

# Inhalt

## Glossar und Abkürzungsverzeichnis — XIX

### 1 Einleitung — 1

### 2 Stand der Technik – Konventionelle Ganganalyse — 4

- 2.1 Historie der Ganganalyse — 4
- 2.2 Grundlagen des Ganges — 5
- 2.3 Gangphasen — 6
- 2.4 Ziele der Ganganalyse – Besonders in der Prothetik — 8
- 2.5 Messprinzipien der Ganganalyse — 9
- 2.6 Einflüsse auf Ganganalysemessungen und ihre Limitationen — 10

### 3 Gang und Prothetik — 12

- 3.1 Häufigkeit von Amputationen — 12
- 3.2 Gang des Amputierten – Spezifische Merkmale und Defizite — 14

### 4 Strukturfestigkeitsprüfung nach ISO 10328 — 18

- 4.1 Relevanz der ISO 10328 — 18
- 4.2 Rahmenbedingungen der ISO 10328 — 18
- 4.3 Entstehung der ISO 10328 — 19
- 4.4 Prüfbedingungen und Ablauf der ISO 10328 — 20
- 4.5 Prüfungen zur Funktion — 22
- 4.6 Anwendungsbereich der ISO 10328 — 23

### 5 Stand der Technik – Belastungsmessungen — 25

- 5.1 Möglichkeiten zur Bestimmung der Prothesennutzung — 25
- 5.2 In Forschungsprojekten entwickelte mobile Messsysteme für den Protheseneinsatz — 26
- 5.3 Kommerzielle mobile Messsysteme für den Protheseneinsatz — 29

### 6 Entwicklung des mobilen Messsystems — 34

- 6.1 Anforderungen an das Messsystem — 34
- 6.2 Sensoraufbau — 35
  - 6.2.1 Beschreibung des Messprinzips — 35
  - 6.2.2 Geometrie des Sensorträgers — 36
  - 6.2.3 Schraubenoptimierung — 39
  - 6.2.4 Materialauswahl — 40
- 6.3 Finite-Elemente-Analyse des Sensorträgers — 41
  - 6.3.1 Ablauf und Zielstellung der Finite-Elemente-Analyse — 41

6.3.2	Verwendete Berechnungsmethode —	42
6.3.3	Finite-Elemente-Methode basierte Geometrieoptimierung —	43
6.3.4	Positionierung der Dehnungsmessstreifen —	44
6.3.5	Finite-Elemente-Analyse der Anbindungen —	45
6.4	Validierung mittels Beanspruchungssimulation —	46
6.4.1	Validierungsmethoden —	46
6.4.2	Validierung der Verschiebungen und Dehnungen —	47
6.4.3	Fazit der Validierung mittels Beanspruchungssimulation —	49
6.5	Optimierung des Hysterese-Einflusses —	50
6.5.1	Definition der Hysterese —	50
6.5.2	Experimentelle Hystereseuntersuchung bei Biegung und Torsion —	50
6.5.3	Finite-Elemente-Analyse der Hysterese bei Torsion —	52
6.6	Elektronik-Komponenten des Messsystems —	53
6.6.1	Elektronische Bestandteile des Messsystems —	53
6.6.2	Anforderungen an die Sensorelektronik —	54
6.6.3	Auswahl der Dehnungsmessstreifen —	54
6.6.4	Verschaltung der Dehnungsmessstreifen —	55
6.6.5	Maximale und minimale Signalgröße der Dehnungsmessstreifen —	55
6.6.6	Verstärkerelektronik —	56
6.6.7	Strom- bzw. Spannungsversorgung —	58
6.6.8	Winkelsensoren —	59
6.6.9	Drucksensoren —	60
6.7	Datenlogger —	62
6.7.1	Anforderungen und Funktionen des Datenloggers —	62
6.7.2	Abtastfrequenz für Belastungsmessungen —	62
6.7.3	getemed-Logger und Smartlogger —	63
6.8	Zulassung und Risikoanalyse —	66
6.8.1	CE-Kennzeichnung —	66
6.8.2	Risikomanagement —	67
6.8.3	Strukturfestigkeitsprüfung nach ISO 10328 —	67
6.8.4	EMV-Prüfung —	69
6.9	Fazit Entwicklung des mobilen Messsystems —	70
<b>7</b>	<b>Kalibrierung des Messsystems —</b>	<b>71</b>
7.1	Ziel der Kalibrierung —	71
7.2	Entwicklung des Kalibriersystems —	72
7.2.1	Anforderungen an das Kalibriersystem —	72
7.2.2	Theorie der Kalibrierung —	72
7.2.3	Überprüfung der Kalibrierung —	74
7.2.4	Manuelles Kalibriersystem —	74
7.3	Optimierung des Kalibriersystems – Calibrator —	76
7.3.1	Zusätzliche Anforderungen an die Kalibrierung des Oktapod —	76

7.3.2	Konstruktion des Aufnahme-Adapters — 77
7.3.3	Aktorik — 77
7.3.4	Mehrkomponentenaufnehmer als Referenzwertgeber — 79
7.3.5	Konzeption des Calibrators — 79
7.4	Analyse der Kalibrierergebnisse — 80
7.4.1	Analyse im Calibrator — 80
7.4.2	Analyse außerhalb des Calibrators — 81
7.5	Optimierung der Kalibrierung — 85
7.5.1	Systematik der Kalibriermatrix — 85
7.5.2	Vergleiche mit Kalibrierungen verschiedener Lastkonfigurationen — 88
7.5.3	Langzeitbeständigkeit der Kalibrierung — 89
7.6	Fazit Untersuchungen zur Kalibrierung des Messsystems — 89
<b>8</b>	<b>Mobiles Messsystem und Labor-Ganganalyse – Ein Vergleich — 90</b>
8.1	Zielsetzung des Vergleichs — 90
8.2	Modellbildung in der Ganganalyse — 91
8.3	Material und Methode des Vergleichs — 92
8.3.1	Einbau und Vermessung — 92
8.3.2	Transformationen — 93
8.3.3	Fehler bei der Transformation — 95
8.3.4	Beschreibung des Ganganalysemessplatzes — 98
8.4	Ergebnisse der Messungen — 100
8.4.1	Ganganalyse an der Medizinischen Hochschule Hannover — 100
8.4.2	Erklärung für Abweichungen — 107
8.4.3	Messungen in der Ganganalyse Göttingen — 109
8.5	Diskussion des Vergleichs — 111
8.5.1	Fazit Ganganalysesystemvergleich — 111
8.5.2	Vergleich mit anderen Studien — 111
8.5.3	Mehrkörpersimulation Medizinische Hochschule Hannover — 114
<b>9</b>	<b>Softwareunterstützte Datenauswertung — 116</b>
9.1	Konzept der Messdatenauswertung und Datenmanagement — 116
9.2	Programme zur Datenanzeige und Datenauswertung — 117
9.2.1	MDV — 117
9.2.2	DATA Lab — 118
9.3	Koordinatentransformation — 120
9.3.1	Beschreibung der Koordinatentransformation — 120
9.3.2	Gültigkeitsbereich der Koordinatentransformation — 121
9.4	Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Mustererkennung — 123
9.4.1	Ziel und Konzept — 123
9.4.2	Allgemeine Ansätze zur Mustererkennung — 123

9.4.3	Analyse verschiedener Verfahren zur Mustererkennung —	125
9.4.4	Fazit geeignetes Verfahren zur Mustererkennung —	129
9.5	Umsetzung der Mustererkennung —	129
9.5.1	Bereichsdetektion —	129
9.5.2	Typisierung —	131
9.5.3	Limitationen Mustererkennung —	146
9.5.4	Erkennungsraten Mustererkennung —	147
9.5.5	Fazit Umsetzung Mustererkennung —	155
9.6	Auswertung Bauteilbelastungen —	155
9.6.1	Ziele der Auswertung —	155
9.6.2	Histogramme —	156
9.6.3	Bereichshistogramme —	158
9.6.4	Datensieb bzw. Überlastdetektion —	160
9.7	Auswertung Geschwindigkeit —	161
9.7.1	Geschwindigkeitsberechnung —	161
9.7.2	Analyse der Geschwindigkeitsmessungen —	164
9.8	Messdatenverarbeitung, Datenbankmanagement —	166
9.8.1	Übersicht über die Datenverarbeitung —	166
9.8.2	Kartenmanagement und Einlesen der Karten —	166
9.8.3	Datenbankstruktur —	167
9.8.4	Cluster Control und Report —	168
9.8.5	Auswertungsmakro – Ergebniszusammenfassung —	169
9.8.6	Datenbankstatistik —	172
<b>10</b>	<b>Pilotphasenstudie —</b>	<b>173</b>
10.1	Ziele und Probanden der Pilotphase —	173
10.2	Einbau des Messsystems —	174
10.3	Ergebnisse der Pilotphase —	174
10.3.1	Ausgabeparameter Pilotphase —	174
10.3.2	Bereichsanalyse und Probandenaktivität Pilotphase —	175
10.3.3	Lastzyklen Pilotphase —	177
10.3.4	Histogramme Pilotphase —	178
10.3.5	Weitere Gangparameter Pilotphase —	181
10.3.6	Einzelschrittbetrachtung Pilotphase —	181
10.4	Fazit Pilotphase —	183
<b>11</b>	<b>Studiendesign für die Studienphase —</b>	<b>184</b>
11.1	Konzeption und Vorbereitung der Studienphase —	184
11.1.1	Ziel der Studie —	184
11.1.2	Art der Studie – Ethikkommission —	184
11.1.3	Planung der Versorgung und Probandenkollektive —	185
11.1.4	Auswahl der Kniegelenke der Studienphase —	186

11.1.5	Auswahl kooperierender Sanitätshäuser —	187
11.1.6	Festlegung der Anzahl der Studienteilnehmer —	187
11.1.7	Übersicht über die Studienteilnehmer —	188
11.2	Einbau des Messsystems und Prothesenaufbau —	189
11.2.1	Randbedingungen des Prothesenaufbaus —	189
11.2.2	Aufbauvermessung mit L.A.S.A.R. Assembly und L.A.S.A.R. Posture —	190
11.2.3	Biomechanische Aufbauparameter —	191
11.2.4	Alternative Ansätze zur Objektivierung des Prothesenaufbaus —	192
11.2.5	Aufbauvermessung Studienphase —	193
11.2.6	Offseteinstellung der Winkelsensoren —	195
11.2.7	Parcours – Testmessung —	196
11.3	Kniegelenke der Studienphase —	197
11.3.1	Funktion der Prothesenkniegelenke für den Amputierten —	197
11.3.2	3R60 – Modular-EBS-Kniegelenk mit hydraulischer Schwunghasensteuerung —	199
11.3.3	C-Leg® – mikroprozessorgesteuertes Kniegelenksystem —	200
11.3.4	Weitere verwendete Prothesenkomponenten —	204
<b>12</b>	<b>Ergebnisse der Studienphase —</b>	<b>206</b>
12.1	Mobilität und Aktivität —	206
12.1.1	Definition von Mobilität und ihrer Bewertung —	206
12.1.2	Begriffsabgrenzung zwischen Aktivität und Mobilität —	207
12.2	Einflussfaktoren auf Mobilität und Aktivität —	207
12.2.1	Ziel der Erfassung von Einflussfaktoren —	207
12.2.2	Einflüsse auf die Prothesennutzung —	208
12.2.3	Einflüsse auf den metabolischen Energieverbrauch —	211
12.2.4	Einflüsse auf die Sturzhäufigkeit —	215
12.2.5	Einflüsse auf Reha-Maßnahmen —	218
12.2.6	Fazit Einflussfaktoren auf Mobilität und Aktivität —	219
12.3	Mobilitätsbewertung —	219
12.3.1	Indikations- und bedarfsgerechte Komponentenauswahl —	219
12.3.2	Profilerhebungsbogen —	220
12.3.3	Literatur zu Möglichkeiten der Mobilitätsbewertung —	222
12.3.4	Vergleichsstudie von Scores und funktionalen Tests zur Mobilitätsbewertung —	226
12.3.5	Vergleich der Mobilitätsbewertungen mit Daten der Studienphase —	229
12.4	Aktivitätsbewertung —	238
12.4.1	Möglichkeiten zur Aktivitätsbewertung —	238
12.4.2	Motivation des Vergleiches von Oktapod und Aktivitätsmessern —	239
12.4.3	Kommerzielle Systeme zur Aktivitätsvergleichsmessung —	240

12.4.4	Vorstudie Aktivitätsmessung – vier kommerzielle Systeme —	245
12.4.5	Pilotstudie Aktivitätsmessung mit TFA-Proband —	254
12.4.6	Langzeitstudie Aktivitätsmessung mit TFA-Proband —	257
12.4.7	Diskussion und Fazit – Vor-, Pilot- und Langzeitstudie der Aktivitätsmessung —	261
12.5	Probandenvergleich —	265
12.5.1	Biomechanische Gangparameter —	265
12.5.2	Gehen in der Ebene – Ganganalyse mit 15 Probanden —	266
12.5.3	Gang von TFA auf Rampen und Treppen —	273
12.5.4	Vergleich der Kniegelenke – 3R60 versus C-Leg – Treppe runter —	280
12.5.5	Fazit Probandenvergleich —	280
12.6	Ergebnisse Bereichsanalyse Studienphase —	282
12.6.1	Ergebnisse Studie – Bereichsanalyse Gangmuster —	282
12.6.2	Auswertung Geschwindigkeit und weitere Gangparameter —	295
12.6.3	Dynamik bei Schwergewichtigen TTA —	299
12.6.4	Bereichsanalyse – Lastfälle —	300
12.6.5	Statistische Auswertungen – Bereichsanalyse —	301
12.7	Ergebnisse Bereichshistogramme Studienphase —	303
12.7.1	Ergebnisse Studie – Belastungen —	303
12.7.2	Neusortierung der lokalen Maxima und Minima —	303
12.7.3	Histogramme der Lasten – Gehen und musterübergreifend —	304
12.7.4	Histogramme der Lasten – Treppen und Rampen —	311
12.7.5	Histogramme der Lasten – Vergleich von vier Spezialmustern —	316
12.7.6	Bereichshistogramme —	318
12.7.7	Korrelation von Kraft und Moment —	324
12.7.8	Statistische Auswertungen – Belastungen —	325
12.8	Ergebnisse Datensieb Studienphase —	328
12.8.1	Ergebnisse Studie – Überlasten —	328
12.8.2	Überlasten – Belastungshistogramme —	332
12.8.3	Überlasten – Bereichshistogramme —	336
12.8.4	Überlasten – Überläufer bzw. Extremwerte —	339
12.8.5	Statistische Auswertungen – Überlasten —	342
12.8.6	Fazit Datensieb —	343
<b>13</b>	<b>Grundlagen der Werkstofftechnik —</b>	<b>344</b>
13.1	Ziel der Betrachtung und Datenbasis —	344
13.2	Experimentelle Lebensdauerermittlung —	345
13.2.1	Wöhlerversuch und Wöhlerlinie —	345
13.2.2	Einflüsse auf die Beanspruchbarkeit bei konstanter Amplitude —	346
13.2.3	Betriebsbeanspruchung —	347
13.2.4	Kollektiverstellung und Betriebsfestigkeitsversuch zur Lebensdauerermittlung —	348

13.2.5	Einflüsse auf die Beanspruchbarkeit bei veränderlicher Amplitude —	350
13.3	Rechnerische Lebensdauerermittlung —	352
13.3.1	Grundsätzliches Vorgehen der rechnerischen Lebensdauerermittlung —	352
13.3.2	Nennspannungskonzept und örtliches Konzept —	354
13.3.3	Schadensakkumulationshypothesen —	356
13.4	Konstruktionsphilosophien —	360
13.4.1	Sichere Lebensdauer (safe-life) —	360
13.4.2	Schadenstolerante Konstruktion (damage-tolerant, fail-safe) —	361
13.5	Anwendung der Messdaten der Mobilitätsuntersuchungen —	363
<b>14</b>	<b>Alternativer Prüfvorschlag —</b>	<b>365</b>
14.1	Randbedingungen für die Erstellung eines alternativen Prüfvorschlages —	365
14.1.1	Aufgabe von und Anforderungen an Prüfverfahren —	365
14.1.2	Studien zur Quantifizierung von Prüfbelastungen —	366
14.1.3	Vergleich der Lastkollektive und Kritik an der ISO 10328 —	368
14.1.4	Übertragung der Daten zu einem alternativen Prüfvorschlag —	371
14.2	Alternative Prüfkfigurationen —	372
14.2.1	ISO 10328 modifiziert – Messungen an TFA und Hüftexartikulierten —	372
14.2.2	Kollektiv – 80%-Signalkurven —	381
14.2.3	3-D-Lastvektoren aus den Ergebnissen der Bereichsanalyse —	398
14.2.4	Anzahl der Lastzyklen —	404
14.2.5	Zusammenhang Belastungshöhe zu Anzahl der Lastzyklen —	404
14.3	Fazit des alternativen Prüfvorschlages —	405
<b>15</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick —</b>	<b>409</b>
<b>16</b>	<b>Literatur —</b>	<b>415</b>
<b>17</b>	<b>Anhang —</b>	<b>437</b>
A	Lebenslauf —	437
B	Verzeichnis projektbezogener Veröffentlichungen —	438
B-1	Zeitschriftenartikel —	438
B-2	Kongressvorträge —	438
C	Verzeichnis projektbezogener studentischer Arbeiten —	439
C-1	Diplomarbeiten —	439
C-2	Studienarbeiten —	439
C-3	Bachelorarbeiten —	439
C-4	Masterarbeiten —	439

D	Zu Kapitel 4 — <b>440</b>
D-1	ISO 10328 Offsets und Lasten — <b>440</b>
E	Zu Kapitel 6 — <b>441</b>
E-1	DMS Datenblatt — <b>441</b>
E-2	EMV Bericht — <b>443</b>
F	Zu Kapitel 7 — <b>446</b>
F-1	Kalibrierung — <b>446</b>
G	Zu Kapitel 8 — <b>447</b>
G-1	Ganganalysevergleich — <b>447</b>
H	Zu Kapitel 10 — <b>449</b>
H-1	Einstellungen Pilotphase — <b>449</b>
I	Zu Kapitel 11 — <b>451</b>
I-1	Profilerhebungsbogen und Messprotokoll — <b>451</b>
I-2	Einstellungen Mustererkennung Studienphase — <b>457</b>
I-3	Individuelle Einstellungen Mustererkennung Studienphase — <b>458</b>
I-4	Koordinatentransformation Konventionen — <b>464</b>
I-5	Aufbau- und Einbauparameter – Studienphase — <b>465</b>
I-6	Aufbauveränderung Proband 11 — <b>469</b>
J	Zu Kapitel 12 — <b>471</b>
J-1	Profilerhebungsbogen — <b>471</b>
J-2	AMP — <b>475</b>
J-3	LCI — <b>477</b>
J-4	Vergleich von vier kommerziellen Systemen — <b>478</b>
J-5	Probandendaten – Schrittzählerpilotphase — <b>480</b>
J-6	Probandenvergleich — <b>482</b>
J-7	Lastzyklen pro Tag nach Jahreszeit — <b>488</b>
J-8	Ergebnisse Anzahl Muster pro Tag — <b>489</b>
J-9	Ergebnisse Bereichshistogramme — <b>491</b>
J-10	Belastungshistogramme — <b>500</b>
J-11	Bereichshistogramme — <b>503</b>
J-12	Beispiele für Überlasten — <b>507</b>
J-13	Überlasten bei weiteren Probanden — <b>513</b>
J-14	Beispiele Überläufer — <b>515</b>
K	Zu Kapitel 13 — <b>519</b>
K-1	Übersicht über Random-Versuche — <b>519</b>
L	Zu Kapitel 14 — <b>520</b>
L-1	Sprung auf Prothese — <b>520</b>
L-2	Prüfvorschlag — <b>521</b>
L-3	IPOS-Belastungsklassen — <b>523</b>