 (2), 295-302.
- Bakker, F. C., Oudejans, R. D., Binsch, O. & van der Kamp, J. (2006). Penalty shooting and gaze behaviour: Unwanted effects of the wish not to miss. *International Journal of Sport Psychology*, 37, 265-280.
- Ballreich, R. (1996). Einführung in die Biomechanik des Sports. In R. Ballreich & W. Baumann (Hrsg.), *Grundlagen der Biomechanik des Sports. Probleme-Methoden-Modelle* (S. 1-12). Stuttgart: Enke Verlag.
- Ballreich, R. & Baumann, W. (1996). *Grundlagen der Biomechanik des Sports. Probleme-Methoden-Modelle*. Stuttgart: Enke Verlag.
- Bar-Eli, M., Azar, O. H., Ritov, I., Keidar-Levin, Y. & Schein, G. (2007). Action bias among elite soccer goalkeepers: the case of penalty kicks. *Journal of economic psychology*, 606-621.
- Bauer, G. & Bäumler, G. (Hrsg.). (1998). *Sportwissenschaft rund um den Fußball (Beiträge und Analysen zum Fußballsport, 9)* (Vol. 96). Hamburg: Czwalina.
- Baumann, W., Preiß, R. & Schöllhorn, W. I. (1996). Produkt- und prozeßorientierte Modelle der Sportmotorischen Techniken, der mechanischen Belastung des Bewegungsapparats und der Massenträgheitscharakteristika des menschlichen Körpers. In R. Ballreich & W. Baumann (Hrsg.), *Grundlagen der Biomechanik des Sports. Probleme-Methoden-Modelle* (S. 160-195). Stuttgart: Enke Verlag.
- Begg, R. & Kamruzzaman, J. (2005). A machine learning approach for automated recognition of movement patterns using basic, kinetic and kinematic gait data. [Evaluation Studies]. *Journal of Biomechanics*, 38 (3), 401-408.
- Begg, R. K., Palaniswami, M. & Owen, B. (2005). Support Vector Machines for Automated Gait Classification.
- Behnke, J., Bräuninger, T. & Shikano, S. (Hrsg.). (2010). *Jahrbuch für Handlungs- und Entscheidungstheorie* (Vol. 6). Wiesbaden: VS Verlag.
- Berger, R. (2010). Rationalität beim Elfmeterschießen. Entscheiden sich Bundesligaspieler strategisch optimal? In J. Behnke, T. Bräuninger & S. Shikano (Hrsg.), *Jahrbuch für Handlungs- und Entscheidungstheorie*. (Vol. 6, S. 125-164). Wiesbaden: VS Verlag.
- Bockemühl, T., Troje, N. F. & Dürr, V. (2010). Inter-joint coupling and joint angle synergies of human catching movements. *Human Movement Science*, 29 (1), 73-93.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer.
- Bourne, M., Bennett, S. J., Hayes, S. J. & Williams, A. M. (2011). The dynamical structure of handball penalty shots as a function of target location. *Human Movement Science*, 30 (1), 40-55.
- Bowtell, M., King, M. & Pain, M. (2009). Analysis of the Keeper-dependent strategy in soccer penalty kick. *Journal of Sports science and engineering*, 3 (2), 93-102.
- Burges, C. (1998). A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery* 2,121-167.
- Button, C., Bennett, S. & Davids, K. (1998). Coordination dynamics of rhythmical and discrete prehension: Implications for the scanning procedure and individual differences. *Human Movement Science*, 17 (6), 801-820.
- Button, C., Davids, K. & Schöllhorn, W. I. (2006). Coordination Profiling of Movement Systems. In K. Davids, S. Bennett & K. Newell (Hrsg.), *Movement System Variability* (S. 133-152). Champaign: Human Kinetics.

- Byun, H. & Lee, S.-W. (2002). Applications of Support Vector Machines for pattern recognition: A Survey. In S.-W. Lee & A. Verri (Hrsg.), *Pattern Recognition with Support Vector Machines. First International Workshop, SVM 2002 Niagara Falls, Canada, August 10, 2002 Proceedings* (S. 571-591). Berlin: Springer.
- Causer, J., Bennett, S. J., Holmes, P. S., Janelle, C. M. & Williams, A. M. (2010). Quiet eye duration and gun motion in elite shotgun shooting. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42 (8), 1599-1608.
- Chiari, L., Della Croce, U., Leardini, A. & Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 2: instrumental errors. *Gait and Posture*, 21 (2), 197-211.
- Clarys, J., Reilly, T. & Stibbe, A. (Hrsg.). (1995). *Science and Football II: Proceedings of the Second World Congress of Science and Football*. London: Spon.
- Coffey, N., Harrison, A. J., Donoghue, O. A. & Hayes, K. (2011). Common functional principal components analysis: a new approach to analyzing human movement data. *Human Movement Science*, 30 (6), 1144-1166.
- Daffertshofer, A., Lamoth, C. J., Meijer, O. G. & Beek, P. J. (2004). PCA in studying coordination and variability: a tutorial. *Clinical Biomechanics*, 19 (4), 415-428.
- Darwish, H. Z., Hulliger, M., Mah, C. D., O'Callaghan, I., Wojciechowski, A. & McNeil, M. (1997). Principal Component Analysis adds to gait kinematic measures. *Gait and Posture*, 6, 269.
- De Jong, R., Coles, M. G. H., Logan, G. D. & Gratton, G. (1990). In Search for the Point of No Return: The Control of Response Processes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16 (1), 164-182.
- Della Croce, U., Leardini, A., Chiari, L. & Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 4: assessment of anatomical landmark misplacement and its effects on joint kinematics. *Gait and Posture*, 21 (2), 226-237.
- Deutscher Fußball-Bund. (2010). *Fußball-Regeln 2010/11*. Frankfurt: DFB.
- Diaz, G. J., Fajen, B. R. & Phillips, F. (2012). Anticipation from biological motion: The goalkeeper problem. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*.
- Dicks, M., Button, C. & Davids, K. (2010). Availability of advance visual information constrains association-football goalkeeping performance during penalty kicks. *Perception*, 39 (8), 1111-1124.
- Dicks, M., Davids, K. & Button, C. (2010). Individual differences in the visual control of intercepting a penalty kick in association football. *Human Movement Science*, 29 (3), 401-411.
- Dierks, T. A. & Davis, I. (2007). Discrete and continuous joint coupling relationships in uninjured recreational runners. *Clinical Biomechanics*, 22 (5), 581-591.
- Dietrich, K., Dürrwächter, G. & Schaller, H.-J. (2007). *Die großen Spiele*. Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Donà, G., Preatoni, E., Rodano, R. & Cobelli, C. (2007). Principal Component Analysis of knee angle waveforms during race walking. In H.-J. Menzel & M. H. Chagas (Hrsg.), *The Proceedings of the XXV International Symposium on Biomechanics in Sports*. August 23-27, Ouro Preto (Brasil).
- Egan, C. D., Verheul, M. H. & Savelsbergh, G. J. P. (2007). Effects of experience on the coordination of internally and externally timed soccer kicks. *Journal of Motor Behavior*, 39 (5), 423-432.
- Ehara, Y., Fujimoto, H., Miyazaki, S. & Mochimaru, M. (1997). Comparison of the performance of 3D camera systems II. *Gait and Posture*, 5, 251-255.
- Franks, I. M. & Harvey, T. (1997). Cues for goalkeepers: high-tech methods used to measure penalty shot response. *Soccer Journal*, 42, 30-33.
- Franks, I. M., McGarry, T. & Harvey, T. (1999). From Notation to Training: Analysis of the Penalty Kick. *Insight*, 2 (3), 24-26.
- Fukuchi, R. K., Eskofier, B. M., Duarte, M. & Ferber, R. (2011). Support vector machines for detecting age-related changes in running kinematics. *Journal of Biomechanics*, 44 (3), 540-542.

- Glazier, P. S., Davids, K. & Bartlett, R. M. (2003). DYNAMICAL SYSTEMS THEORY: A Relevant Framework for Performance-Oriented Sports Biomechanics Research. 7. Zugriff am 27.09.2011 unter [www.sportsci.org](http://www.sportsci.org)
- Göhner, U. (1992). Bewegungsanalyse. In P. Röthig, H. Becker, K. Carl, D. Kayser & R. Prohl (Hrsg.), *Sportwissenschaftliches Lexikon* (S. 74-75). Schorndorf: Hofmann.
- Goktepe, A., Karabork, H., Ak, E., Cicek, S. & Korkusuz, F. (2008). Kinematic Analysis of penalty kick in soccer.
- Graham-Smith, P., Lees, A. & Richardson, D. (1999). Analysis of technique of goalkeepers during the penalty kick. *Journal of Sports Sciences*, 17, 916.
- Grunz, A., Memmert, D. & Perl, J. (2012). Tactical pattern recognition in soccer games by means of special self-organizing maps. *Human Movement Science*, 31 (2), 334-343.
- Hamill, J., Haddad, J. M. & McDermott, W. J. (2000). Issues in Quantifying Variability from a dynamical Systems Perspective. *Journal of Applied Biomechanics*, 16, 407-418.
- Hanvey, T. (1999). *Advanced cue utilization of soccer goalkeepers during penalty kicks*. Dissertation, University of British Columbia.
- Harris, A. J., Anderson, R. & Kenny, I. (Hrsg.). (2009). *The Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports*. August 17-21, Limerick (Ireland).
- Harrison, A. J. & Mannering, A. (2006). A Biomechanical analysis of the instep kick in soccer with the preferred and non-preferred foot. In H. Schwameder, G. Strutzenberger, V. Fastenbauer, S. Lindinger & E. Müller (Hrsg.), *The Proceedings of the XXIV International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 1-4). July 14-18, Salzburg (Austria).
- Heiderscheit, B. C., Hamill, J. & Van Emmerik, R. E. (1999). Q-angle influences on the variability of lower extremity coordination during running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31 (9), 1313-1319.
- Helwig, N. E., Hong, S. & Polk, J. D. (2012). Parallel Factor Analysis of gait waveform data: A multimode extension of Principal Component Analysis. *Human Movement Science*, 31 (3), 630-648.
- Hoppstädter, U. & Kohl, K. (1984). Untersuchungen über den Elfmeter im Fussball. In R. Andresen (Hrsg.), *Steuerung des Sportspiels in Training und Wettkampf. 5. Internationales Berliner Sportspiel-Symposium* (S. 235-247). Ahrensburg bei Hamburg: Czwalina.
- Hughes, M. & Wells, J. (2002). Analysis of penalties taken in shoot-outs. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 2 (1), 55-72.
- Huys, R., Smeeton, N. J., Hodges, N. J., Beek, P. J. & Williams, M. A. (2008). On the dynamic information underlying visual anticipation skill. *Perception & Psychophysics*, 70 (7), 1217-1234.
- Isokawa, M. & Lees, A. (1988). A biomechanical analysis of the instep kick motion in soccer. In T. Reilly, A. Lees, K. Davids & N. Murphy (Hrsg.), *Science and Football: The Proceedings of the first World Congress on Science and Football* (S. 449-455). London: Spon.
- Jäger, J. M. & Schöllhorn, W. I. (2012). Identifying individuality and variability in team tactics by means of statistical shape analysis and multilayer perceptrons. *Human Movement Science*, 31 (2), 303-317.
- Jaitner, T. (2002a). Comparative Analysis of the takeoff in pole vault and long jump based on time-continuous data. In K. E. Gianikellis (Hrsg.), *Proceedings of the XX International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 133-136). 01.-05. July, Cáceres (Spain).
- Jaitner, T. (2002b). *Techniktraining mit passiven Bewegungshilfen. Eine systemdynamische Betrachtung elektromyographischer und kinematischer Bewegungsmuster beim Lernen einer leichtathletischen Sprungbewegung* (Vol. 5). Frankfurt: Peter Lang.
- Jaitner, T. (2007). Time continuous vs. time discrete analysis of the take off technique in long jump. In H.-J. Menzel & M. H. Chagas (Hrsg.), *Proceedings of the XXV International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 466-469). 23.-27. August, Ouro Preto (Brazil).
- Jaitner, T., Kretschmar, D. & Hellstern, W. (2003). Changes of movement patterns and hurdle performance following traditional and differential hurdle training. In E. Müller, H. Schwameder, G. Zallinger & V. Fastenbauer (Hrsg.), *Proceedings of the 8th Annual Congress European College of Sport Science*. July 9-12, Salzburg.

- Jaitner, T., Mendoza, L. & Schöllhorn, W. I. (2001). Analysis of long jump technique in the transition from approach to takeoff based on time-continuous kinematic data. *European Journal of Sport Science*, 1 (5), 1-12.
- Jaitner, T. & Schack, T. (2002). Strukturanalyse biomechanischer Bewegungsmuster und mentaler Technikrepräsentationen - ein interdisziplinärer Ansatz *BiSp-Jahrbuch 2003* (S. 237-244).
- Jaitner, T. & Schack, T. (2005). Interdisciplinary analysis of biomechanical movement patterns and mental representations of the volleyball spike. In Q. Wang (Hrsg.), *Proceedings of the XXIII International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 293-296). 22.-27. August, Beijing (China).
- Janssen, D., Schöllhorn, W. I., Newell, K. M., Jager, J. M., Rost, F. & Vehof, K. (2011). Diagnosing fatigue in gait patterns by support vector machines and self-organizing maps. *Human Movement Science*, 30 (5), 966-975.
- Jeansonne, J. J. (2003). *The Effect of environmental context on performance outcomes and movement coordination changes during the learning of complex motor skills*. Dissertation.
- Kawamoto, R., Miyagi, O., Ohashi, J. & Fukashiro, S. (2007). Kinetic comparison of a side-foot soccer kick between experienced and inexperienced players. *Sports Biomechanics*, 6 (2), 187-198.
- Keller, D., Hennemann, M.-C. & Alegria, J. (1979). Fußball: Der Elfmeter. Analyse des spezifischen vorbereitenden Anpassungsverhaltens zur Durchführung einer sportlichen Bewegung. *Leistungssport*, 9 (5), 394-398.
- Kellis, E. & Katis, A. (2006). Biomechanical characteristics and determinants of instep soccer kick. *Journal of Sports Science and Medicine*, 6, 154-165.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kerwin, D. G. & Bray, K. (2006). Measuring and Modelling the Goalkeeper's Diving Envelope in a Penalty Kick. *The Engineering of Sport* 6, 321-326.
- Kim, S. & Lee, S. (2006). Gaze Behavior of Elite Soccer Goalkeepers in Successful Penalty Kick Defense. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 18 (1), 96-110.
- Kollath, E. (1998). Technikanalyse der Hechtbewegung des Fußball-Torhüters. In G. Bäumlner & G. Bauer (Hrsg.), *Sportwissenschaft rund um den Fußball (Beiträge und Analysen zum Fußballsport, 9)* (Vol. 96, S. 29-39). Hamburg: Czwalina.
- Kuhn, W., Lees, A., Davids, K. & Murphy, N. (1988). Penalty kick strategies for shooter and goalkeepers. In T. Reilly (Hrsg.), *Science and Football: The Proceedings of the first World Congress of Science and Football* (S. 489-492). London: Spon.
- Laffaye, G., Bardy, B. G. & Durey, A. (2007). Principal Component Structure and sport-specific differences in the running one-leg vertical jump. *International of Sports Medicine*, 28, 420-425.
- Lamb, P. F., Bartlett, R. M. & Robins, A. (2011). Artificial neural networks for analyzing inter-limb coordination: the golf chip shot. *Human Movement Science*, 30 (6), 1129-1143.
- Lamoth, C. J., Daffertshofer, A., Huys, R. & Beek, P. J. (2009). Steady and transient coordination structures of walking and running. *Human Movement Science*, 28 (3), 371-386.
- Lanham, N. (2005). The Goal Complete: The Winning Difference. In T. Reilly, J. Cabri & D. Araújo (Hrsg.), *Science and Football V. The Proceedings of the Fifth World Congress on Science and Football* (S. 194-200). Abingdon: Routledge.
- Leardini, A., Chiari, L., Della Croce, U. & Cappozzo, A. (2005). Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. *Gait and Posture*, 21 (2), 212-225.
- Lees, A. & Barton, G. (2005). A Characterisation of Technique in the Soccer Kick Using Kohonen Neural Network Analysis. In T. Reilly, J. Cabri & D. Araújo (Hrsg.), *Science and Football V. The Proceedings of the Fifth World Congress on Science and Football* (S. 83-88). Abingdon: Routledge.
- Lees, A. & Owens, L. (2011). Early visual cues associated with a directional place kick in soccer. *Sports Biomechanics*, 10 (2), 125-134.

- Li, L., Van den Bogert, E. C. H., Caldwell, G. E., van Emmerik, R. E. A. & Hamill, J. (1999). Coordination patterns of walking and running at similar speed and stride frequency. *Human Movement Science*, 18, 67-85.
- Logan, G. D. & Cowan, W. B. (1984). On the ability to inhibit thought and action: a theory of an act of control. *Psychological Review*, 91 (3), 295-327.
- Loy, R. (1996). Handlungsstrategien von Torhütern und Schützen in der Strafstoßsituation des Fußballsports. In G. Bäumlner & G. Bauer (Hrsg.), *Sportwissenschaft rund um den Fußball (Beiträge und Analysen zum Fußballsport, 9)* (Vol. 96, S. 67-78). Hamburg: Czwalina.
- Ludwig, M. (2008a). Mathematik des Elfmeters. In M. Ludwig (Hrsg.), *Mathematik + Sport. Olympische Disziplinen im mathematischen Blick* (S. 19-26). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Ludwig, M. (Hrsg.). (2008b). *Mathematik + Sport. Olympische Disziplinen im mathematischen Blick*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Maier, K., D., Meier, P., Wagner, H. & Blickhan, R. (2000). Neural Network Modeling in sport biomechanics based on the example of shot-put flight. In Y. Hong, D. P. Johns & R. H. Sanders (Hrsg.), *XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports*. June 25-30, Hong Kong (China).
- Masters, R. S. W., van der Kamp, J. & Jackson, R. C. (2007). Imperceptibly off-center goalkeepers influence penalty-kick direction in soccer. *Psychological Science*, 18 (3), 222-223.
- Maurer, C., Federolf, P., von Tscherner, V., Stirling, L. & Nigg, B. M. (2012). Discrimination of gender-, speed-, and shoe-dependent movement patterns in runners using full-body kinematics. *Gait and Posture*.
- Mazyn, L. I. N., Montagne, G., Savelsbergh, G. J. & Lenoir, M. (2006). Reorganization of catching coordination under varying temporal constraints. *Motor Control*, 10, 143-159.
- Mazyn, L. I. N., Savelsbergh, G. J., Lenoir, M. & Montagne, G. (2007). Spatial and Temporal Adaptations That Accompany Increasing Catching. *Journal of Motor Behavior*, 39 (6), 491-502.
- McGarry, T. & Franks, I. A. (2000). On winning the penalty shoot out. *Journal of Sports Sciences*, 18, 401-409.
- McMorris, T. & Colenso, S. (1996). Anticipation of professional soccer goalkeepers when facing right- and left-footed penalty kicks. *Perceptual and Motor Skills*, 82 (3), 931-934.
- McMorris, T., Copeman, R., Corcoran, D., Saunders, G. & Potter, S. (1995). Anticipation of soccer goalkeepers facing penalty kicks. In J. Clarys, T. Reilly & A. Stibbe (Hrsg.), *Science and Football II: Proceedings of the Second World Congress of Science and Football* (S. 250-253). London: Spon.
- McMorris, T. & Hauxwell, B. (1997). Improving anticipation of goalkeepers using video observation. In T. Reilly, J. Bangsbo & M. Hughes (Hrsg.), *Science and Football III. The Proceedings of the Third World Congress on Science and Football* (S. 290-294). Abingdon: Taylor & Francis.
- Meinel, K. & Schnabel, G. (2007). *Bewegungslehre - Sportmotorik. Abriss einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Menzel, H.-J. (2000). Identification of movement patterns by time discrete variables and analysis of time-courses. In Y. Hong, D. P. Johns & R. H. Sanders (Hrsg.), *The Proceedings of the XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports*. June 25-30, Hong Kong.
- Morya, E., Bigatao, H., Lees, A. & Ranvaud, R. (2005). Evolving penalty kick strategies. In T. Reilly, J. Cabri & D. Araújo (Hrsg.), *Science and Football V: The Proceedings of the 5th World Congress on Science and Football* (S. 237-242): Taylor & Francis.
- Morya, E., Ranvaud, R. & Pinheiro, W. M. (2003). Dynamics of visual feedback in a laboratory simulation of a penalty kick. *Journal of Sports Sciences*, 21 (2), 87-95.
- Mullineaux, D. R., Bartlett, R. & Bennett, S. (2001). Research designs and statistics in biomechanics and motor control. *Journal of Sports Sciences*, 19, 739-760.
- Neilson, P. J. & Jones, R. (2005). Dynamic soccer ball performance measurement. In T. Reilly, J. Cabri & D. Araújo (Hrsg.), *Science and Football V. The Proceedings of the Fifth World Congress on Science and Football*. (S. 21-27). Abingdon: Routledge.

- Neumaier, A., Poel, T. & Standtke, H. J. (1987). Zur Antizipation des Elfmeterschusses aus Sicht des Torwarts. *Leistungssport*, 17 (5), 23-32.
- Nunez, F., Javier, Ona, A., Bilbao, A. & Raya, A. (2005). Anticipation in soccer goalkeepers during penalty kicking. *International Journal of Sport Psychology*, 36, 284-298.
- Nunez, F., Javier, Ona, A., Raya, A. & Bilbao, A. (2009). Differences between expert and novice soccer players when using movement precues to shoot a penalty kick. *Perceptual and Motor Skills*, 108, 139-148.
- Oudejans, R. R. D., van de Langenberg, R. W. & Hutter, R. I. (2002). Aiming at a far target under different viewing conditions: Visual control in basketball jump shooting. *Human Movement Science*, 21, 457-480.
- Perl, J. (2001). DyCoN: Ein dynamisch gesteuertes Neuronales Netz zur Modellierung und Analyse von Prozessen im Sport. *Sport & Informatik*, 8.
- Perl, J. (2004). A neural network approach to movement pattern analysis. *Human Movement Science*, 23 (5), 605-620.
- Perl, J. (2009). Musteranalyse im Sportspiel mit Hilfe Neuronaler Netze. In M. Lames, C. Augste, O. Cordes, C. Dreckmann, K. Görsdorf & M. Siegle (Hrsg.), *Gegenstand und Anwendungsfelder der Sportinformatik. Symposium der dvs-Sektion Informatik vom 22.-24. Mai 2008 in Augsburg* (Vol. 189). Hamburg: Czwalina.
- Pfeiffer, M. & Perl, J. (2006). Analysis of tactical structures in team handball by means of artificial neural networks. *International Journal of Computer Science in Sport*, 5 (1), 4-14.
- Post, A. A., Daffersthofer, A. & Beek, P. J. (2000). Principal components in three-ball cascade juggling. *Biological Cybernetics*, 82, 143-152.
- Potthast, W. (2010). Motion differences in goal kicking on natural and artificial soccer turf systems. *Footwear Science*, 2 (1), 29-35.
- Reid, S. M., Graham, R. B. & Costigan, P. A. (2010). Differentiation of young and older adult stair climbing gait using principal component analysis. *Gait and Posture*, 31 (2), 197-203.
- Reilly, T., Bangsbo, J. & Hughes, M. (Hrsg.). (1997). *Science and Football III. The Proceedings of the Third World Congress on Science and Football*. Abingdon: Routledge.
- Reilly, T., Lees, A., Davids, K. & Murphy, N. (Hrsg.). (1988). *Science and Football: The Proceedings of the first World Congress on Science and Football*. London: Spon.
- Reinschmidt, C., van den Bogert, A. J., Lundberg, A., Nigg, B. M., Murphy, N., Stacoff, A. & Stano, A. (1997). Tibiofemoral and tibioalcalcanal motion during walking: external vs. internal markers. *Gait and Posture*, 6, 98-109.
- Reinschmidt, C., van den Bogert, A. J., Nigg, B. M., Lundberg, A. & Murphy, N. (1997). Effect of skin movement on the Analysis of skeletal knee joint motion during running.pdf. *Journal of Biomechanics*, 30 (7), 729-732.
- Röthig, P., Becker, H., Carl, K., Kayser, D. & Prohl, R. (1992). *Sportwissenschaftliches Lexikon* (6. Aufl.). Schorndorf: Hofmann.
- Savelsbergh, G. J. P., van der Kamp, J., Williams, M. A. & Ward, P. (2005). Anticipation and visual search behaviour in expert soccer goalkeepers. *Ergonomics*, 48 (11-14), 1686-1697.
- Savelsbergh, G. J. P., Williams, M. A., van der Kamp, J. & Ward, P. (2002). Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. *International Journal of Sport Science*, 20, 279-287.
- Schmidt, A. (2010). *Bewegungsmustererkennung anhand des Basketball-Freiwurfs*. Hamburg: Feldhaus.
- Schmidt, A. (2012). Movement pattern recognition in basketball free-throw shooting. *Human Movement Science*, 31 (2), 360-382.
- Schmidt, O. A., Schöllhorn, W. I. & Bauer, H. U. (1997). Gait pattern analysis using selforganizing neural networks. *Gait and Posture*, 6, 263-264.
- Schöllhorn, W. I. (1998). *Systemdynamische Betrachtung komplexer Bewegungsmuster im Lernprozeß*. Frankfurt a.M.: Peter Lang.
- Schöllhorn, W. I. & Bauer, H. U. (1997). Linear - nonlinear classification of complex time course patterns. In J. Bangsbo, B. Saltin, H. Bonde, Y. Hellsten, B. Ibsen, M. Kjaer & G. Sjogaard

- (Hrsg.), *Conference proceedings of the 2nd European College of Sport Science* (S. 308-309). Copenhagen: University of Copenhagen.
- Schöllhorn, W. I. & Bauer, H. U. (1998). Identifying individual movement styles in high performance sports by means of self-organizing Kohonen maps. In H. J. Riehle & M. M. Vieten (Hrsg.), *The Proceedings of the XVI International Symposium on Biomechanics in Sports*. July 21-25, Konstanz.
- Schöllhorn, W. I., Janssen, D. & Jäger, J. M. (2010). Künstliche Neuronale Netz-Modelle in der Sportwissenschaft. In J. Wiemeyer, A. Baca & M. Lames (Hrsg.), *Sportinformatik - gestern, heute, morgen* (Vol. 198, S. 67-77). Hamburg: Czwalina.
- Schorer, J., Baker, J., Fath, F. & Jaitner, T. (2007). Identification of Interindividual and Intraindividual Movement Patterns in Handball Players of Varying Expertise Levels. *Journal of Motor Behaviour*, 39 (5), 409-421.
- Schwameder, H., Strutzenberger, G., Fastenbauer, V., Lindinger, S. & Müller, E. (Hrsg.). (2006). *The Proceedings of the XXIV International Symposium on Biomechanics in Sports*. July 14-18, Salzburg (Austria).
- Scurr, J. & Hall, B. (2009). The Effects of approach angle on penalty kicking accuracy and kick kinematics with recreational soccer players. *Journal of Sport Science and Medicine*, 8, 230-234.
- Seay, J. F., Van Emmerik, R. E. & Hamill, J. (2011). Low back pain status affects pelvis-trunk coordination and variability during walking and running. *Clinical Biomechanics*, 26 (6), 572-578.
- Sforza, C., Dugnani, S., Mauro, F., Torri, L. & Ferrario, V. F. (1997). Repeatability of the football penalty: a statistical evaluation by the morphological variation analysis. In T. Reilly, J. Bangsbo & M. Hughes (Hrsg.), *Science and Football III. The Proceedings of the Third World Congress on Science and Football* (S. 240-245). Abingdon: Routledge.
- Smeeton, N. J. & Huys, R. (2011). Anticipation of tennis-shot direction from whole-body movement: the role of movement amplitude and dynamics. *Human Movement Science*, 30 (5), 957-965.
- Spratford, W., Mellifont, R. & Burkett, B. (2009). The Influence of dive direction on the movement characteristics for elite football goalkeepers. *Sports Biomechanics*, 8 (3), 235-244.
- Sterzing, T., Lange, J. S., Wächtler, T., Müller, C. & Milani, T. L. (2009). Velocity and accuracy as performance criteria for three different soccer kicking techniques. In A. J. Harris, R. Anderson & I. Kenny (Hrsg.), *The Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports*. August 17-21, Limerick (Ireland).
- Teixeira, L. A. (1999). Kinematics of kicking as a function of different sources of constraint on accuracy. *Perceptual and Motor Skills*, 88, 785-789.
- Tepavac, D. & Field-Note, E. C. (2001). Vector Coding: A Technique for Quantification of Intersegmental Coupling in Multicyclic Behaviors. *Journal of Applied Biomechanics*, 17, 259-270.
- van der Kamp, J. (2006). A field simulation study of the effectiveness of penalty kick strategies in soccer: late alterations of kick direction increase errors and reduce accuracy. *Journal of Sports Sciences*, 24 (5), 467-477.
- van der Kamp, J. & Masters, R. S. W. (2008). The human Mueller-Lyer illusion in goalkeeping. *Perception*, 37, 951-954.
- van Emmerik, R. E. A. & Wagenaar, R. C. (1996). Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking. *Human Movement Science*, 29 (9), 1175-1184.
- Wheat, J. S. & Glazier, P. S. (2006). Measuring Coordination and Variability in Coordination. In K. Davids, S. Bennett & K. Newell (Hrsg.), *Movement System Variability* (S. 167-184). Champaign: Human Kinetics.
- Williams, A. M. & Burwitz, L. (1995). Advance cue utilization in soccer. In J. Clarys, T. Reilly & A. Stibbe (Hrsg.), *Science and Football II: Proceedings of the Second World Congress of Science and Football* (S. 239-243). London: Spon.
- Williams, A. M. & Griffiths, I. W. (2002). A kinematic analysis of the prevalence of pre-impact cues in the football penalty kick. *Journal of Sports Sciences*, 20 (1), 74.

- Willimczik, K. (1999). *Statistik im Sport. Grundlagen - Verfahren - Anwendungen*. Hamburg: Czwalina.
- Wilson, C., Gittoes, M. & Heywood, P. (2008). The effect of pace on stride characteristics and variability in sprint running. In Y.-H. Kwon, J. Shim, J. K. Shim & I.-S. Shin (Hrsg.), *The Proceedings of the XXVI International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 456-459). July 14-18, Seoul.
- Wilson, C., Simpson, S., Hamill, J. & Van Emmerik, R. (2007). Changes in coordination variability with skill development in expert performers. In H.-J. Menzel & M. H. chagas (Hrsg.), *The Proceedings of the XXV International Symposium on Biomechanics in Sports* (S. 269-272). August, 23-27, Ouro Petro (Brazil).
- Wilson, C., Simpson, S. E., van Emmerik, R. E. & Hamill, J. (2008). Coordination variability and skill development in expert triple jumpers. *Sports Biomechanics*, 7 (1), 2-9.
- Witte, K., Schobesberger, H. & Peham, C. (2009). Motion pattern analysis of gait in horseback riding by means of Principal Component Analysis. *Human Movement Science*, 28 (3), 394-405.
- Wood, G. (2010). *Anxiety and attentional control in football penalty kicks: A mechanistic account of performance failure under pressure*. Dissertation, University of Exeter.
- Wood, G. & Wilson, M. R. (2010a). Gaze behaviour and shooting strategies in football penalty kicks: Implications of a 'keeper-dependent' approach. *International Journal of Sport Psychology*, 41, 293-312.
- Wood, G. & Wilson, M. R. (2010b). A moving goalkeeper distracts penalty takers and impairs shooting accuracy. *Journal of Sports Sciences*, 28 (9), 937-946.
- Wu, J., Wang, J. & Liu, L. (2007). Feature extraction via KPCA for classification of gait patterns. *Human Movement Science*, 26 (3), 393-411.
- Zhou, P. & Inomata, K. (2009). The optimum penalty kick strategies of professional soccer players. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 7 (4), 549-551.



## Anhang

### Anhang A:

Tab. 42. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für das Merkmal Winkel-Verlauf bei pBM

Spieler	LVS-LLS				LLS-STB				STB-BK				Mittelwert aus 4 Zielfeldern		
	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU	LVS-LLS	LLS-STB	STB-BK
AM	9,1	14,3	8,8	7,4	12,2	10,8	9,8	10,9	8,7	11,6	13,7	6,9	9,9	10,9	10,2
AZ	11,7	4,7	11,3	20,7	17,6	7,9	13,7	17,9	11,7	7,5	23,9	11,8	12,1	14,3	13,7
CS	9,6	11,1	15,8	8,0	8,6	10,1	9,5	11,2	9,2	9,9	7,6	12,3	11,1	9,9	9,8
DH	10,3	33,2	6,8	6,6	7,8	26,0	8,4	9,1	11,3	20,6	13,5	6,9	14,2	12,8	13,1
DR	11,0	11,6	9,4	7,3	8,0	7,1	9,8	12,5	14,3	9,1	8,2	13,0	9,9	9,4	11,1
DJ	7,6	11,5	11,7	7,3	8,5	11,5	12,0	8,2	11,5	10,2	7,3	7,3	9,5	10,0	9,1
EH	6,8	9,2	6,9	6,7	5,0	11,7	9,5	7,1	5,9	13,6	12,4	9,3	7,4	8,3	10,3
MR1	7,5	16,4	7,9	11,3	10,6	8,4	11,1	6,8	10,9	7,4	6,8	11,1	10,8	9,2	9,1
ML	8,2	9,5	7,7	12,6	14,8	6,3	11,2	13,6	9,6	7,4	11,7	11,7	9,5	11,5	10,1
MB	16,6	12,4	7,8	9,8	8,5	14,2	7,0	9,8	12,2	13,6	4,5	9,4	11,7	9,9	9,9
MM	7,2	6,9	15,3	7,8	11,2	14,1	19,8	8,8	8,7	11,6	10,4	10,6	9,3	13,5	10,3
MV	13,2	12,3	17,5	15,5	10,4	14,3	13,1	12,3	12,4	14,3	9,1	17,4	14,6	12,5	13,3
MR2	9,9	9,3	8,5	10,6	10,0	10,3	10,6	11,4	6,5	9,8	10,5	11,3	9,6	10,6	9,5
NA	16,3	13,1	33,8	13,9	15,6	16,2	27,5	6,7	8,5	12,0	19,1	9,9	19,3	16,5	12,3
RS	8,7	7,7	7,2	11,3	11,2	8,5	9,1	11,0	9,0	12,4	9,2	9,7	8,7	10,0	10,1
RP	6,0	10,9	11,0	9,0	9,6	16,2	18,3	9,0	9,0	6,1	10,5	9,5	9,2	13,3	8,8
SZ	10,6	9,5	8,4	9,9	11,7	13,2	9,3	12,1	14,4	10,6	9,7	11,1	9,6	11,5	11,4
SE	7,9	12,5	12,5	8,7	6,6	9,5	7,8	11,8	11,7	10,2	7,9	10,1	10,4	8,9	10,0
SW	12,5	13,3	11,3	5,8	8,7	7,5	7,1	10,3	11,3	8,4	10,0	12,9	10,7	8,4	10,7
TS	9,0	10,2	3,7	11,6	6,3	10,6	8,9	10,7	11,0	9,7	9,6	16,3	8,6	9,1	11,7
UR	12,5	11,1	11,4	12,7	12,7	9,5	9,7	15,1	8,2	9,0	10,0	18,6	11,9	11,8	11,4
<b>Mittelwert</b>	<b>10,1</b>	<b>11,9</b>	<b>11,2</b>	<b>10,2</b>	<b>10,3</b>	<b>11,6</b>	<b>11,6</b>	<b>10,8</b>	<b>10,3</b>	<b>10,7</b>	<b>10,7</b>	<b>11,3</b>	<b>10,9</b>	<b>11,1</b>	<b>10,8</b>

**Anhang B:**Tab. 43. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für das Merkmal Winkelgeschwindigkeit bei  $p_{BM}$ 

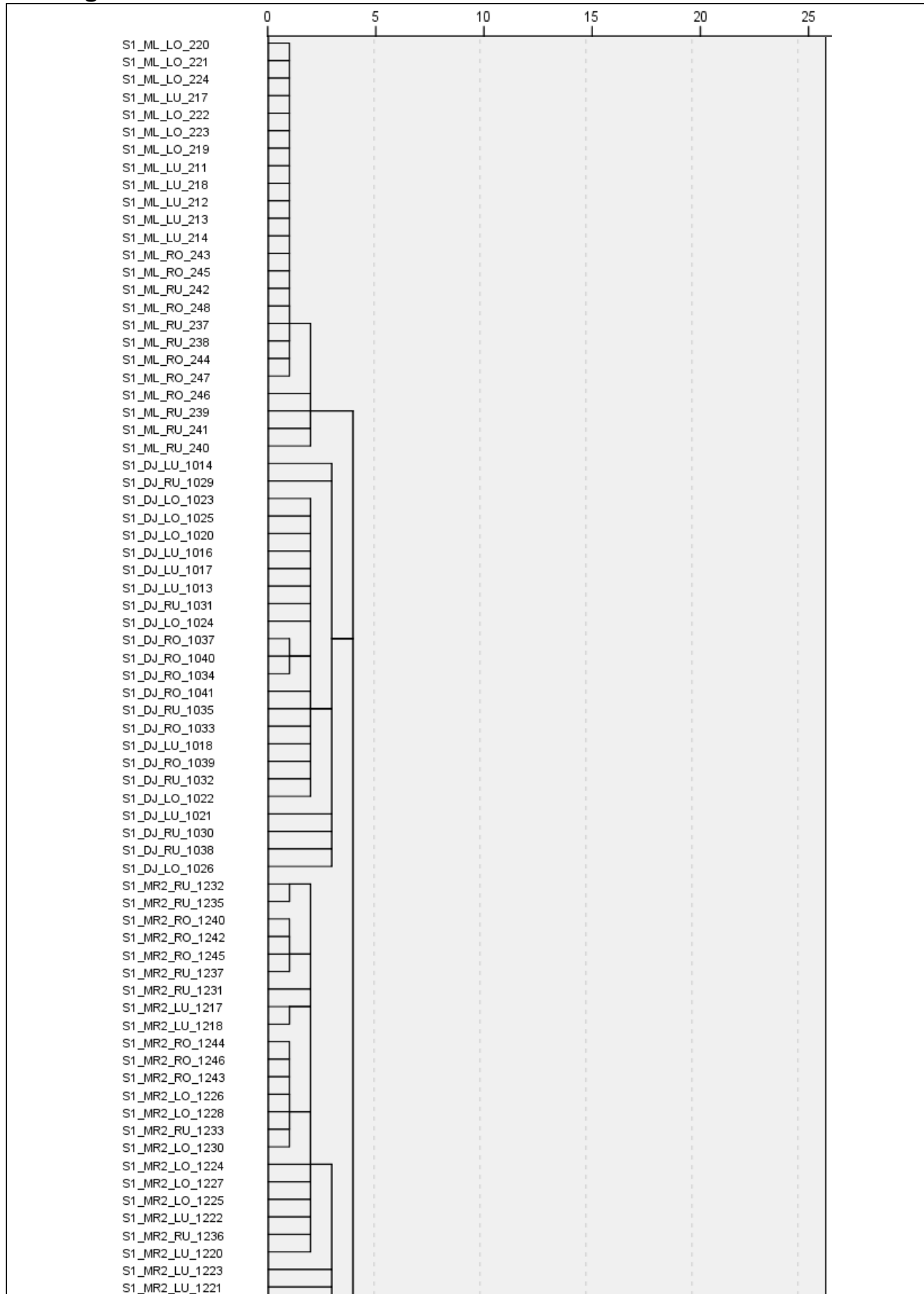
Spieler	LVS-LLS				LLS-STB				STB-BK				Mittelwert aus 4 Zielfeldern		
	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU	LVS-LLS	LLS-STB	STB-BK
AM	5,3	7,2	5,6	5,4	10,3	10,3	9,1	9,3	10,4	8,0	14,9	7,7	5,9	9,8	10,2
AZ	13,7	5,8	3,1	17,1	8,9	3,7	7,8	11,8	11,6	10,0	6,1	9,7	9,9	8,1	9,4
CS	8,5	11,3	13,4	9,5	7,4	7,7	10,0	7,8	11,9	8,1	5,4	8,8	10,7	8,2	8,6
DH	4,8	14,1	6,6	3,9	6,3	14,6	6,6	5,1	8,3	12,8	8,0	5,9	7,4	8,2	8,8
DR	9,3	6,4	8,0	4,5	12,2	6,8	6,3	7,2	11,0	6,9	8,2	8,9	7,1	8,1	8,7
DJ	4,5	6,9	8,0	4,1	5,6	7,3	9,7	5,1	5,9	9,9	9,2	4,4	5,9	6,9	7,4
EH	4,5	8,4	3,8	3,8	4,0	11,1	8,1	8,5	5,0	13,9	11,0	8,7	5,1	7,9	9,7
MR1	5,8	9,3	7,1	8,2	10,6	4,7	9,3	8,0	8,6	7,9	7,3	9,4	7,6	8,1	8,3
ML	21,4	6,6	15,5	11,9	24,3	7,5	18,5	15,4	21,2	8,5	19,0	19,9	13,9	16,4	17,1
MB	9,5	8,5	5,9	4,5	11,4	8,2	8,9	5,8	9,6	11,9	4,4	4,9	7,1	8,5	7,7
MM	5,9	4,3	9,9	5,7	8,6	10,9	11,8	6,3	8,7	13,6	13,5	8,5	6,4	9,4	11,1
MV	10,8	9,7	16,7	12,0	10,0	6,9	10,5	10,2	10,3	13,6	7,0	6,5	12,3	9,4	9,4
MR2	4,2	4,0	4,1	9,4	7,4	5,6	6,8	10,3	7,4	8,8	10,0	8,6	5,4	7,5	8,7
NA	9,5	9,2	19,1	9,5	8,9	11,0	21,7	8,3	5,3	13,1	16,0	9,6	11,8	12,5	11,0
RS	7,6	8,2	5,2	12,0	7,9	5,6	7,7	9,9	10,5	7,6	7,1	8,7	8,2	7,8	8,5
RP	4,1	7,3	6,4	7,3	7,0	8,2	15,5	5,9	5,8	5,7	7,5	9,4	6,3	9,1	7,1
SZ	7,3	7,8	8,0	8,5	11,7	6,9	8,9	9,1	12,5	10,9	9,6	4,6	7,9	9,2	9,4
SE	6,6	6,9	4,9	6,6	10,6	7,2	5,3	7,5	8,0	7,2	7,9	5,2	6,3	7,6	7,0
SW	8,2	9,9	5,4	6,0	7,4	8,7	4,2	9,5	7,8	7,2	5,4	12,5	7,4	7,5	8,2
TS	6,7	16,5	12,1	11,3	6,3	17,1	12,2	11,2	6,0	17,4	14,7	14,1	11,6	11,7	13,1
UR	7,1	5,6	8,0	9,2	8,7	8,8	8,7	9,3	7,7	6,4	9,0	13,5	7,5	8,9	9,1
<b>Mittelwert</b>	<b>7,9</b>	<b>8,3</b>	<b>8,4</b>	<b>8,1</b>	<b>9,3</b>	<b>8,5</b>	<b>9,9</b>	<b>8,6</b>	<b>9,2</b>	<b>10,0</b>	<b>9,6</b>	<b>9,0</b>	<b>8,2</b>	<b>9,1</b>	<b>9,4</b>

## Anhang C:

Tab. 44. Variabilitätskoeffizienten (%) der Bedingung Baseline für das Merkmal Ortskoordinaten der Gelenkmittelpunkte bei pBM

Spieler	LVS-LLS				LLS-STB				STB-BK				Mittelwert aus 4 Zielfeldern		
	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU	LO	LU	RO	RU	LVS-LLS	LLS-STB	STB-BK
AM	26,1	19,3	24,0	33,0	35,6	24,6	41,4	36,1	21,2	14,8	29,4	20,3	25,6	34,4	21,4
AZ	33,7	16,0	32,0	55,5	35,7	23,3	49,3	55,4	28,0	22,0	39,8	28,0	34,3	40,9	29,5
CS	34,9	37,4	37,1	35,2	28,6	38,3	27,9	37,5	22,6	30,3	19,4	48,2	36,1	33,1	30,1
DH	25,0	56,3	29,4	27,0	33,2	58,9	21,8	18,5	22,9	48,3	36,9	21,8	34,4	33,1	32,5
DR	51,3	35,9	48,0	28,9	25,7	33,2	35,2	51,9	16,8	22,8	11,5	15,7	41,0	36,5	16,7
DJ	23,3	20,5	21,5	23,8	22,7	44,5	33,1	30,3	20,1	22,2	24,6	18,6	22,3	32,7	21,4
EH	51,3	22,9	46,6	19,6	22,2	33,5	23,4	26,7	15,6	29,8	21,5	14,3	35,1	26,4	20,3
MR1	38,2	33,8	23,5	20,7	24,7	22,8	23,4	24,7	21,9	24,3	34,6	28,0	29,0	23,9	27,2
ML	19,3	24,4	35,1	33,2	18,1	24,6	28,3	38,4	17,6	28,5	15,1	24,0	28,0	27,4	21,3
MB	26,8	21,0	17,6	25,0	28,9	35,3	25,0	17,8	20,8	23,1	14,0	43,1	22,6	26,7	25,2
MM	22,9	30,1	37,2	31,7	26,3	21,7	34,4	23,0	28,5	31,1	25,3	19,1	30,5	26,4	26,0
MV	50,3	30,1	34,8	40,4	38,7	43,4	33,1	36,6	45,1	34,8	31,0	22,6	38,9	38,0	33,4
MR2	18,6	35,9	27,9	45,9	30,8	16,2	77,7	43,5	18,8	25,0	23,5	25,6	32,1	42,1	23,2
NA	33,6	31,6	54,3	26,1	34,3	33,3	58,4	39,0	19,9	29,2	46,7	25,8	36,4	41,3	30,4
RS	31,2	44,3	34,8	24,4	19,1	25,2	21,8	25,7	25,2	23,8	15,1	15,9	33,7	23,0	20,0
RP	32,3	39,2	34,5	27,9	46,9	27,1	37,9	33,6	38,6	28,7	26,5	26,1	33,4	36,4	30,0
SZ	24,1	22,0	16,9	25,2	55,3	17,8	25,6	37,6	25,1	23,8	28,4	27,5	22,1	34,1	26,2
SE	30,4	24,8	18,9	39,6	73,8	48,7	27,8	26,3	32,7	23,3	22,3	24,2	28,4	44,2	25,6
SW	44,8	40,3	24,1	25,8	34,4	32,4	28,9	21,9	21,8	16,4	25,0	48,3	33,7	29,4	27,9
TS	24,0	30,4	18,7	28,8	46,0	15,7	38,4	40,9	23,8	25,6	24,6	28,4	25,5	35,3	25,6
UR	25,7	26,0	43,2	53,2	23,5	35,2	37,7	49,8	29,2	23,7	21,4	36,2	37,0	36,5	27,6
<b>Mittelwert</b>	<b>31,8</b>	<b>30,6</b>	<b>31,4</b>	<b>32,0</b>	<b>33,6</b>	<b>31,2</b>	<b>34,8</b>	<b>34,1</b>	<b>24,6</b>	<b>26,3</b>	<b>25,6</b>	<b>26,7</b>	<b>31,4</b>	<b>33,4</b>	<b>25,8</b>

## Anhang D:



S1\_EH\_LU\_1188  
 S1\_EH\_LU\_1190  
 S1\_EH\_LU\_1193  
 S1\_EH\_LU\_1189  
 S1\_EH\_LU\_1192  
 S1\_EH\_RU\_1207  
 S1\_EH\_RO\_1209  
 S1\_EH\_RU\_1202  
 S1\_EH\_LO\_1198  
 S1\_EH\_RU\_1206  
 S1\_EH\_LU\_1191  
 S1\_EH\_RO\_1213  
 S1\_EH\_RU\_1204  
 S1\_EH\_LO\_1200  
 S1\_EH\_RO\_1211  
 S1\_EH\_RU\_1205  
 S1\_EH\_LO\_1194  
 S1\_EH\_RO\_1216  
 S1\_EH\_RO\_1215  
 S1\_EH\_RO\_1208  
 S1\_EH\_LO\_1196  
 S1\_EH\_RU\_1203  
 S1\_MM\_RU\_800  
 S1\_MM\_RU\_804  
 S1\_MM\_RU\_797  
 S1\_NA\_LO\_15  
 S1\_NA\_LO\_18  
 S1\_NA\_LU\_05  
 S1\_NA\_LO\_17  
 S1\_NA\_LU\_06  
 S1\_NA\_RO\_37  
 S1\_NA\_RO\_40  
 S1\_NA\_RO\_41  
 S1\_NA\_RO\_42  
 S1\_NA\_LO\_14  
 S1\_NA\_LU\_04  
 S1\_NA\_LU\_01  
 S1\_NA\_LO\_16  
 S1\_NA\_LU\_02  
 S1\_NA\_RU\_27  
 S1\_NA\_RU\_28  
 S1\_NA\_RU\_25  
 S1\_NA\_RU\_30  
 S1\_NA\_RU\_26  
 S1\_NA\_LO\_13  
 S1\_NA\_LU\_03  
 S1\_NA\_RO\_38  
 S1\_NA\_RU\_29  
 S1\_AZ\_RU\_34  
 S1\_AZ\_RU\_35  
 S1\_AZ\_LU\_08  
 S1\_AZ\_LU\_07  
 S1\_AZ\_RU\_36  
 S1\_AZ\_LU\_10  
 S1\_AZ\_LO\_23  
 S1\_AZ\_LO\_21  
 S1\_AZ\_LO\_24  
 S1\_AZ\_LO\_22  
 S1\_AZ\_RO\_44  
 S1\_AZ\_LU\_11  
 S1\_AZ\_LU\_12  
 S1\_AZ\_LU\_09  
 S1\_AZ\_RU\_33  
 S1\_AZ\_RU\_32  
 S1\_AZ\_LO\_19  
 S1\_AZ\_RO\_46  
 S1\_AZ\_RO\_48  
 S1\_AZ\_RU\_31  
 S1\_AZ\_RO\_47

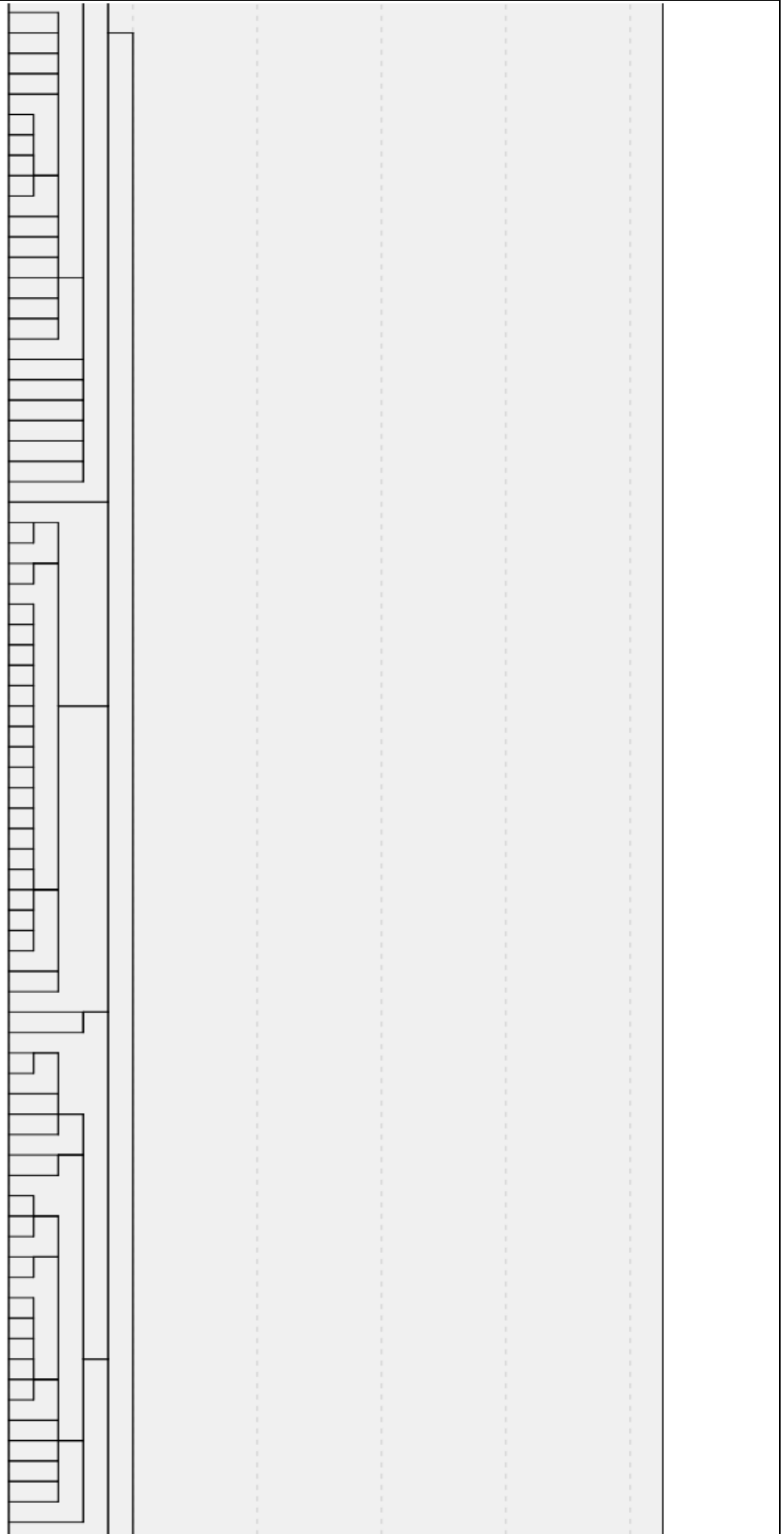
The table contains the following columns from left to right:
 

- A column for the part names, listed on the left side of the image.
- A column for length dimensions, represented by vertical double-headed arrows.
- A column for width dimensions, represented by horizontal double-headed arrows.
- A column for thickness dimensions, represented by vertical double-headed arrows.
- A column for material specifications, represented by vertical double-headed arrows.
- A column for surface treatment or finish, represented by vertical double-headed arrows.
- A column for tolerances, represented by vertical double-headed arrows.
- A column for drawing scale or other technical notes, represented by vertical double-headed arrows.

S1_DH_LO_166							
S1_DH_LO_168							
S1_DH_LO_169							
S1_DH_LU_158							
S1_DH_RO_177							
S1_DH_RU_172							
S1_DH_RU_176							
S1_DH_LU_160							
S1_DH_RU_173							
S1_DH_RU_174							
S1_DH_RU_171							
S1_DH_LU_161							
S1_DH_LO_165							
S1_DH_LO_170							
S1_DH_RO_178							
S1_DH_RO_181							
S1_DH_RO_180							
S1_DH_LO_167							
S1_DH_RO_182							
S1_DH_RU_175							
S1_DH_LU_162							
S1_UR_RO_652							
S1_UR_RU_653							
S1_UR_RO_648							
S1_UR_RU_649							
S1_UR_LO_630							
S1_UR_LU_623							
S1_UR_RU_650							
S1_UR_RO_657							
S1_UR_RO_663							
S1_UR_RO_659							
S1_UR_LU_626							
S1_UR_LO_629							
S1_UR_LO_631							
S1_UR_LU_622							
S1_UR_LU_625							
S1_UR_LO_627							
S1_UR_LO_628							
S1_UR_LO_632							
S1_UR_LU_621							
S1_UR_RO_656							
S1_UR_LU_624							
S1_UR_RU_654							
S1_UR_RU_655							
S1_TS_RU_227							
S1_TS_RU_229							
S1_TS_RU_225							
S1_TS_RU_228							
S1_TS_RO_233							
S1_TS_RO_236							
S1_TS_RO_234							
S1_TS_RO_235							
S1_TS_RO_232							
S1_TS_LU_200							
S1_TS_LU_202							
S1_TS_LO_205							
S1_TS_LO_206							
S1_TS_LO_209							
S1_TS_LO_204							
S1_TS_LO_207							
S1_TS_LO_210							
S1_TS_LU_203							
S1_TS_RO_231							
S1_TS_LU_198							
S1_TS_LU_201							
S1_TS_LU_199							
S1_TS_RU_226							
S1_TS_RU_230							

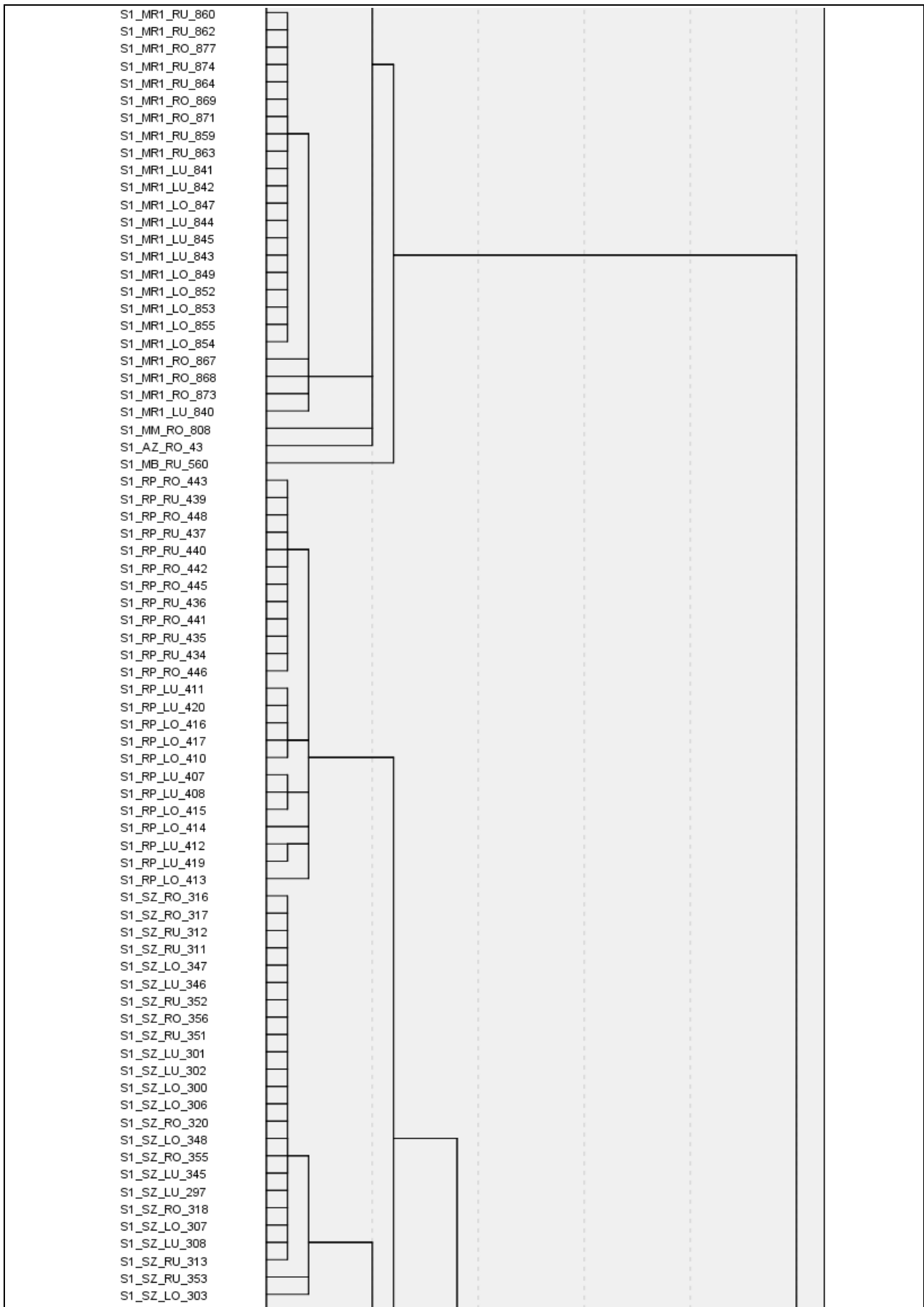
S1\_MM\_RO\_799  
S1\_MM\_RU\_802  
S1\_MM\_LO\_791  
S1\_MM\_LU\_783  
S1\_MM\_LO\_793  
S1\_MM\_LO\_790  
S1\_MM\_LO\_796  
S1\_MM\_LU\_786  
S1\_MM\_LO\_795  
S1\_MM\_LU\_782  
S1\_MM\_RO\_815  
S1\_MM\_LU\_787  
S1\_MM\_LU\_788  
S1\_MM\_RO\_813  
S1\_MM\_RU\_798  
S1\_MM\_LU\_785  
S1\_MM\_RO\_806  
S1\_MM\_RO\_814  
S1\_DH\_RO\_179  
S1\_MM\_LO\_794  
S1\_AZ\_LO\_20  
S1\_AZ\_RO\_45  
S1\_DH\_LU\_164  
S1\_MM\_RU\_801  
S1\_EH\_LO\_1195  
S1\_SE\_RU\_921  
S1\_SE\_RU\_922  
S1\_SE\_RO\_932  
S1\_SE\_RO\_933  
S1\_SE\_LU\_909  
S1\_SE\_LU\_911  
S1\_SE\_LO\_912  
S1\_SE\_LO\_916  
S1\_SE\_LO\_918  
S1\_SE\_RU\_925  
S1\_SE\_LU\_902  
S1\_SE\_LU\_905  
S1\_SE\_LO\_908  
S1\_SE\_LU\_934  
S1\_SE\_RO\_926  
S1\_SE\_RO\_928  
S1\_SE\_RO\_930  
S1\_SE\_LU\_903  
S1\_SE\_RU\_923  
S1\_SE\_RU\_924  
S1\_SE\_LO\_913  
S1\_SE\_LO\_914  
S1\_SE\_RO\_927  
S1\_SE\_RU\_920  
S1\_SW\_RU\_1080  
S1\_SW\_RU\_1084  
S1\_CS\_LO\_639  
S1\_CS\_LO\_645  
S1\_CS\_LU\_633  
S1\_CS\_RU\_668  
S1\_CS\_LO\_646  
S1\_CS\_RO\_673  
S1\_CS\_RO\_680  
S1\_CS\_LU\_634  
S1\_CS\_LU\_638  
S1\_CS\_LO\_642  
S1\_CS\_LO\_641  
S1\_CS\_LO\_647  
S1\_CS\_RO\_678  
S1\_CS\_RO\_679  
S1\_CS\_RO\_681  
S1\_CS\_RU\_670  
S1\_CS\_RU\_671  
S1\_CS\_LU\_636  
S1\_CS\_RU\_669  
S1\_CS\_LU\_640  
S1\_CS\_RU\_664  
S1\_CS\_LU\_635  
S1\_CS\_RU\_672  
S1\_CS\_RO\_675

Y



S1_SW_RO_1089						
S1_SW_RO_1091						
S1_SW_RO_1086						
S1_SW_RO_1087						
S1_SW_RU_1082						
S1_SW_RU_1085						
S1_SW_RO_1088						
S1_SW_RU_1081						
S1_SW_RU_1083						
S1_SW_RO_1090						
S1_SW_LO_1075						
S1_SW_LU_1073						
S1_SW_LO_1079						
S1_SW_LU_1067						
S1_SW_LU_1070						
S1_SW_LU_1068						
S1_SW_LO_1072						
S1_SW_LU_1071						
S1_SW_LO_1076						
S1_SW_LU_1066						
S1_SW_LO_1074						
S1_SW_LO_1078						
S1_EH_LO_1197						
S1_MB_RO_562						
S1_MB_RU_558						
S1_MB_LO_522						
S1_MB_LU_523						
S1_MB_LU_517						
S1_MB_LU_520						
S1_MB_LO_519						
S1_MB_LU_518						
S1_MB_LU_524						
S1_MB_LO_530						
S1_MB_LU_531						
S1_MB_RU_555						
S1_MB_RU_563						
S1_MB_LO_525						
S1_MB_LO_527						
S1_MB_LO_526						
S1_MB_RO_567						
S1_MB_RO_553						
S1_MB_RU_559						
S1_MB_RO_566						
S1_MB_RO_569						
S1_MB_RU_570						
S1_MB_RO_571						
S1_AM_RU_972						
S1_AM_RU_973						
S1_AM_LO_967						
S1_AM_LO_970						
S1_AM_LO_969						
S1_AM_LO_971						
S1_AM_LU_959						
S1_AM_LU_965						
S1_AM_LO_964						
S1_AM_LO_968						
S1_AM_LU_961						
S1_AM_LU_966						
S1_AM_RO_982						
S1_AM_RU_975						
S1_AM_RU_980						
S1_AM_RO_984						
S1_AM_RO_978						
S1_AM_RU_974						
S1_AM_RO_988						
S1_AM_RU_981						
S1_AM_LU_962						
S1_AM_RO_985						
S1_AM_LU_960						
S1_AM_RO_983						
S1_UR_RU_660						





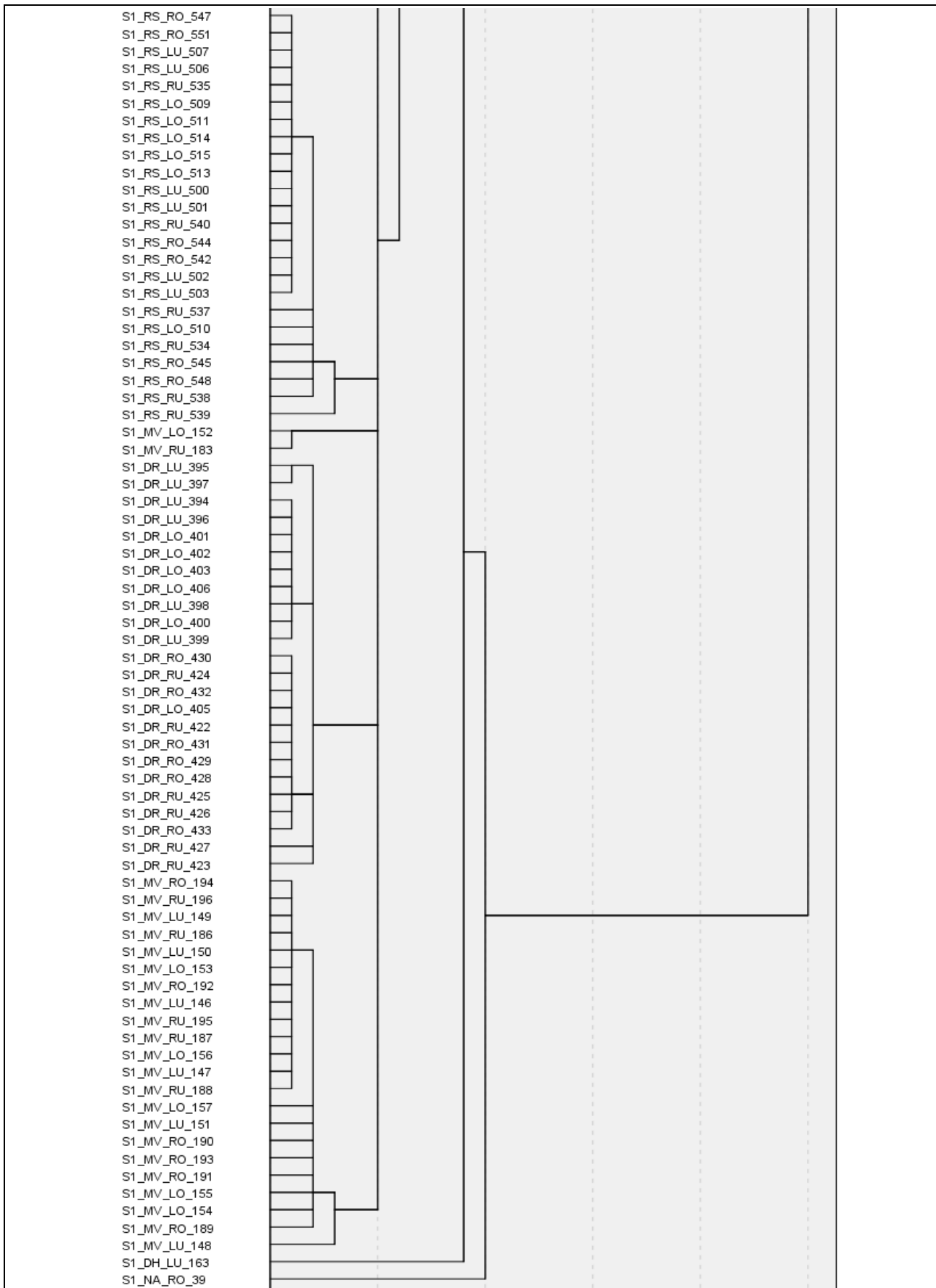
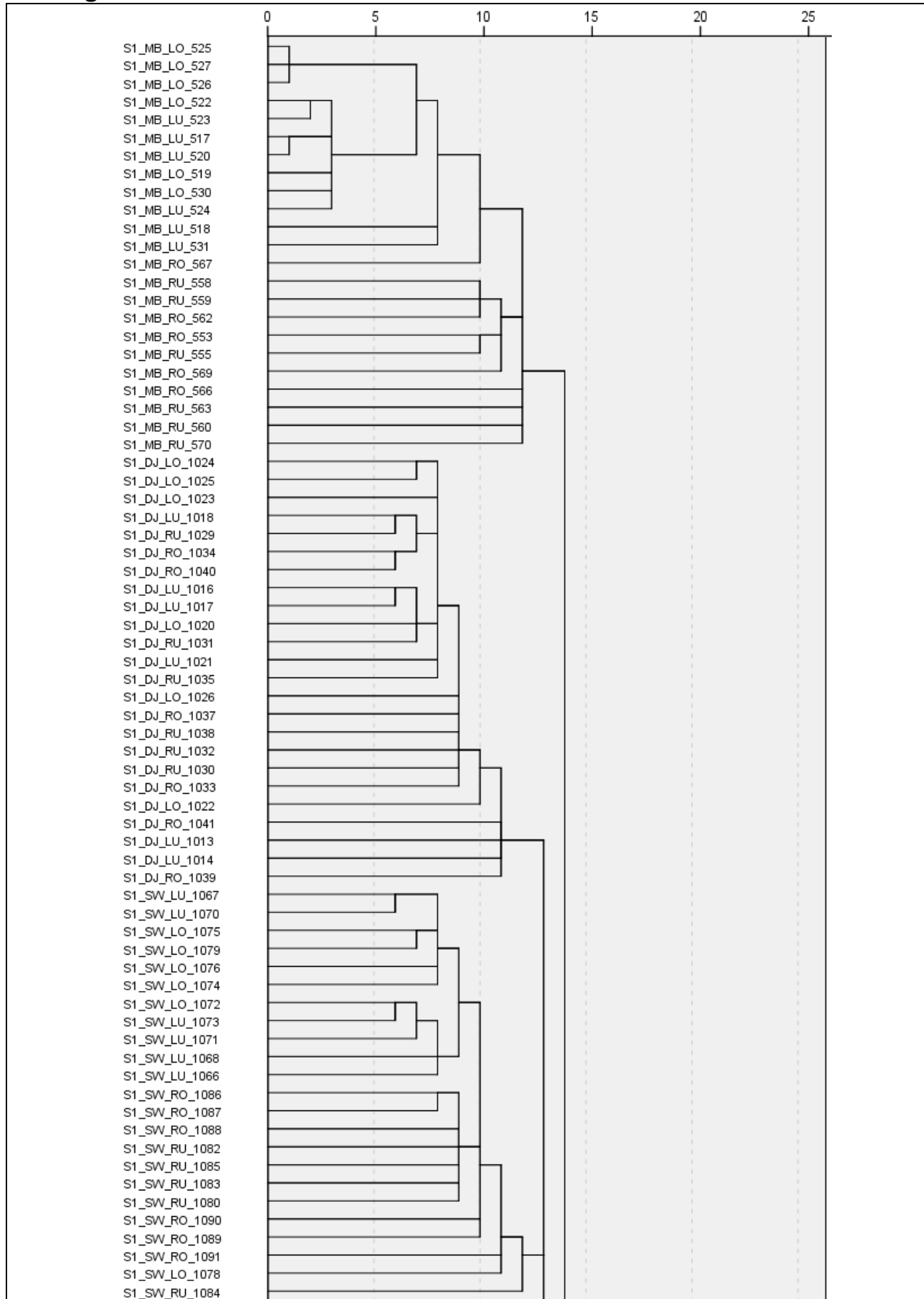
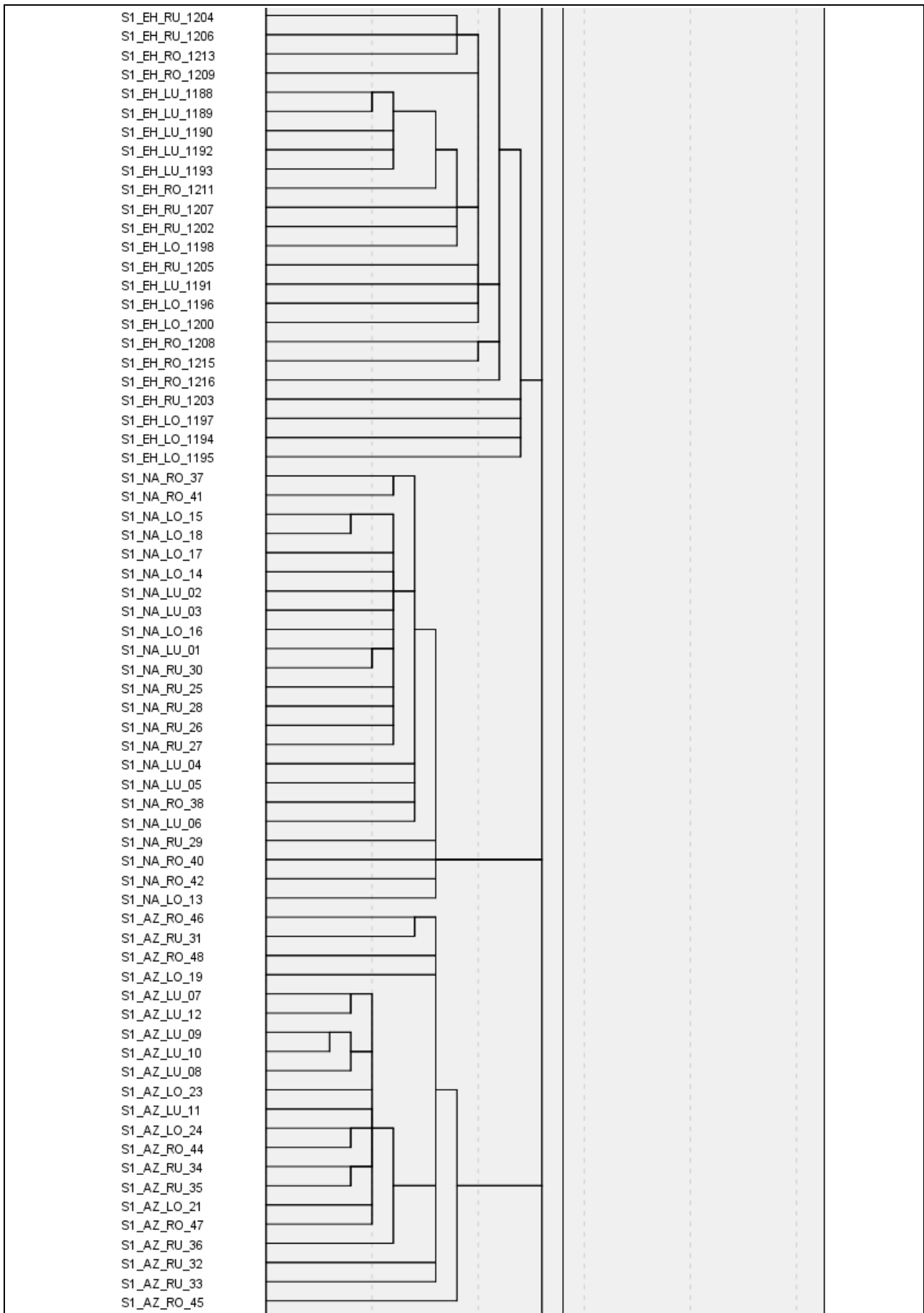


Abb. 88. Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Winkel-Verläufe gBM

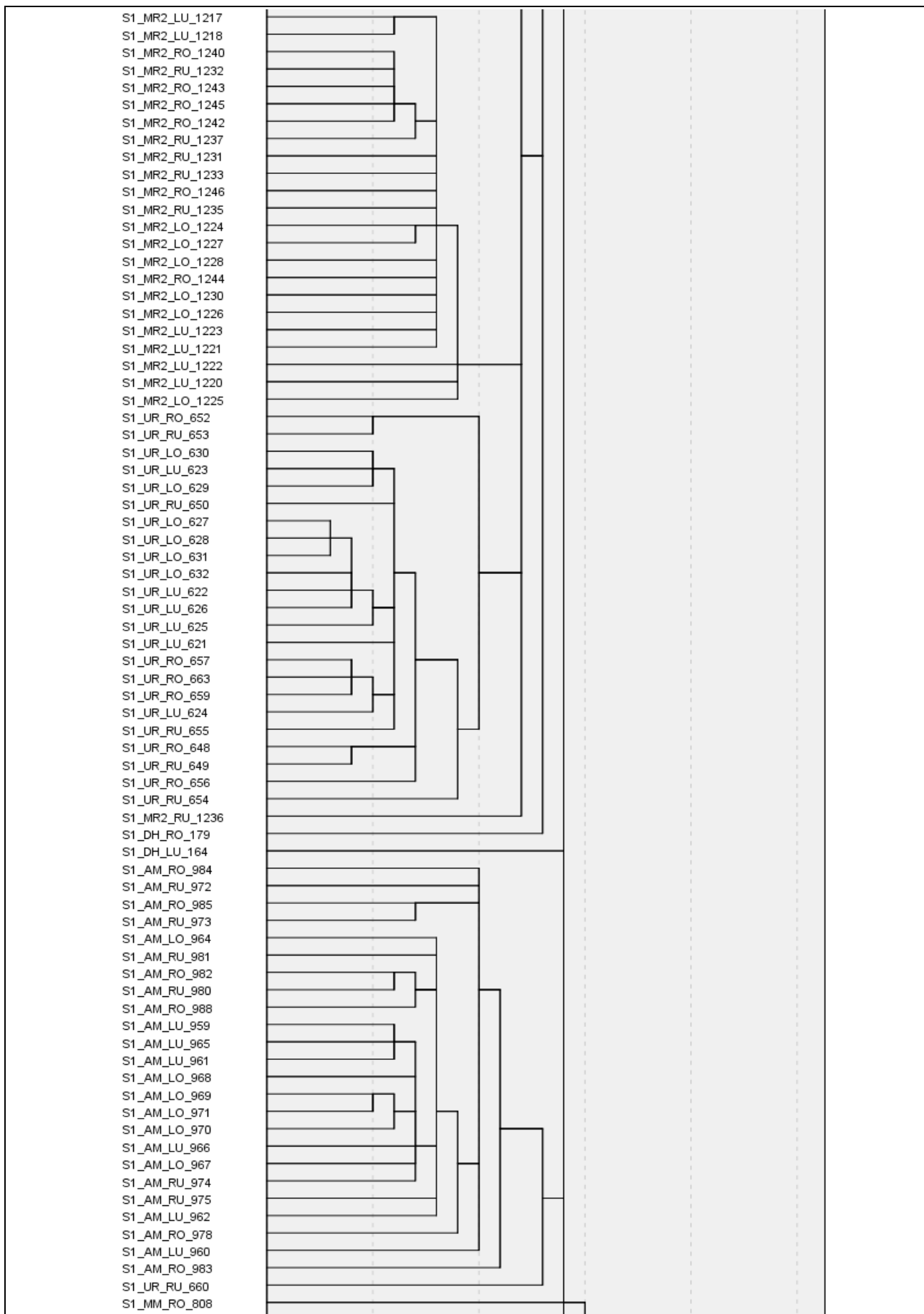
## Anhang E:



S1_SE_RU_923								
S1_SE_RU_924								
S1_SE_RO_932								
S1_SE_RO_933								
S1_SE_LO_908								
S1_SE_LU_902								
S1_SE_LO_912								
S1_SE_LU_909								
S1_SE_LO_914								
S1_SE_LO_916								
S1_SE_LO_918								
S1_SE_LU_934								
S1_SE_RO_930								
S1_SE_LU_905								
S1_SE_RU_925								
S1_SE_RO_926								
S1_SE_RO_927								
S1_SE_RO_928								
S1_SE_LU_911								
S1_SE_LU_903								
S1_SE_RU_921								
S1_SE_RU_922								
S1_SE_LO_913								
S1_SE_RU_920								
S1_ML_RU_239								
S1_ML_RU_241								
S1_ML_RO_245								
S1_ML_RO_247								
S1_ML_LU_213								
S1_ML_LU_214								
S1_ML_LU_217								
S1_ML_LO_220								
S1_ML_LO_221								
S1_ML_LO_223								
S1_ML_LO_224								
S1_ML_LO_219								
S1_ML_LU_218								
S1_ML_LU_212								
S1_ML_LU_211								
S1_ML_RU_237								
S1_ML_RU_238								
S1_ML_RU_242								
S1_ML_RO_243								
S1_ML_RO_244								
S1_ML_RO_248								
S1_CS_LO_641								
S1_CS_LO_647								
S1_CS_LO_642								
S1_CS_RU_664								
S1_CS_LU_635								
S1_CS_LU_638								
S1_CS_LU_634								
S1_CS_LU_636								
S1_CS_RU_669								
S1_CS_RU_671								
S1_CS_RU_670								
S1_CS_RO_678								
S1_CS_RO_681								
S1_CS_RO_679								
S1_CS_RU_672								
S1_CS_LU_640								
S1_CS_RO_673								
S1_CS_RO_680								
S1_CS_LO_639								
S1_CS_LO_645								
S1_CS_LU_633								
S1_CS_RU_668								
S1_CS_LO_646								
S1_CS_RO_675								



S1_DH_LU_158					
S1_DH_LU_162					
S1_DH_LO_165					
S1_DH_LU_160					
S1_DH_RU_174					
S1_DH_RU_176					
S1_DH_RU_175					
S1_DH_RU_172					
S1_DH_RU_173					
S1_DH_LO_166					
S1_DH_LO_169					
S1_DH_RO_177					
S1_DH_RO_178					
S1_DH_LO_167					
S1_DH_LO_170					
S1_DH_RU_171					
S1_DH_RO_180					
S1_DH_LO_168					
S1_DH_LU_161					
S1_DH_RO_181					
S1_DH_RO_182					
S1_TS_RU_225					
S1_TS_RU_226					
S1_TS_RU_228					
S1_TS_RO_233					
S1_TS_RU_227					
S1_TS_RO_232					
S1_TS_LU_201					
S1_TS_LU_202					
S1_TS_LU_200					
S1_TS_LU_199					
S1_TS_LU_203					
S1_TS_LO_204					
S1_TS_LO_207					
S1_TS_RO_231					
S1_TS_RO_236					
S1_MM_RO_799					
S1_MM_RU_802					
S1_MM_LU_785					
S1_MM_LU_788					
S1_MM_RO_813					
S1_MM_RO_815					
S1_MM_LO_791					
Y S1_MM_LU_783					
S1_MM_LO_796					
S1_MM_LU_786					
S1_MM_LO_795					
S1_MM_LU_787					
S1_MM_LU_782					
S1_MM_RO_814					
S1_MM_LO_790					
S1_MM_LO_793					
S1_MM_LO_794					
S1_MM_RU_798					
S1_MM_RO_806					
S1_MM_RU_801					
S1_MM_RU_797					
S1_MM_RU_800					
S1_MM_RU_804					



S1_TS_LO_206					
S1_TS_LO_210					
S1_TS_LO_205					
S1_TS_LO_209					
S1_TS_RO_234					
S1_TS_RU_229					
S1_TS_RO_235					
S1_TS_LU_198					
S1_TS_RU_230					
S1_MR1_RU_862					
S1_MR1_RU_863					
S1_MR1_RU_859					
S1_MR1_RU_860					
S1_MR1_LO_853					
S1_MR1_RO_871					
S1_MR1_LU_841					
S1_MR1_LU_845					
S1_MR1_LU_842					
S1_MR1_LO_849					
S1_MR1_LO_847					
S1_MR1_LU_844					
S1_MR1_LU_843					
S1_MR1_LO_854					
S1_MR1_LO_852					
S1_MR1_LO_855					
S1_MR1_RO_877					
S1_MR1_RU_874					
S1_MR1_RO_867					
S1_MR1_RO_868					
S1_MR1_RO_869					
S1_MR1_RU_864					
S1_MR1_RO_873					
S1_MR1_LU_840					
S1_AZ_LO_20					
S1_AZ_LO_22					
S1_MB_RO_571					
S1_SW_RU_1081					
S1_ML_RO_246					
S1_ML_RU_240					
S1_ML_LO_222					
S1_MV_LO_152					
S1_MV_RU_183					
S1_RP_LU_407					
S1_RP_LU_408					
S1_RP_RO_442					
S1_RP_RU_436					
S1_RP_RU_437					
S1_RP_RU_435					
S1_RP_RO_441					
S1_RP_RO_445					
S1_RP_RO_448					
S1_RP_RO_446					
S1_RP_RU_440					
S1_RP_RU_434					
S1_RP_RU_439					
S1_RP_RO_443					
S1_RP_LO_415					
S1_RP_LO_416					
S1_RP_LO_410					
S1_RP_LU_412					
S1_RP_LU_419					
S1_RP_LO_417					
S1_RP_LU_420					
S1_RP_LO_414					
S1_RP_LO_413					
S1_RP_LU_411					



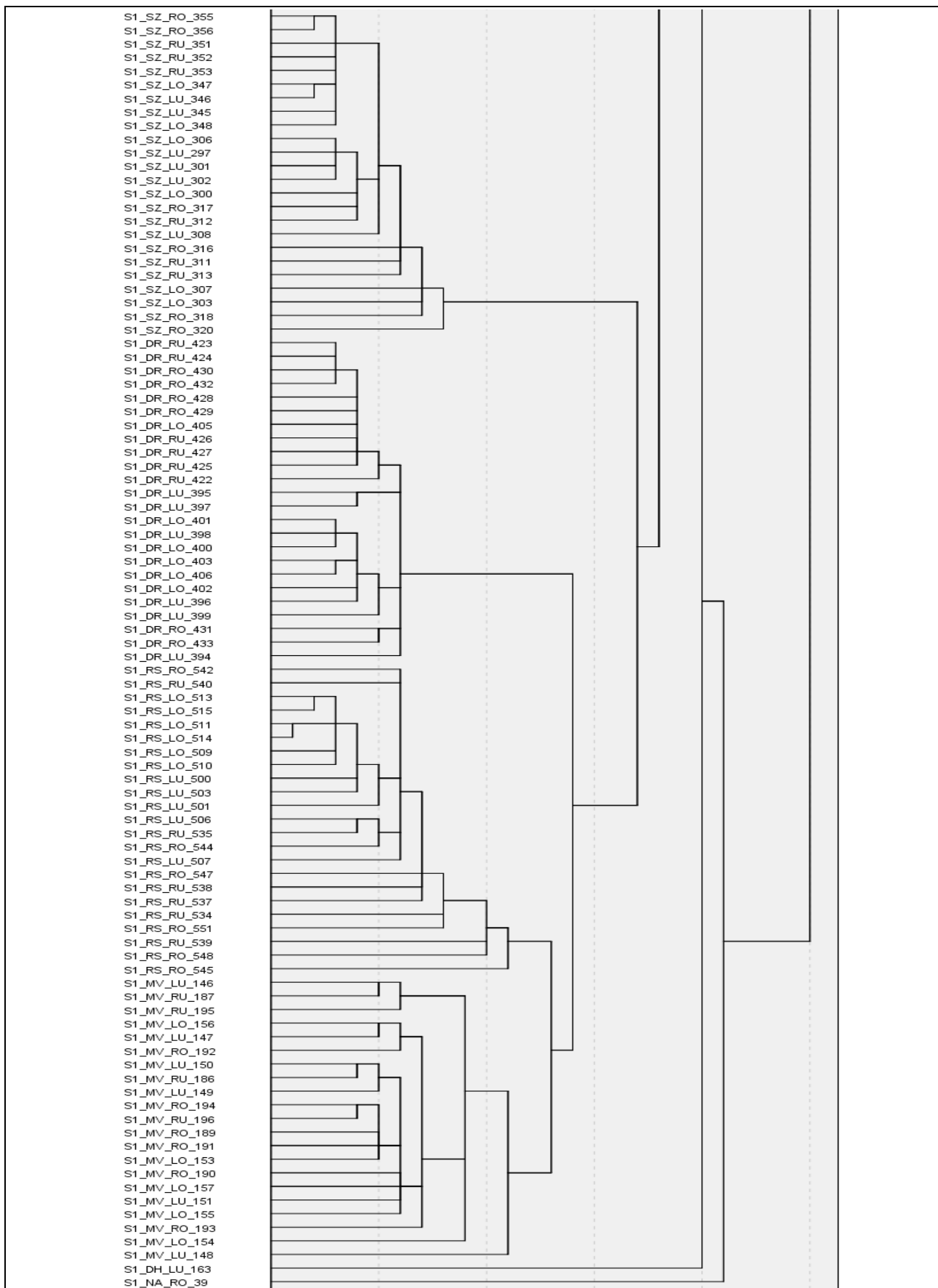
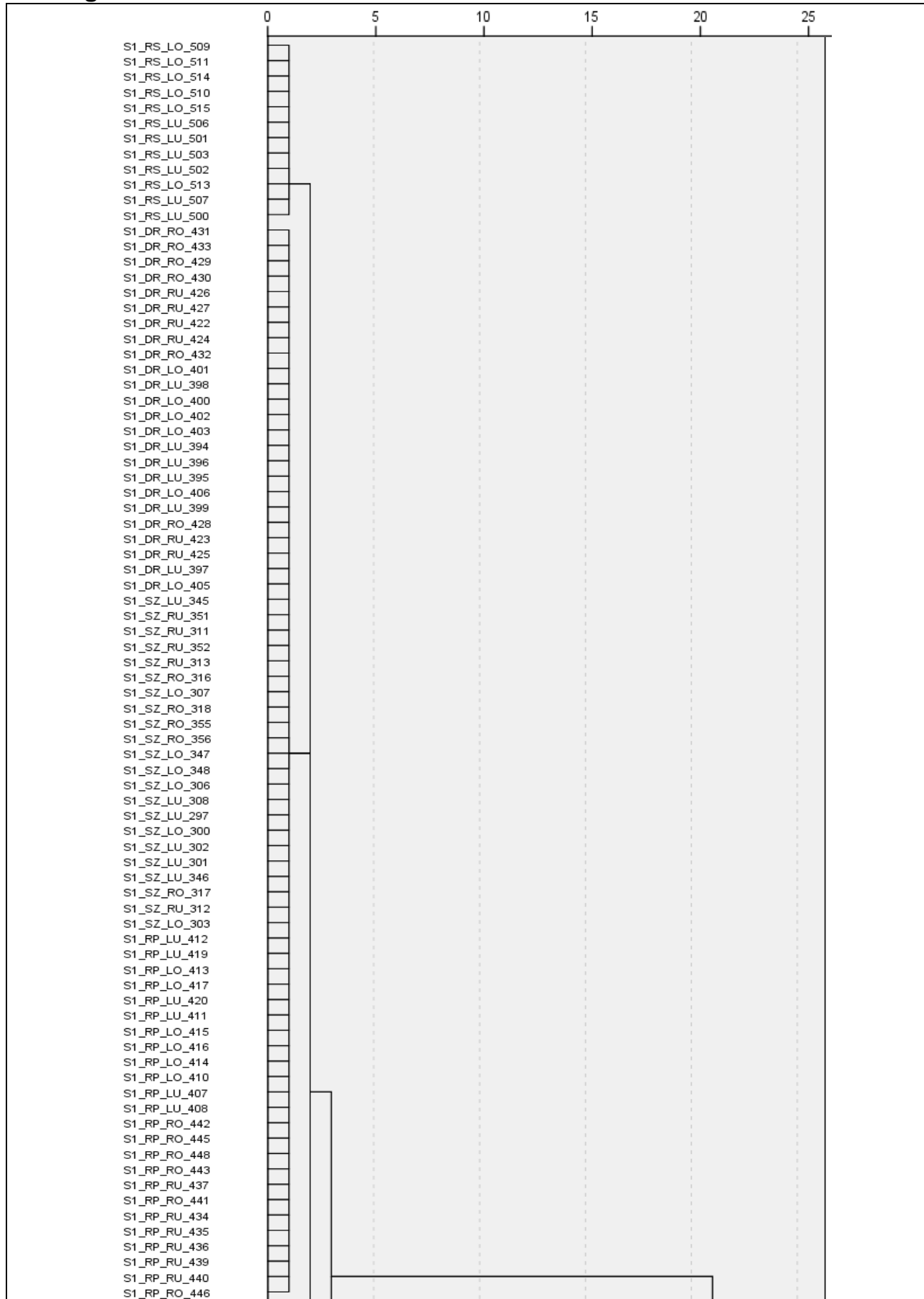


Abb. 89. Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Winkelgeschwindigkeit gBM

## Anhang F:

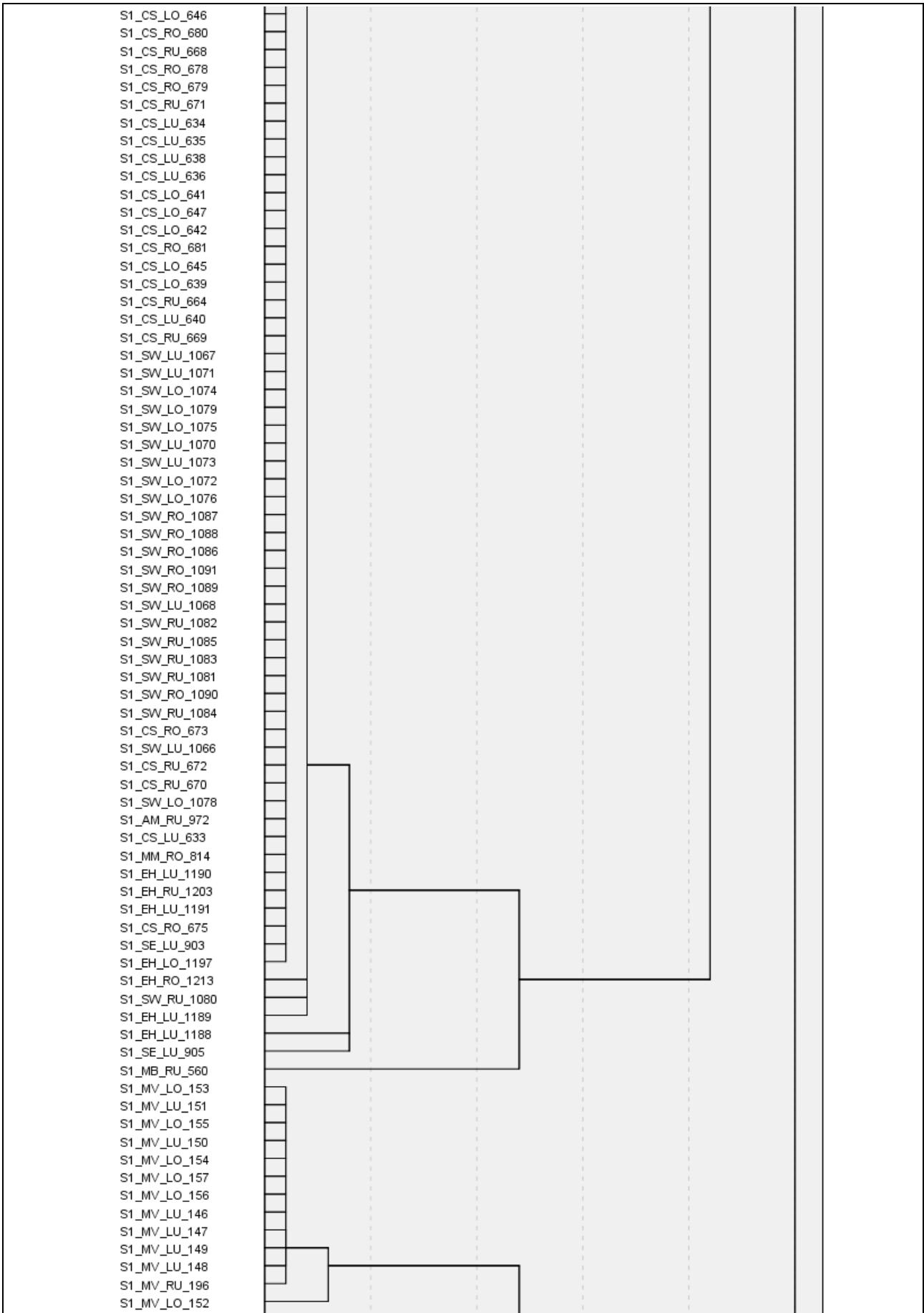


S1_SZ_RO_320					
S1_SZ_RU_353					
S1_RS_RO_545					
S1_RS_RU_535					
S1_RS_RU_539					
S1_RS_RO_544					
S1_RS_RO_551					
S1_RS_RO_547					
S1_RS_RO_548					
S1_RS_RU_534					
S1_RS_RU_540					
S1_RS_RU_537					
S1_RS_RU_538					
S1_RS_RO_542					
S1_AM_RO_978					
S1_AM_RO_983					
S1_AM_RU_974					
S1_AM_RU_973					
S1_AM_RU_975					
S1_AM_RU_981					
S1_AM_RO_984					
S1_AM_RO_982					
S1_AM_RU_980					
S1_AM_LO_968					
S1_AM_LU_961					
S1_AM_LO_970					
S1_AM_LO_967					
S1_AM_LU_965					
S1_AM_LU_966					
S1_AM_LO_964					
S1_AM_LO_969					
S1_AM_LO_971					
S1_AM_LU_959					
S1_AM_LU_960					
S1_AM_LU_962					
S1_AM_RO_985					
S1_AM_RO_988					
S1_UR_RU_660					
S1_SE_LO_908					
S1_SE_LU_902					
S1_MM_RO_813					
S1_MM_RO_815					
S1_MR1_LO_855					
S1_MR1_LU_842					
S1_MR1_LU_843					
S1_MR1_LO_849					
S1_MR1_LO_852					
S1_MR1_LO_853					
S1_MR1_LU_841					
S1_MR1_LO_854					
S1_MR1_LO_847					
S1_MR1_RU_859					
S1_MR1_RU_863					
S1_MR1_RU_862					
S1_MR1_LU_845					
S1_MR1_LU_840					
S1_MR1_RO_873					
S1_MR1_RO_867					
S1_MR1_RO_877					
S1_MR1_RO_871					
S1_MR1_RU_874					
S1_MR1_RU_864					
S1_MR1_RO_868					
S1_MR1_RO_869					
S1_MR1_LU_844					
S1_MR1_RU_860					

S1_DJ_LU_1016						
S1_DJ_RU_1030						
S1_DJ_RU_1031						
S1_DJ_LO_1020						
S1_DJ_RO_1041						
S1_DJ_RO_1040						
S1_DJ_RU_1035						
S1_DJ_LO_1023						
S1_DJ_LO_1025						
S1_DJ_LO_1024						
S1_DJ_RU_1029						
S1_DJ_RU_1032						
S1_DJ_LO_1026						
S1_DJ_LU_1021						
S1_DJ_RO_1037						
S1_DJ_RO_1039						
S1_DJ_LU_1017						
S1_DJ_LU_1018						
S1_DJ_RU_1038						
S1_DJ_LO_1022						
S1_DJ_RO_1033						
S1_DJ_RO_1034						
S1_DJ_LU_1013						
S1_DJ_LU_1014						
S1_EH_RO_1208						
S1_EH_RO_1211						
S1_EH_RO_1216						
S1_EH_RO_1215						
S1_EH_RO_1209						
S1_EH_RU_1202						
S1_EH_RU_1204						
S1_EH_LO_1195						
S1_EH_LU_1193						
S1_EH_LO_1196						
S1_EH_LO_1200						
S1_EH_LO_1194						
S1_EH_LO_1198						
S1_EH_LU_1192						
S1_TS_RU_227						
S1_TS_RU_229						
S1_TS_RO_234						
S1_TS_RO_236						
S1_TS_RO_232						
S1_TS_RO_233						
S1_TS_LO_205						
S1_TS_LO_206						
S1_TS_LO_209						
S1_TS_LU_199						
S1_TS_LU_202						
S1_TS_LU_200						
S1_TS_LO_204						
S1_TS_LO_207						
S1_TS_LO_210						
S1_TS_LU_201						
S1_TS_RU_228						
S1_TS_RU_230						
S1_TS_RU_225						
S1_TS_RU_226						
S1_TS_RO_231						
S1_TS_RO_235						
S1_TS_LU_203						
S1_TS_LU_198						

S1_MM_LU_787					
S1_MM_LO_796					
S1_MM_LU_782					
S1_MM_LO_791					
S1_MM_LO_794					
S1_MM_LO_790					
S1_MM_LU_783					
S1_MM_LU_786					
S1_MM_LU_788					
S1_MM_LU_785					
S1_MM_LO_795					
S1_MM_LO_793					
S1_ML_RU_239					
S1_ML_RU_241					
S1_ML_LU_212					
S1_ML_LU_218					
S1_ML_LO_219					
S1_ML_LO_221					
S1_ML_LO_222					
S1_ML_LO_223					
S1_ML_LO_224					
S1_ML_LO_220					
S1_ML_LU_213					
S1_ML_LU_217					
S1_ML_LU_214					
S1_ML_LU_211					
S1_ML_RU_237					
S1_ML_RU_242					
S1_ML_RO_243					
S1_ML_RO_244					
S1_ML_RO_247					
S1_ML_RU_238					
S1_ML_RO_248					
S1_ML_RO_246					
S1_UR_LO_630					
S1_UR_LU_623					
S1_UR_LO_629					
S1_UR_LO_632					
S1_UR_LO_627					
S1_UR_LU_626					
S1_UR_RO_657					
S1_UR_LO_628					
S1_UR_LU_622					
S1_UR_LU_625					
S1_UR_LO_631					
S1_UR_LU_624					
S1_UR_RU_655					
S1_UR_LU_621					
S1_UR_RO_648					
S1_UR_RU_649					
S1_UR_RO_656					
S1_UR_RO_659					
S1_UR_RU_650					
S1_UR_RO_663					
S1_UR_RU_654					
S1_ML_RO_245					
S1_ML_RU_240					
S1_EH_RU_1206					
S1_EH_RU_1207					
S1_MM_RO_799					
S1_MM_RO_808					
S1_MM_RU_802					
S1_MM_RU_798					





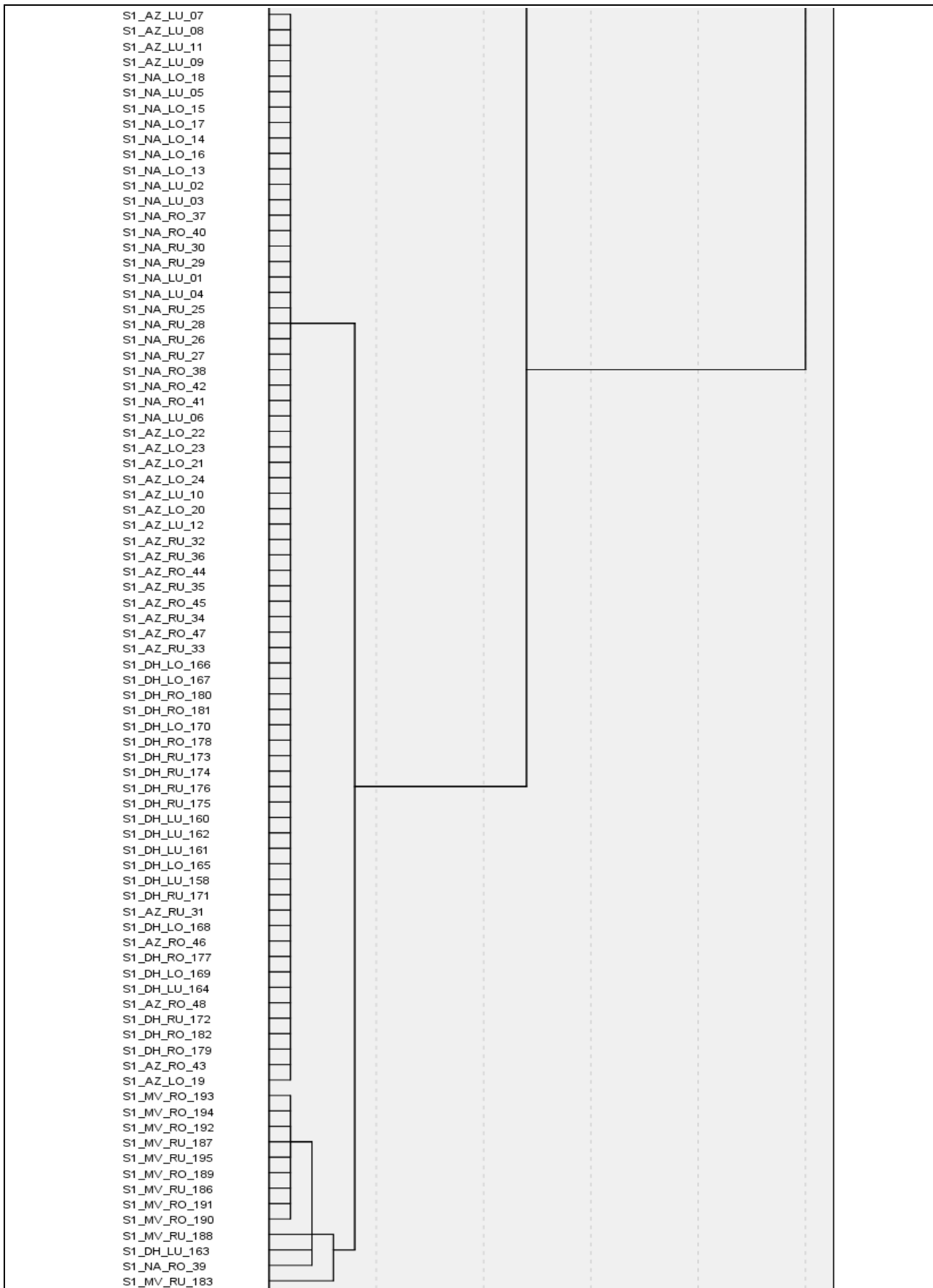


Abb. 90. Dendrogramm über den inter-individuellen Vergleich aller Strafstöße aus der Bedingung Baseline anhand der Winkelgeschwindigkeit gBM



## Wissenschaftlicher Werdegang

### Studium

10/1999 - 10/2006

Diplomstudium im Fach Sportwissenschaft mit Schwerpunkt Informatik an der Technischen Universität Darmstadt

30.09.2002

Vordiplom

11/2005 - 04/2006

Diplomarbeit „Entwicklung eines Expertensystems zur videogestützten Analyse des Sportspiels Volleyball“, Einsatz einer datenbankgestützten Software zur Erfassung und Auswertung technischer Handlungen im Sportspiel Volleyball

09.10.2006

Abschluss als Diplom-Sportwissenschaftler mit Schwerpunkt Informatik

### Berufliche Tätigkeit

10/2006 - heute

Fachgebiet Sportwissenschaft, TU Kaiserslautern, wissenschaftlicher Mitarbeiter: Lehrtätigkeiten in Theorie und Praxis, Verwaltung und Organisation des Fachgebiets

Sebastian Zart

Talstraße 28

67434 Neustadt a. d. Wstr.