

Aus der Klinik- und Poliklinik für Orthopädie am  
Universitätskrankenhaus Hamburg-Eppendorf  
Direktor: Prof. Dr. med. Wolfgang Rüter

Grenzstrangaffektion unter und nach Wirbelsäulenoperation  
mit vorderem Zugang und ihre Folgen – eine  
thermographiegestützte Untersuchung

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
dem Fachbereich Medizin der Universität Hamburg  
vorgelegt von Matthias W. Petzold aus Braunschweig

Hamburg im Januar 2005

Angenommen von dem Fachbereich Medizin  
der Universität Hamburg am 30.11.2005

Veröffentlicht mit Genehmigung des Fach-  
bereichs Medizin der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss:

Prof. Dr. med. Wolfgang Rütter (Vorsitzender)

Prof. Dr. med. Helge Beck (2. Gutachter)

PD Dr. med. Ralph Kothe (3. Gutachter)

Für Bärbel, Uwe und Sybille

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Arbeitshypothese und Fragestellung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>8</b>
3.1	Patientengut . . . . .	8
3.1.1	Untersuchungsgruppe . . . . .	8
3.1.2	Patientendaten (Grundmessgrößen) . . . . .	9
3.1.3	Diagnosen und Operationsverfahren . . . . .	10
3.2	Operationsverfahren . . . . .	12
3.2.1	Einführung . . . . .	12
3.2.2	Geschichtlicher Rückblick . . . . .	12
3.2.3	Operationsmethode . . . . .	13
3.2.4	Operationsrisiken, -komplikationen . . . . .	15
3.3	Infrarot-Thermographie . . . . .	15
3.3.1	Einführung . . . . .	15
3.3.2	Geschichtlicher Rückblick . . . . .	16
3.3.3	Theoretisch-anatomische Grundlagen . . . . .	16
3.3.4	Neurophysiologie der Temperaturregulation . . . . .	18
3.3.5	Standardbedingungen für Thermographie . . . . .	19
3.3.6	Eingesetztes Thermographieverfahren . . . . .	21
3.3.7	Untersuchungsablauf . . . . .	22
3.3.8	Infrarotkamera . . . . .	25
3.3.9	Digitale Datenverarbeitung und Bildauswertung . . . . .	25
3.4	Statistik . . . . .	26
3.4.1	Datenbeschreibung . . . . .	26
3.4.2	Test, Ausschlusskriterien, Nullhypothese . . . . .	26
3.4.3	Vorstellung untersuchter Parameterpaarungen . . . . .	27
3.4.4	Abgrenzung zu anderen Tests . . . . .	28
3.4.5	Datenformatierung . . . . .	28
3.4.6	Graphische Darstellung . . . . .	28

<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>29</b>
4.1	Etagenbezogene Temperaturdifferenzen (Fußrücken)	29
4.2	Subjektive Beschwerden	32
4.2.1	Präoperative Beschwerden	32
4.2.2	Postoperative Beschwerden	32
4.3	Präoperative Thermogramme	32
4.4	Intraoperatives Monitoring	38
4.4.1	Allgemeines	38
4.4.2	Intraoperativ thermographisch untersuchte Patienten	38
4.4.3	Resultate intraoperativer Überwachung	39
4.4.4	Intraoperative Thermogramme	41
4.5	Postoperative Thermogramme	49
4.6	Vorstellung statistischer Ergebnisse	55
4.6.1	Graphische Darstellung der statistischen Analyse	55
4.6.2	Beschreibung der statistischen Ergebnisse	58
4.7	Umverteilungsphänomen (Borrow-Lending)	59
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>61</b>
5.1	Einleitung	61
5.2	Besprechung physiologischer und anatomischer Grundlagen	62
5.2.1	Herkunft messbarer Wärmestrahlung	62
5.2.2	Mechanismen der Thermoregulation	62
5.2.3	Temperaturstabilität	62
5.2.4	Pathophysiologie der Temperaturregulation	63
5.2.5	Hauttemperatur nach beidseitiger Grenzstrangaffektion	64
5.2.6	Anordnung der sympathischen Hautinnervation	65
5.2.7	Einführung des Begriffs 'Thermatom'	66
5.2.8	Grenzstranganatomie und Thermatome	66
5.2.9	Unterschiedliche Verfahren zum Sympathikusmonitoring	67
5.3	Diskussion untersuchungsbezogener Resultate	68
5.3.1	Ursache thermaler Asymmetrie	68
5.3.2	Thermoregulatorische Folgen	69
5.3.3	Artefakte	70
5.3.4	Unerwünschte Wirkungen bei Grenzstrangaffektion	70
5.3.5	Beurteilung des Thermographieverfahrens	71
5.3.6	Verlauf von Sympathikusaffektionen und Folgezuständen	72
5.3.7	Grenzstrangblockade - Kausalitätsansätze	72
5.3.8	Existenz segmentaler Thermatome	73
5.3.9	Anatomische Erklärungsansätze	74
5.3.10	Männliche Sexualfunktion	75
5.3.11	Limitationen	75
5.4	Weitere Bereiche sympathischer Dysfunktion	77
5.4.1	Schmerzmedizinische Relevanz	77

5.4.2	Mechanismen neuropathischer Schmerzsyndrome . . . . .	78
5.4.3	Immunologische Aspekte der Sympathikusfunktion . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>79</b>
<b>A</b>	<b>Bezeichnungen für Rohdaten (Legende)</b>	<b>80</b>
A.1	Diagnosen . . . . .	80
A.2	Kernvariablen . . . . .	81
A.3	Temperaturparameter Fußinnenfläche (präoperativ) . . . . .	82
A.4	Temperaturparameter Fuß, akral (präoperativ) . . . . .	83
A.5	Temperaturparameter Fußinnenfläche (postoperativ) . . . . .	84
A.6	Temperaturparameter Fuß, akral (postoperativ) . . . . .	85
<b>B</b>	<b>Werte für Rohdaten</b>	<b>86</b>
B.1	Werte für Rohdaten I . . . . .	86
B.2	Werte für Rohdaten II . . . . .	88
B.3	Werte für Rohdaten III . . . . .	89
B.4	Werte für Rohdaten IV . . . . .	90
B.5	Werte für Rohdaten V . . . . .	91
B.6	Werte für Rohdaten VI . . . . .	92
B.7	Werte für Rohdaten VII . . . . .	93
B.8	Werte für Rohdaten VIII . . . . .	94
B.9	Werte für Rohdaten IX . . . . .	95
B.10	Werte für Rohdaten X . . . . .	96
B.11	Werte für Rohdaten XI . . . . .	97
B.12	Werte für Rohdaten XII . . . . .	98
B.13	Werte für Rohdaten XIII . . . . .	99
<b>C</b>	<b>Daten Umverteilungsphänomen</b>	<b>100</b>
<b>D</b>	<b>Protokoll intraoperativer Ereignisse</b>	<b>102</b>
<b>E</b>	<b>Kohorte Notfallpatienten</b>	<b>104</b>
<b>F</b>	<b>Präoperativer Fragebogen</b>	<b>105</b>
<b>G</b>	<b>Postoperativer Fragebogen</b>	<b>107</b>
<b>H</b>	<b>Thermographisches Bildmaterial I</b>	<b>109</b>
<b>I</b>	<b>Thermographisches Bildmaterial II</b>	<b>116</b>
<b>J</b>	<b>Thermographisches Bildmaterial III</b>	<b>120</b>
<b>K</b>	<b>Thermographisches Bildmaterial IV</b>	<b>125</b>

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	4
<b>L Thermographisches Bildmaterial V</b>	<b>132</b>
<b>M Übersicht: Ergebnisse Wilcoxon-Test</b>	<b>139</b>
<b>N Abkürzungen</b>	<b>170</b>
<b>O Danksagung</b>	<b>171</b>
<b>P Selbständigkeitserklärung</b>	<b>173</b>
<b>Q Lebenslauf</b>	<b>174</b>

# Kapitel 1

## Arbeitshypothese und Fragestellung

Bekannt ist, dass der Grenzstrang bzw. das sympathische System zu den Strukturen gehört, deren Schädigung zu klinisch relevanten Problematiken für Patienten führen kann. Die Entwicklung dieser nervalen Strukturen im Zusammenhang mit einer ventralen Wirbelsäulenoperation soll im folgenden näher betrachtet und sich daraus ergebende mögliche Konsequenzen gezeigt werden.

Ziele dieser Arbeit im einzelnen sind:

1. Beschreibung von Läsionen des lumbalen Grenzstranges bei Patienten nach Wirbelsäulenoperation mit ventralem Zugang
2. Untersuchung und Darstellung möglicher Einflussgrößen, die eine Grenzstrangläsion zur Folge haben könnten
3. Bewertung kontaktfreier Thermographie zum qualitativen und quantitativen Monitoring der Sympathikusaktivität bzw. dessen Destruktion
4. Beschreibung des akuten Outcome von Patienten nach ventraler Wirbelsäulenoperation mit möglicher Grenzstrangläsion

Der lumbale Grenzstrang als regionaler Vertreter des sympathischen Systems gehört zu den bislang wenig beachteten Strukturen bei ventralen Wirbelsäulenoperationen. Im direkten Blickfeld stehen hier u.a. Gefäßweitenregulation, sudomotorische Funktion und Piloreaktion, die vom intakten sympathischen Gewebe in adäquater Weise aufrechterhalten werden.

Am Operationsergebnis werden regelmäßig auch Symptome beobachtet, die auf eine Sympathikusaffektion hinweisen. Bei fast allen Patienten konnte eine postoperative einseitige Hyperthermie der unteren Extremität auf der Seite des Eingriffs festgestellt werden. Es ist denkbar, dass diese thermale Asymmetrie als direkte oder indirekte Folge mit der Operationstechnik in Zusammenhang steht.



Es erscheint somit indiziert, eine systematische Analyse der sympathisch vermittelten Funktionen vorzunehmen. Die wissenschaftliche Literatur beschreibt dazu u.a. Störungen der Sexualfunktion des Mannes [67, 93] sowie Temperaturdifferenzen der Extremitäten [71] und Störungen des Schwitzens [2, 11] und der glatten Haarmuskeln [33].

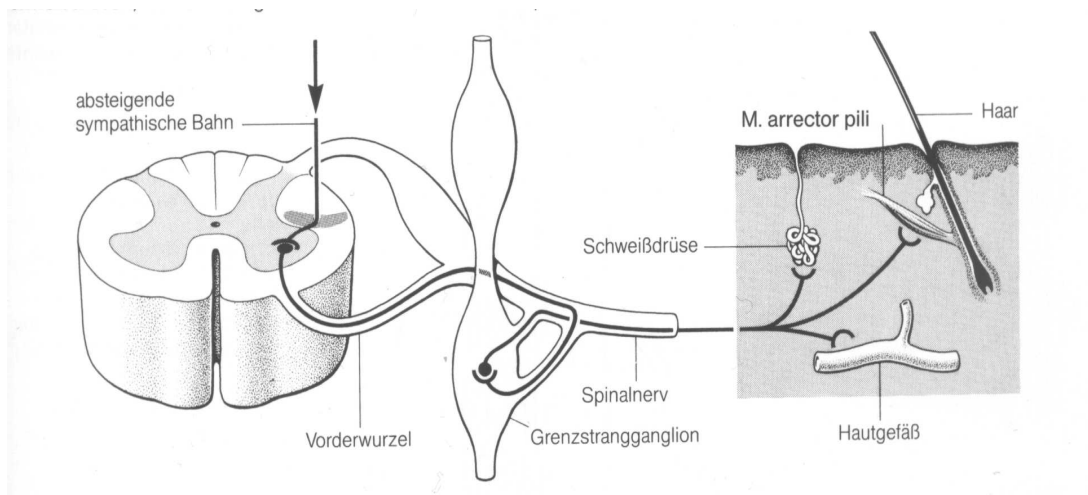


Abbildung 1.1: Sympathische Funktionen an der Haut [58]

Ferner beschreibt die Literatur das sympathisch unterhaltene Schmerzsyndrom (Complex regional pain syndrome), eine Diagnose bei der Symptome wie Allodynie (Schmerzauslösung durch normalerweise nicht schmerzinduzierende Reize), Hyperalgesie (überschießende Schmerzempfindung auf Schmerzreize), autonome und trophische Veränderungen, sowie vaso- und sudomotorische Veränderungen im Schmerzgebiet beobachtet werden.

# Kapitel 2

## Einleitung

In der orthopädischen Chirurgie werden operative Eingriffe u.a. bei Patienten mit Wirbelsäuleninstabilität seit vielen Jahrzehnten vorgenommen. Es gibt unterschiedliche Indikationen für derartige Eingriffe. Neben statischer Instabilität spielen chronischer Schmerz sowie motorische und sensible Reiz- und Ausfallerscheinungen eine entscheidende Rolle. Zugrunde liegt in der Mehrzahl der hier betrachteten Fälle eine degenerative Instabilität. Als ein Hauptstandardverfahren heute ist die anteriore lumbale interkorporelle Fusion (ALIF) zu nennen, bei der ein- oder mehrere Wirbelsäulenetagen versteift werden. Dieses Verfahren ist sehr schonend und besitzt eine hohe Erfolgsrate. Es steht neben weiteren Verfahren an vorderer Stelle. Operationstechnisch wird die Bandscheibe entfernt und durch einen Knochenkeil ersetzt. Somit wird knöcherner Durchbau zweier Wirbelsäulensegmente erreicht. Durch Ausschaltung unkontrollierter Bewegung zwischen benachbarten Wirbeln kann Schmerzentstehung unterbrochen werden. Neben der degenerativen Wirbelsäuleninstabilität gelten als Hauptindikationen der Wirbelkörperfusion u.a. die Spondylolisthese (Wirbelgleiten) mit oder ohne Spinalkanalstenose, sowie Skoliosen und Infektionen genauso wie Frakturen.

Noch keine Studie hat sich bisher eingehend mit der systematischen Untersuchung von Operationsfolgen am Grenzstrang bei Wirbelsäuleneingriffen beschäftigt. Ziel dieser Untersuchung ist, akzidentell oder systematisch auftretende invasive Einflüsse auf den Grenzstrang während einer Operation in Art und Ausmaß zu objektivieren. Vorschläge zu Therapiemodifikationen setzen regelmäßig fundierte Untersuchungsergebnisse voraus; diese Untersuchung kann somit einen Beitrag zur Weiterentwicklung therapeutischer Vorgehensweisen leisten.

# Kapitel 3

## Material und Methoden

### 3.1 Patientengut

#### 3.1.1 Untersuchungsgruppe

Untersucht wurden 31 Patienten aus der Wirbelsäulensprechstunde, die stationär aufgenommen wurden. Diese unterzogen sich im Zeitraum Januar bis Dezember 2000 in der Orthopädischen Klinik des Universitätskrankenhauses Hamburg-Eppendorf einer Wirbelsäulenoperation mit ventralem Zugang. An der Studie nahmen 10 Männer und 21 Frauen teil. Das Durchschnittsalter liegt bei 44 Jahren. Aufnahmekriterium für die vorliegende Untersuchung ist eine Wirbelsäulenoperation mit vorderem Zugang. Weitere Voraussetzungen sind regelrechte Verhältnisse bezüglich Anatomie und Physiologie im Sinne nicht stattgehabter invasiver Eingriffe oder Erkrankungen im Bereich des Grenzstranges in dieser Region. Alle Patienten genügen den Kriterien ASA I (normaler gesunder Patient, keine weiteren Erkrankungen neben der den Krankenhausaufenthalt begründenden) entsprechend der ASA-Klassifikation (ASA Physical Status [25]). Der Indikationskatalog umfasst Erkrankungen des statischen Wirbelkanals einhergehend mit motorischen oder sensiblen Reiz- und Ausfallerscheinungen sowie rückenbedingte Schmerzsyndrome.

Auf fünf Untersuchungsgruppen verteilt sich eine Grundgesamtheit von 31 Patienten in Abhängigkeit der Eingriffsebene. Eine weitere Untersuchungsgruppe umfasst 10 Patienten, die intraoperativ thermographisch überwacht wurden. Diese 10 Patienten sind Teil der Grundgesamtheit.

### 3.1.2 Patientendaten (Grundmessgrößen)

Nr.	Patient	Geschlecht	Alter	Größe	Gewicht
1	MB	f	40	167	61
2	UD	f	44	167	54
3	ID	f	61	165	63
4	UP	f	52	167	82
5	SS	f	15	175	52
6	WS	m	50	181	72
7	FF	f	43	165	75
8	MS	f	39	172	75
9	ER	f	70	178	84
10	AS	m	15	170	65
11	AS	f	48	176	67
13	IL	f	34	172	59
14	GB	f	66	166	75
15	DS	m	48	168	73
16	NW	m	21	181	75
17	DS	f	56	165	85
19	HS	m	48	176	67
21	HW	m	59	180	99
22	HK	m	51	165	86
23	HS	f	43	173	69
24	UM	f	68	151	68
25	MR	f	65	165	65
26	BJ	f	44	156	72
27	IH	f	66	172	77
29	HW	m	35	174	71
30	MP	m	21	180	70
33	RB	f	58	160	47
34	BN	f	39	157	65
35	HP	m	65	185	90
37	NL	f	19	176	76
41	SH	f	48	176	77

Tabelle 2.1.2: Patientendaten (Grundmessgrößen)

### 3.1.3 Diagnosen und Operationsverfahren

Nr.	Diagnose	Etage	OP-Verfahren	OP-Etage
1	Sympt. Osteochondrose	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Diskusprothese	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
2	Degen. Instabilität	L <sub>4</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>4</sub> -S <sub>1</sub>
3	Degen. Instabilität	L <sub>3</sub> -L <sub>5</sub>	d/v-Fusion	L <sub>3</sub> -L <sub>5</sub>
4	Spondylolisthese mit Spondylolisthese	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>		
4	Spondylodiszitis/ Spinalkanalstenose	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	Ventr. Abszess- ausräumung und dorsale Dekompression	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>
5	L-konv. Lumbalskoliose bei Marfan-Syndrom	Th <sub>10</sub> -L <sub>4</sub>	Modifizierte Doppelstab VDS	Th <sub>10</sub> -L <sub>4</sub>
6	Degen. Instabilität	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
7	Skoliose als Z.n. Poliomyelitis	Th <sub>12</sub> -L <sub>4</sub>	VDS	Th <sub>12</sub> -L <sub>4</sub>
8	Spondylolisthese	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
9	Metastasen	Th <sub>10</sub> -Th <sub>11</sub>	Wibelkörperersatz	Th <sub>10</sub> -Th <sub>11</sub>
10	Halbwirbelbildung mit L-konv. Lumbalskoliose	L <sub>2</sub>	Hemivertebrektomie	L <sub>2</sub>
11	Chron. degen. Schmerz- syndrom bei Z.n. NPP	L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub>	d/v/d-Fusion	L <sub>1</sub> -L <sub>3</sub>
11		L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	d/v-Fusion	L <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>
13	Lumb. Schmerzsyndrom mit pseudoradikulärer Ausstrahlung	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>		
13		L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Dorsale Distrak- tionsspondylodese dors. Spondylodese posterolat. und intrakorp. bds., ventrale Fusion	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
14	Lumbalstenose mit degen. Spondylolisthese	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Laminektomie, d/v-Fusion	L <sub>4</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
15	Chron. Schmerzsyndrom/ sympt. Osteochondrose	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>

Tabelle 2.1.3: Diagnosen und Operationsverfahren

Nr.	Diagnose	Etage	OP-Verfahren	OP-Etage
16	Spondylolisthese	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
17	Degen. Instabilität mit R-lat. Stenose	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub> L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	R-seitige Dekompression, Hemilaminektomie, ventrale Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
19	Spondylodiszitis mit paravertebr./ epidur. Abszess	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	Abszessaus- räumung, d/v-Fusion	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>
21	Degen. Spondylolisthese mit Lumbalstenose	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Laminektomie, d/v-Fusion	L <sub>4</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
22	Degen. Instabilität mit Lumbalstenose	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Laminektomie, d/v-Fusion	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
23	Osteochondrose	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
24	Degen. Spondylolisthese mit Spinalkanalstenose	L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub>	Dekompression, d/v-Fusion	L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub> L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub>
25	Degen. Spondylolisthese mit Spinalkanalstenose	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Laminektomie d/v-Fusion	L <sub>4</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
26	Metastasen	Th <sub>4</sub> -Th <sub>6</sub> Th <sub>10</sub> -Th <sub>12</sub>	Post. Dekompressio Laminektomie	Th <sub>5</sub>
27	Skoliose b. hereditärer spino-cerebel. Atrophie	Th <sub>11</sub> -L <sub>4</sub>	VDS	Th <sub>11</sub> -L <sub>4</sub>
29	Degen. Lumbalsyndrom	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
30	Posttraum. R-konvexe Lumbalskoliose		VDS	Th <sub>12</sub> -L <sub>4</sub>
33	Chordom	L <sub>5</sub>	Wirbelkörperersatz	L <sub>5</sub>
34	Spondylolisthesis	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub> L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
35	Spondylodiszitis	L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	Abszessaus- räumung, d/v-Fusion	L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>
37	Spondylolisthese	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
41	Spondylolisthese	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>

Tabelle 2.1.3 (Fortsetzung): Diagnosen und Operationsverfahren

## 3.2 Operationsverfahren

### 3.2.1 Einführung

Unterschiedliche Operationsverfahren kamen in der vorliegenden Untersuchung zur Anwendung. Allen Verfahren gemeinsam ist ein vorderer Zugang, der von rechts- oder links-pararektal (M. rectus abdominis) einen Weg zum Bauchraum verschafft. Das in dieser Untersuchung am häufigsten angewandte Verfahren ist das einer sogenannten dorso-ventralen Fusion (d/v-Fusion), hier als anteriore lumbale interkorporelle Fusion (ALIF) durchgeführt. Deren Prinzip ist durch eine von ventral vorgenommene knöcherne Überbrückung Verschmelzung zweier oder mehrerer Wirbelkörper zu erreichen. Diese wird ergänzt durch Implantation eines rückenwärts eingebrachten Fixateur interne (vgl. S. 14). Von diesem ventralen Zugang aus sind auch andere Eingriffe durchführbar wie Abszessausträumung oder nach einer operativen Erweiterung das Einbringen von Bandscheiben- oder Wirbelkörperprothesen.

Andere Operationen erfolgten im vorderen Zugang durch S-förmigen Flankenschnitt. Dieser Schnitt erlaubt einen großzügigeren Operationssitus und wird für Skoliosekorrekturen benutzt. Bindegewebige oder knöcherne Spinalkanalstenosen (Lumbalstenose) sind häufig entlastungsbedürftig. Hier wird im dorsalen Verfahren durch Laminektomie und manuelle Erweiterung (Dekompression) des Wirbelkanals sowie der Neuroforamina der Raum erweitert. Bestimmte Skoliosearten erfordern eine ventrale Derotationsspondylodese (VDS). Hier wird der torquierten und konvex gebogenen Wirbelsäulensituation korrigierend entgegengewirkt. Relevant für die hier vorgestellte Studie ist hauptsächlich der allen Verfahren gemeinsame vordere Zugang sowie die räumliche Nähe des Operationsgeschehens zum lumbalen Grenzstrang. Stellvertretend für alle eingesetzten Verfahren wird nachfolgend die ALIF-Methode beschrieben. Indikationen bei der vorliegenden Untersuchung sind die degenerative Wirbelsäuleninstabilität bei Wirbelgleiten (Spondylolisthesis), kombinierter Spinalkanalstenose sowie Tumoren und Infektionen [60].

### 3.2.2 Geschichtlicher Rückblick

Vordere Spondylodesen, auch als Fusion bezeichnet, wurden zum ersten Mal in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts vorgenommen [78]. Burns, Jenkins, Kellog, Speed und Friberg beschrieben zwischen 1933 und 1939 erste Erfolge [78]. Als Fusion wird eine kontinuierliche ununterbrochene Matrix spongiöser Knochenstruktur definiert, die den Intervertebralraum zwischen zwei angrenzenden Wirbelkörpern überbrückt. Die ersten dorsalen Spondylodesen wurden schon früher durchgeführt, 1911 berichtete Hibbs über seine ersten Ergebnisse [42]. Die Mehrheit der frühen interkorporellen Fusionen wurden bei Tuberkulose oder Skoliose vorgenommen. Durch veränderte Auftretenshäufigkeit der ursprünglich indizierenden

Erkrankungen ist die Hauptindikation heute die degenerative Wirbelsäuleninstabilität [42], namentlich die operative Therapie chronischer Rückenschmerzen. Die Möglichkeit den Eingriff unter elektiven Bedingungen vorzunehmen, erweist sich unter allgemeinchirurgischen Gesichtspunkten als vorteilhaft.

Vorteile der ventralen gegenüber der dorsalen Operationsmethode sind zahlreich: Relativ leichtere Präparation, geringere Operationszeit, geringerer Blutverlust sowie Vermeidung von Vernarbungen im Spinalkanal [49]. Trotzdem werden beide Verfahren mit unterschiedlichem Indikationsschwerpunkt eingesetzt. Obgleich guter Behandlungserfolge für einen Großteil behandelter Patienten zwang mangelnder globaler Erfolg früher Spondylodesetechniken zu fortlaufender Modifikation und Suche nach methodischer Fortentwicklung [42, 78]. Als vorläufiger Hauptvertreter dieser operationsmethodischen Evolution hat sich für den Lumbalbereich die anteriore lumbale interkorporelle Fusion (ALIF) als goldener Standard etabliert.

### 3.2.3 Operationsmethode

#### Ventraler Eingriff

Operationsmethoden unterscheiden sich sowohl in Zugangswegen als auch im Eingriffsprofil am eigentlichen Leidensfokus. Alle in dieser Untersuchung zum Tragen kommenden Operationsmethoden haben einen vorderen Zugang gemeinsam. Gemeinsames Ziel ist eine Präparation der paravertebralen Gegend. Die betrachtete Struktur des lumbalen Grenzstranges liegt hier unmittelbar vor dem Zielort des Eingriffs. Die Präparation dieser Struktur ist Teil jeder Operation und in Art und Umfang bei den unterschiedlichen Eingriffen vergleichbar. Eine ausführliche Darstellung der in dieser Studie hauptsächlich benutzten Fusionstechnik findet sich bei Mayer [60].

Der Patient befindet sich in Rückenlage auf einem positionierbaren Operationstisch, in Hyperlordose gelagert und in Intubationsnarkose. Die Etagen L<sub>2</sub>-L<sub>3</sub>, L<sub>3</sub>-L<sub>4</sub> und L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub> werden über einen retroperitonealen, die Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub> über einen transperitonealen Zugang operiert. Ein 4–6cm langer Hautschnitt verläuft für den retroperitonealen Zugang paramedian für die L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>-Fusion longitudinal oder transversal in der Medianlinie. Der Zugang vom Hautschnitt zum retroperitonealen Raum erfolgt durch stumpfe Präparation. Weiterhin stumpfe Präparation führt vom Retroperitonealraum zur Intervertebralgend. Während dieses Abschnitts der Operation wird der Operationssitus mit langen Bauchhaken in Position gehalten. Große Tiefe des Situs bei relativ kurzem Hautschnitt machen starke Traktionskräfte an retrahierten Strukturen erforderlich. Hierzu gehört auch der sympathische Grenzstrang. Nervenwurzelirritation können vermieden werden durch Beschränkung der Psoasdissektion auf einen Bereich der den hinteren Pedikeleingang schont. Sie sind jedoch nicht auszuschließen. Deshalb gehören die spinalen Nervenwurzeln zu den potentiell gefährdeten Strukturen. Die Sympathi-



kusstränge werden regelmäßig präpariert und wenn möglich erhalten. Der Operationsitus zwingt jedoch häufig zu unterschiedlicher Manipulation am Grenzstrang zur Schaffung optimaler Bedingungen für die Bandscheibenresektion. Ablösung aus seinem Bindegewebbett und Verlagerung bis hin zur Resektion kommen vor.

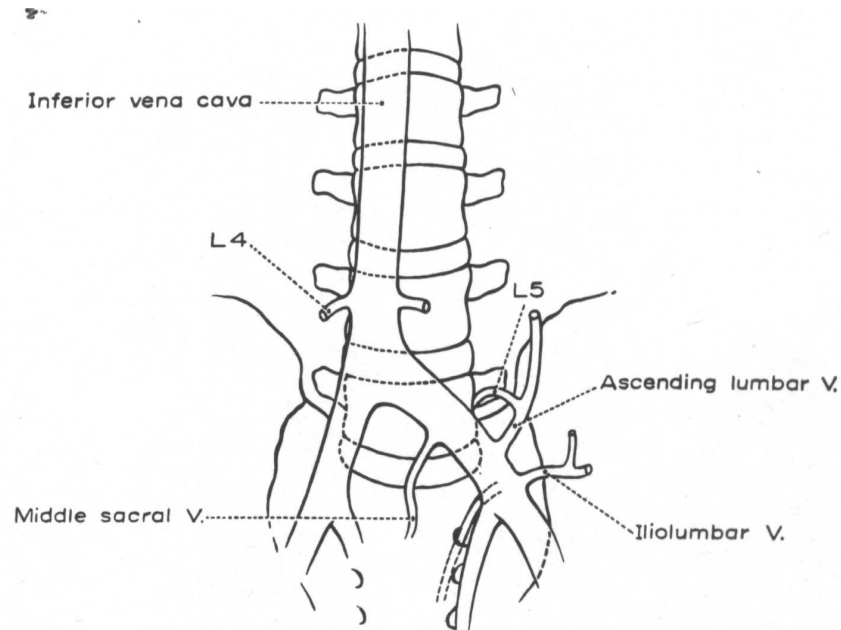


Abbildung 3.1: Das Schema [42] zeigt, dass die Lage der großen Gefäße die Möglichkeiten für den Zugang limitieren. Aus diesem Grund wird der retroperitoneale Zugang oberhalb L<sub>5</sub> präferentiell von links, der L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>-Zugang von links oder von rechts vorgenommen.

Die Fusion der Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub> erfolgt über einen transperitonealen Zugang. Die Wirbelsäule ist hier hyperextendiert, beide Beine in maximaler Abduktionsstellung. Nach Hautschnitt wird das Peritoneum parietale durch scharfe Inzision der Linea alba erreicht. Auch das Peritoneum ist stark sympathisch innerviert. Zur Aufrechterhaltung der Orientierung wird in regelmäßigen Abständen physiologische Kochsalzlösung als Spülflüssigkeit eingesetzt.

### Dorsaler Eingriff

Die anteriore lumbale interkorporelle Fusion wird im allgemeinen als dorsoventrales Verfahren eingesetzt. Die ventrale Fusion wird erweitert um vorherige dorsale Instrumentation (Implantation eines dauerhaft verbleibenden internen Fixateurs). Diese dorsale Stabilisation wird einzeitig (in gleicher Narkose) mit der ventralen Fusion durchgeführt, in zeitlicher Abfolge vor der Spondylodese.

Das thermographische Monitoring des dorsalen Eingriffs hat in Vorversuchen keinerlei signifikante Temperaturentwicklung im Sinne einer dauerhaften, reproduzierbaren Seitendifferenz gezeigt. Lediglich kurzfristige seitensymmetrische Temperaturschwankungen traten beim Einschrauben in die Wirbelkörper auf. Hier zeigte sich jeweils ipsilaterale Abkühlung für die Dauer des mechanischen Manövers. Es folgte die umgehende Anwärmung auf den Ausgangswert nach Abschluß des Teilschritts. Der Vollständigkeit halber ist das dorsale Vorgehen an dieser Stelle aufgeführt.

### 3.2.4 Operationsrisiken, -komplikationen

Jeder operative Eingriff birgt Risiken bezüglich der funktionalen Integrität des Organismus. Möglichkeiten zur intraoperativen Komplikation bestehen immer in der Verletzung des Operationsgebietes kreuzender oder diesem benachbarter Strukturen, ferner durch methodebedingte manuelle Läsionen (Dehnung, Kompression). Auch systemische Begleitreaktionen, wie sie allgemein nach chirurgischen Eingriffen auftreten können (z.B. Sepsisentwicklung, Koagulopathie) spielen eine Rolle.

Folgende das sympathische System betreffende Hauptkomplikationsmöglichkeiten bei Wirbelsäulenoperationen mit vorderem Zugang im Lendenbereich sind beschrieben:

- Spinalnervirritation oder -kompression durch zu kraftvolles Retrahieren des Psoasmuskels
- Dysästhesien
- Störung der Schweißsekretionsfunktion der unteren Extremität
- Störung der Piloreaktion (glatte Haarmuskulatur)
- Störung der Gefäßweitenregulation
- Schmerzsyndrom (Complex regional pain syndrome)
- Störungen der Sexualfunktion

## 3.3 Infrarot-Thermographie

### 3.3.1 Einführung

Thermologie ist die Lehre der Wärme- und Temperaturregulation [55]. Jeder Körper emittiert Energie in Form von Infrarotstrahlung, einem für das menschliche

Auge nicht sichtbaren Wellenbereich, auch Wärmestrahlung genannt. Die Intensität dieser Wärmestrahlung des menschlichen Körpers folgt einem Temperaturverteilungsmuster, welches für bestimmte Körperregionen charakteristisch ist. Im gesunden Organismus herrscht normalerweise Seitengleichheit der Oberflächentemperatur. Die thermische Asymmetrie der Körperhälften ist dabei Grundlage für einen pathologischen Befund. Ganz allgemein gilt, daß die Temperatur an Orten erhöht ist, an denen die Blutflussrate erhöht ist. Regelmäßig ist dies der Fall bei Entzündung, Infektion, Trauma, Neoplasie. Hier ist der thermographische Befund positiv. Anders ausgedrückt, es tritt ein asymmetrisches Verteilungsmuster hinsichtlich der oberflächlich messbaren Temperatur auf. Für bestimmte Erkrankungen, bei denen die Thermographie als Diagnostikum oder zum Monitoring indiziert ist, lassen sich charakteristische Temperaturverteilungen abbilden, die helfen können, die Verdachtsdiagnose zu erhärten.

Ferner ist das Verfahren Thermographie ein noninvasives, nichtionisierendes, nicht schmerzhaftes und beliebig oft wiederholbares Ereignis. Es kann unbedenklich auch bei Kindern und Schwangeren angewandt werden [55]. Neben der kontaktfreien Thermographie, die im folgenden näher beschrieben wird, gibt es auch sogenannte kontaktthermographische Verfahren. Vertreter ist hier die Flüssigkristallthermographie (vgl. S. 67).

### 3.3.2 Geschichtlicher Rückblick

In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden Infrarot-Empfänger entwickelt, zunächst für militärische Zwecke. Später bediente sich die Industrie dieser Messtechnik; minimale Wärmesprünge durch Risse in Metallrohren waren jetzt leicht zu orten. Auch in die Medizin fand die thermographische Messmethode Eingang. Seit der Einführung an einem großen Umfang von Krankheitsentitäten getestet, hat sich die Thermographie unter der Vielfalt diagnostischer Mittel für ein ausgewähltes Spektrum von Erkrankungen behaupten können. Anfangs in der Diagnostik von Mammatumoren eingesetzt, folgte der Einsatz in vielen weiteren Disziplinen wie Chirurgie [81], Dermatologie [17], Orthopädie [5, 6, 26, 34, 41], Neurologie [29, 39, 101, 104], Traumatologie [56], Kinderheilkunde [15], Urologie [52, 100] und anderen [16, 57].

### 3.3.3 Theoretisch-anatomische Grundlagen

Der sympathische Grenzstrang, Truncus sympathicus, ist ein Nervenstrang, unterbrochen durch Ganglien, der beidseits vor der Wirbelsäule verlaufend von der Schädelbasis bis ins kleine Becken verläuft. Die Grenzstrangganglien jeder Seite sind untereinander durch vertikale Rami interganglionares verbunden. Ursprung der präganglionären Fasern des Grenzstranges (Rami communicantes albi) sind die Perikarya dieses ersten efferenten Neuron, gelegen im Seitenhorn des Rückenmarks im Bereich Th<sub>1</sub>-L<sub>3</sub>. Auch aus anderen Rückenmarksegmenten treten wahr-

scheinlicherweise sympathische Fasern über die Spinalwurzeln aus dem Rückenmark aus [31, 99].

Die Umschaltung vom ersten auf das zweite Neuron erfolgt im Grenzstrang, meist im Ganglion zugehöriger Segmenthöhe, sonst über Rami interganglionares fortgeleitet in darüber- oder daruntergelegenen Ganglien. Postganglionäre Fasern ziehen als Rami communicantes grisei zurück zum Spinalnerven und mit diesem oder über ein vorbeiziehendes Gefäß zum Versorgungsbereich. Darüber hinaus bestehen mit großer Variationbreite horizontale und diagonale interganglionäre Verbindungen zwischen kontralateralen Ganglionpaaren innerhalb gleicher oder unterschiedlicher Segmente [19]. Funktionell unterliegt der lumbalen sympathi-

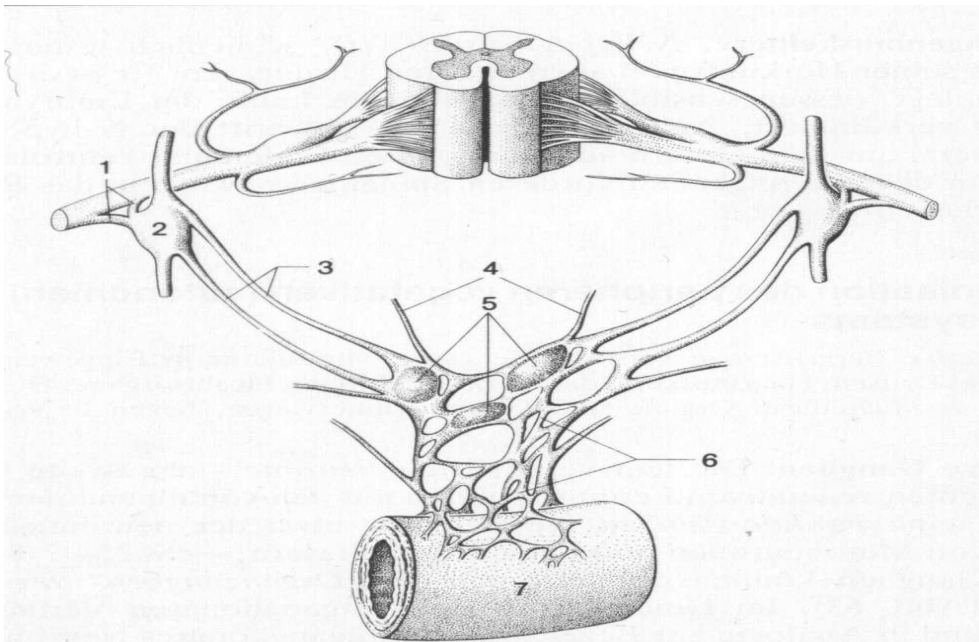


Abbildung 3.2: 1 Rr. communicantes des Spinalnerven, 2 Ggl. trunci sympathici, 3 Nn. splanchnici des Truncus sympathicus, 4 parasympathische Äste, 5 vegetative Ganglien, 6 vegetativer Plexus, 7 Erfolgsorgan [31]

schen Devison nachweislich vasokonstriktische, sudomotorische, und pilomotorische Aktivität an der unteren Extremität [88].

Es besteht große Variabilität in der Ausprägung der sympathischen Strukturen. Die Anzahl der lumbalen Grenzstrangganglien beispielsweise variierte in einer Obduktionsstudie von Cowley und Yaeger zwischen 1 und 8 [19, 82, 88]. Die sympathische Verteilung an der Haut der unteren Extremität hält sich entsprechend

der sensiblen Dermatome an eine zonale Verteilung ohne mit dieser identisch zu sein [55]. Treten sympathikusbedingte thermographische Seitendifferenzen an den Extremitäten auf, so tun sie dies anhand von Ergebnissen früherer Untersuchungen regelhaft innerhalb bestimmter Areale [32]. Diese Areale entsprechen den Mustern der sympathischen Verteilung. Diese Temperaturdeviationen können in Form von hyperthermischen (akuten Ereignissen, Entzündungen zugeschrieben) oder hypothermischen (chronische Prozesse) Abweichungen [77] vorkommen.

### 3.3.4 Neurophysiologie der Temperaturregulation

Hauttemperatur kann als Funktion des kutanen Blutflusses unter Kontrolle des autonomen Nervensystems betrachtet werden. Neben der zentralen Regulation kommen noch andere regionale und lokale periphere neurochemische Mechanismen der Gefäßweitenregulation und damit des Blutflusses zum Tragen. Der Parasympathikus erwirkt über Ausschüttung von Acetylcholin eine Relaxation der glatten Gefäßmuskulatur. Über Noradrenalinausschüttung konstringiert der sympathische Anteil die glatten Gefäßmuskeln. Als übergeordnete Steuerungsinstanz wird hierbei ein Feedback-Mechanismus angesehen, der in einem Temperaturregulationsmechanismus im Hypothalamus besteht. Wärmesensitive Neurone feuern als Antwort auf erhöhte Temperatur bedingt durch erhöhten Blutfluss. Diese Neurone liegen im Nukleus präoptikus. Die resultierende Inhibition sympathischer Neurone im posterioren Hypothalamus bewirkt eine Reduktion des normalen Vasokonstriktortonus. Es wird vermehrt Wärme abgegeben [55]. Zentrale Kontrolle der Hauttemperatur bewirkt symmetrische Temperaturänderung und symmetrische thermographische Verteilungsmuster. Die Thermographie z.B. ist ein funktionelles Verfahren zur Detektion defekter Temperaturregulationsprozesse. Es kann Funktionsveränderungen nach strukturellen Läsionen nachweisen, nicht aber eine veränderte Anatomie an sich [55]. Als pathologisch gilt allgemein jede Seitendifferenz der Körperoberflächentemperatur. Jedoch auch der gesunde Körper weist transiente geringfügige Seitendifferenzen auf, so dass erst regional abhängig ab einem festgelegten Grenzwert von einer klinisch relevanten thermographischen Seitendifferenz gesprochen werden kann. Die von Uematsu [101, 102, 103] in einer Untersuchung an gesunden Probanden gewonnenen Ergebnisse bezüglich noch physiologischer Temperaturdifferenzen sind in Tabelle 2.3.4 wiedergegeben. Temperaturdifferenzen oberhalb  $1^{\circ}\text{C}$  zwischen korrespondierenden Körperregionen liegen somit (mit Ausnahme der Zehen) außerhalb der zweifachen Standardabweichung vom Normalwert und können als sicher pathologisch eingestuft werden. Thermographien der Hautoberfläche liefern ferner in

Wiederholungsmessungen zuverlässige Ergebnisse. Speziell hinsichtlich pathologisch bedingter Temperaturschwankungen (z.B. Nervenläsionen) zeigen Seitendifferenzen kongruente Befunde.

Region	$\Delta T$ [ $^{\circ}C$ ]	SD [ $^{\circ}C$ ]
Kopf (Stirn/Wangen)	0.30	$\pm 0.17$
Körperstamm (ventral)	0.21	$\pm 0.19$
Körperstamm (dorsal)	0.34	$\pm 0.26$
Arme		
Unterarme volar	0.25	$\pm 0.21$
Unterarme dorsal	0.31	$\pm 0.22$
Hand volar	0.24	$\pm 0.23$
Handrücken	0.31	$\pm 0.25$
Finger	0.43	$\pm 0.26$
Beine		
Unterschenkel	0.27	$\pm 0.20$
Fußrücken	0.38	$\pm 0.31$
Zehen	0.59	$\pm 0.27$

Tabelle 2.3.4: Temperaturdifferenzen zwischen linker und rechter Körperhälfte für unterschiedliche Regionen [71] modifiziert nach [101, 102].

### 3.3.5 Standardbedingungen für Thermographie

Um statistisch aussagefähige und vergleichbare Daten zu erhalten, wird ein standardisiertes Untersuchungsverfahren angestrebt. Die Empfehlungen hinsichtlich thermographischer Untersuchungsstandards differieren jedoch bei den unterschiedlichen Autoren [71]. Im folgenden werden Mindestanforderungen an die Untersuchungsbedingungen und die Vorbereitung zur Thermographie angeführt (modifiziert nach [71]):

- Konstante Raumtemperatur
- turbulente Luftströmung
- Luftfeuchtigkeit 45–60%
- Keine Heizstrahler in der Umgebung des Patienten
- 20 Minuten Akklimatisationszeit
- Restriktion von Alkohol, Nikotin, Kaffee, Tee am Tag der Untersuchung
- Keine Physio-/Hydrotherapie
- Keine topischen Anwendungen auf der Haut
- Standardisierung der Einstellungen

Die American Academy of Thermology empfiehlt darüber hinaus [55]:

- Reinigung des Patienten durch Bad oder Dusche am Tag der Untersuchung
- Keine Fettcreme, Puder, Deodorant, medizinische Salben, Parfum am Untersuchungstag
- Keine Rasur oder Kosmetika wenn entsprechendes Areal Untersuchungsgegenstand ist
- EMG, Akupunktur, Nervenblockaden, Myelographie möglichst erst nach thermographischer Untersuchung, da regionale Temperaturregulationsartefakte wahrscheinlich sind
- Keine Transkutane Elektrische Nervenstimulation (TENS) oder Physiotherapie 24 Stunden vor der Untersuchung
- Keine Ketten, Armbänder o.ä. 4 Stunden vor Untersuchungsbeginn wegen möglicher thermorelevanter Hautirritationen
- Exzessive Sonnenbestrahlung oder Sonnenbrand 7-10 Tage vor der Untersuchung sind auszuschließen

Konstante Raumtemperatur meint hier, dass während einer Reihenuntersuchung die Raumtemperatur standardisiert ist, innerhalb der Akklimatisations- und Untersuchungsdauer gleichbleibend ist. Turbulente Luftströmung als Mindestanforderung entbindet von der Maximalanforderung einer laminaren Klimatisation.



Bei der Bildaufnahme ist ferner zu beachten, dass der Winkel des Strahlenganges zur Objektebene idealerweise 90 Grad beträgt, da andernfalls Abweichungen vom wahren Temperaturwert resultieren, die von diagnostischer Bedeutung sein können. Dies tritt vor allem in Randbereichen gekrümmter Körperoberflächen in Erscheinung (Relevanz absoluter Temperaturangaben vs. thermographische Seitenunterschiede vgl. S. 18).

### 3.3.6 Eingesetztes Thermographieverfahren und dessen physikalisch-technische Grundlagen

Die bei der Thermographie interessierende Wärmestrahlung des Körpers liegt im Infrarotspektrum elektromagnetischer Wellen bei  $3\text{--}10\mu\text{m}$ . Für das menschliche Auge ist sie nicht sichtbar. Infrarotstrahlen werden von der Körperoberfläche abgegeben, vom Detektor registriert und durch einen Signalwandler elektrisch kodiert. Das System arbeitet vollständig kontaktfrei, dem Körper wird auch keine Energie zugeführt, noch wird er in irgendeiner Weise manipuliert. So werden die bei ins System eingreifenden Untersuchungsmethoden üblichen Artefakte vermieden. Auch sehr kleine Temperaturunterschiede sind grundsätzlich erfassbar. Temperaturdifferenzen von  $0.1^\circ\text{C}$  werden diskriminiert. Gemäß älterer Studien kann neben quantitativer Messung auch durch Kenntnis neuraler Hautverteilungsmuster eine Affektion der temperaturbestimmenden sympathischen Komponente auf segmentaler oder peripherer Ebene bestimmt werden (vgl. S. 65).

Die thermographische Untersuchungseinheit beinhaltet im wesentlichen eine Abtasteinheit, einen Verstärker und einen Computerprozessor. Die Bilddarstellung erfolgt über eine Displayeinheit. Die Scanner-Einheit verfügt über einen Abtastspiegel, Reflektorklappen, den Detektor und eine Referenzwärmequelle.

In der thermographischen Anwendung ist es von Bedeutung, dass Objekte in ihrer Temperatur von der Umgebungstemperatur nicht überschritten werden. Um Wärme abstrahlen zu können, soll die Umgebungstemperatur konstant und verglichen mit dem Untersuchungsobjekt niedriger sein. Wichtig bezüglich der Infrarotabstrahlung ist, dass sie eine Funktion der emmissiven Eigenschaften der Oberfläche des strahlenden Körpers darstellt. Reflexion und Emission verhalten sich hierbei antiproportional, d.h. wenn der Körper wenig Strahlen reflektiert, wird er dazu neigen in höherem Maße zu emmetieren. Die Emmessivität der Haut wird u.a. beeinflusst durch Behaarungsdichte, Durchblutungsstärke, Feuchtigkeit der Oberfläche.

Das Band der Infrarotstrahlung umfasst  $0.7\text{--}1000\mu\text{m}$ . Der Wellenbereich der Infrarotstrahlung des menschlichen Körpers ist mit  $3\text{--}10\mu\text{m}$  jedoch nur ein schmaler Ausschnitt. So muss der Detektor in einem sehr kleinen Fenster eine sehr große Sensitivität besitzen. Die meist benutzten Detektoren besitzen Indium-Antimonid-Einheiten mit einer Sensitivität von  $2\text{--}6\mu\text{m}$  und Cadmium-Quecksilber-Tellurit-Einheiten mit einer Empfindlichkeit von  $8\text{--}10\mu\text{m}$ . Die in dieser Untersu-



chung eingesetzte Kamera verfügt über einen Platin-Silizium-Detektor. Deren thermisches Auflösungsvermögen liegt bei  $0.1^{\circ}\text{C}$ , die spektrale Empfindlichkeit des Platin-Silizium-Detektors reicht von  $3.4\mu\text{m}$  bis  $5.1\mu\text{m}$ .

Die Scannerlinse ermöglicht eine Fokussierung des Objektes auf den Detektor. Anstatt einer oder mehrerer Linsen kann auch ein Spiegelsystem diesen Zweck erfüllen. Für die Quantifizierung der Temperatur wird ein sogenannter Chopper benutzt. Dieser Chopper ist in der Front des Detektors integriert und bewirkt eine Alternierung der Eingabe zwischen Objekttemperatur und aus einer Referenzwärmequelle stammende Temperaturmenge. So kann durch kontinuierlichen Vergleich auf die wahre Temperatur des untersuchten Objektes geschlossen werden. Ferner, zur Erreichung elektrischer Stabilität ist der Detektor mittels Kühlsystem temperaturstabilisiert. Für eine ausführlichere Darstellung wird auf Brelsford/Uematsu [13] verwiesen.

### 3.3.7 Untersuchungsablauf

#### Vorüberlegungen zum Untersuchungsdesign

Ziel der Überlegungen war, einen möglichst günstigen Schnittpunkt bezüglich des Aussageoptimums für die unterschiedlichen Untersuchungsparameter zu erreichen. Anzustreben waren somit eine möglichst hohe Compliance bei der Patienteneinstellung (Neutral-Null-Stellung) während der thermographischen Aufnahme, möglichst frühpostoperative Untersuchung und einen Untersuchungsfokus von möglichst hoher Aussagekraft.

Abzuwägen war auch die Thermographie während eines frühest möglichen Zeitpunkts postoperativ durchzuführen gegenüber schmerz- und schwächebedingt eingeschränkter Compliance im Hinblick auf eine standardisierte Patienteneinstellung bei thermographischer Aufnahme. Hier resultieren Perspektivfehler. Es wurde hier für einen frühest möglichen Zeitpunkt der Untersuchung entschieden. Da Perspektivfehler sowohl beide Seiten betreffen und durch den Lageaspekt selbst dem Untersucher schon während der Aufnahme offenbar werden, ist dieser regelmäßig bei seinem Auftreten erkennbar. Der Fehler, der durch vergrößertes Zeitintervall zwischen Operation und thermographischer Untersuchung entsteht und zeitabhängig ist, ist in seiner möglichen Anwesenheit und seinem Ausmaß nicht abschätzbar. Als aussagekräftigste Perspektiven zeigten sich in den Voruntersuchungen Fußrücken und Fußsohle, wobei die Fußsohle die anisotherme Reaktion in noch stärkerem Maß zeigte. Während Probeaufnahmen war die exakte Einstellung der Fußsohle bei in Rückenlage befindlichem Patienten weniger stabil als dies beim stehenden Patienten zu erreichen war. Um frühpostoperativ zu thermographieren, wurde die Aufnahme des Fußrückens am stehenden Patienten als Hauptuntersuchungsperspektive gewählt. Flächenmessungen sind Punktmessungen hinsichtlich der Abweichung vom wahren Wert überlegen. An Zehen ist projektions- oder häufig fehlstellungsbedingt eine ideale Flächenmessung

nicht möglich gewesen. Bei der Ferse hinderte eine fehlende eindeutige proximale Grenzdefinition an einer schlüssigen Flächenvermessung. Um trotzdem unter Berücksichtigung des Risikos starker Fehlerbehaftung einen Wert für diese Regionen zu bekommen, wurde die Aufnahme von Punktmessungen an zentraler distaler Zehenphalanx und dorsaler zentraler Ferse durchgeführt.

### **Untersuchungsraum**

Bezüglich des Untersuchungsraumes stellte sich die Frage ob eine Klimakammer benutzt werden sollte oder ob ein Untersuchungs-Setting klinischer Bedingungen gewählt werden könne. Für relevant erachtet wurden primär intraindividuelle Seitenunterschiede sowie intraindividuelle Betrachtungen prä-/postoperativ. Primär nicht maßgeblich sind bei diesen Betrachtungen absolute Temperaturen.

Es wurde ein Untersuchungsraum der Schmerzlinik der Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie, Universitätskrankenhaus Hamburg-Eppendorf gewählt. Dieser Raum ist 2.97x6.00m groß und 3.40m hoch. Es befinden sich an den Schmalseiten je ein Fenster und eine Tür; das Fenster ist durch einen außenmontierten rollbaren Lichtschutz (Screen) armiert. Der Türschlitz wurde für die Zeit der Untersuchung abgedichtet, so dass keine Zugluft herrschte. Ein besonderes Lüftungssystem besitzt der Raum nicht, so dass von turbulenter Luftströmung ausgegangen werden kann. Für die Zeit der Untersuchung wurde ein Temperaturbereich zwischen 22°C und 24°C sichergestellt. Der Raum war während der Untersuchung durch heruntergelassenen Lichtschutz von direkter Sonneneinstrahlung abgeschirmt.

### **Vorbereitung**

Zu Beginn der prä- und postoperativen Untersuchung verweilte jeder Patient mit Unterwäsche bekleidet und in Rückenlage zwanzig Minuten im Untersuchungsraum. Unmittelbare Nähe des Patienten zum Heizkörper wurde während Akklimatisations- und Untersuchungsphase vermieden.

### **Untersuchungseinstellung**

Während der thermographischen Untersuchung standen die Patienten in aufrechter Haltung, die Beine leicht gespreizt (modifizierte Neutral-Null-Stellung) auf einem weißen Leinentuch um Artefakte durch Wärmeleitung zu minimieren.

### Bildperspektiven

Folgende Bildperspektiven wurden von jedem Patienten aufgenommen:

- Großaufnahme beider Fußrücken am stehenden Patienten, Fokus-Objekt-Abstand  $700\text{mm}$ , Neigung ca.  $5^\circ$  zur Senkrechten, angenähert senkrecht an eine Parallele zum Fußrücken
- Großaufnahme beider Fersen von posterior am stehenden Patienten, Fokus-Objekt-Abstand  $700\text{mm}$
- Großaufnahme beider Fußsohlen, Fokus-Objekt-Abstand  $700\text{mm}$  (nur intraoperativ)

### Intraoperativer Untersuchungsablauf

Für die intraoperative Untersuchung lag der Patient auf dem Rücken, so daß freie Sicht auf beide Fußsohlen herrschte. Die Kamera stand während der gesamten Operation unter steriler Abdeckung mit einem Fokus-Objekt-Abstand von  $700\text{mm}$ ; die Observation erfolgte über einen externen Monitor. Ein ereignisorientiertes Temperaturprotokoll (siehe Anhang D) wurde über den gesamten Zeitraum des ventralen Eingriffs geführt. Die Bildfolge und Aufnahmezeitpunkte folgten ebenfalls diesem ereignisorientierten Schema. Erstes Bild wurde präoperativ, ein letztes nach Anlegen des Verbandes festgehalten.

### Schematisierte intraoperative Sympathikusprovokation

Voruntersuchungen zeigten Temperaturänderungen an den unteren Extremitäten unmittelbar nach Spülung mit physiologischer Kochsalzlösung. Zur Verifizierung dieser Spüllösung als ursächliche Komponente und zum Ausschluß eines kalorischen Effektes wurde ein besonderes Spülschema angewandt. Bei einem kalorischen Effekt handelt es sich um ein Ereignis, ausgelöst durch Temperatureinfluss oder in anderer Form ein temperaturabhängig veränderlicher Zustand in einem offenen oder geschlossenen System. In der perivertebralen Präparationsphase, wenn der Grenzstrang makroskopisch sichtbar ist, werden folgende Lösungen nacheinander in den Situs eingebracht, eine nach der anderen nach vorausgegangener Absaugung der vorhergehenden:

- G5-Glukoselösung (5%) bei Kühlschranktemperatur [ $7^\circ\text{C}$ ], leicht erwärmt [ $20^\circ\text{C}$ ], und bei approximierter Körpertemperatur [ $36^\circ\text{C}$ ]
- Stärkelösung (HES-70, 6%, MW 70 000) bei Kühlschranktemperatur [ $7^\circ\text{C}$ ], leicht erwärmt [ $20^\circ\text{C}$ ], und bei approximierter Körpertemperatur [ $36^\circ\text{C}$ ]

- Ringer-Lösung (8,6g NaCl/l) bei Kühlschranktemperatur [ $7^{\circ}\text{C}$ ], leicht erwärmt [ $20^{\circ}\text{C}$ ], und bei approximierter Körpertemperatur [ $36^{\circ}\text{C}$ ]
- Kochsalzlösung (0,9%) bei Kühlschranktemperatur [ $7^{\circ}\text{C}$ ], leicht erwärmt [ $20^{\circ}\text{C}$ ], und bei approximierter Körpertemperatur [ $36^{\circ}\text{C}$ ]

### 3.3.8 Infrarotkamera

Bei der im Untersuchungsverfahren benutzten Kamera handelt es sich um eine Infrarotthermographie-Kamera der Firma Inframetrics/FLIR, Modell 'Therma-CAM PM300'. Die Kamera eignet sich sowohl zum Gebrauch als mobiles Handgerät als auch zum stationären Einsatz in Verbindung mit einem Stativ. Zum Zweck der Untersuchung wurde zur Stabilisierung der Kamera ein Stativ benutzt. Die tragbare Untersuchungseinheit verfügt über eine Vollbild-Temperaturmessung. Bildspeicherung erfolgt über eine integrierte transferfähige und wechselbare Bildspeicherkarte. Die Kamera verfügt ferner über vielseitige Optionen der Analysesoftware.

Über ein entsprechendes Laufwerk im Computer kann mittels Karte übertragenes Bildmaterial mit geeigneter Software weiterbearbeitet werden. Weitere Möglichkeiten der Datenübertragung und -bearbeitung von gespeicherten Einzelbildern oder andauerndem Echtzeit-Bildmaterial ist möglich. Durch TV- oder VCR-kompatible Ausgänge sowie einen digitalen Videoausgang ist das intraoperative Monitoring komfortabel möglich.

Zentrales Element der Kamera ist ein 256x256 pxl Platin-Silizium-Detektor (focal plane array). Wärmeableitung erfolgt über einen kühlmittelbetriebenes geschlossenes Kreislaufsystem. Das Ergebnis der dekodierten Thermobilder für das betrachtende Auge ist im Farb-Flüssigkristalldisplay eines Suchers zu finden, alternativ ist Monitoring über externen Monitor möglich. Das thermische Auflösungsvermögen liegt bei  $0.1^{\circ}\text{C}$ , die spektrale Empfindlichkeit des Platin-Silizium-Detektors reicht von  $3.4\mu\text{m}$  bis  $5.1\mu\text{m}$ .

### 3.3.9 Digitale Datenverarbeitung und Bildauswertung

Die Datenspeicherung und Bildbearbeitung erfolgte unter der Bildbearbeitungssoftware Thermonitor 95 V1.20. Die Information der Temperaturverteilung liegt hier in Form graukodierter (monochromatischer) Wärmebilder vor. Diese sind umcodierbar und dann in einem Multifarbmodus zur Darstellung zu bringen. Das Graustufenformat eignet sich primär zur rechnergestützten Auswertung. Das kolorierte Bild zeigt selbst einem ungeübten Auge in eindrucksvoller Weise bestehende Temperaturunterschiede in Form devianter Verteilungsmuster bezüglich angenommener Seitengleichheit. Dieser Modus vereinfacht die Befundung. Bei der Farbkodierung ist jeder Temperaturstufe eine Farbe zugeordnet und benachbarte Farben schreiben für benachbarte Temperaturabschnitte.

Daten lagen primär als Bilddatei (TIFF) vor, generiert durch die Thermographiekamera PM 300 (s.o.). Informationen liegen auf wechselbarer Bildspeicherkarte vor. Übertragen auf die Festplatte des zentralen Rechners, wurde das Bildmaterial unter Thermonitor 95 V1.20 in nachfolgend beschriebener Weise bearbeitet.

Prä- und postoperative Aufnahmen: Der Fußrücken wird dreimal als Innenkonturfläche mit den Temperaturwerten für Minimum, Maximum und integriertem Mittelwert bezeichnet. Die proximale Grenzlinie wird beschrieben durch eine Gerade flächenparallel zur Planta pedis durch den Innenknöchel verlaufend. Durch Mittelwertbildung dieser drei Wertgruppen wird eine Abweichung vom wahren Wert bezüglich der Fußdorsalfläche durch manuelle Innenkonturbildung (Grenzziehungsfehler) minimiert. Von den Zehen des ersten und zweiten Strahls wurden im Zentrum der distalen Phalanx Temperaturpunktwerte bestimmt. Ebenfalls an der dorsalen posterioren Ferse wurden zentral Temperaturpunktmessungen vorgenommen.

Intraoperative Aufnahmen: Die Fußsohlen wurden der Analyse analog perioperativer Fußrückenaufnahmen zugeführt. Es erfolgt auch hier dreimalige Innenkonturflächenausmessung und Bezeichnung mit Temperaturwerten für Minimum, Maximum und integriertem Mittelwert.

## 3.4 Statistik

### 3.4.1 Datenbeschreibung

Bei der vorliegenden Datenmenge handelt es sich um verbundene Stichproben. Der erste Wert ist vor Eintritt eines Ereignisses (Operation) erhoben worden. Ein zweiter, dem ersten zugeordneter Wert, ist nach Ereigniseintritt aufgenommen. Zunächst wurden alle Rohdaten tabellarisch kryptonym bezeichnet (vgl. Anhang A, Tabellen Anhang A1-A6) und die Werte gelistet (vgl. Anhang B, Tabellen Anhang B1-B13). Die Patienten sind nach Diagnosen gruppiert. Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) werden für die Analysen ermittelt.

### 3.4.2 Test, Ausschlusskriterien, Nullhypothese

Zur Anwendung kommt der Wilcoxon-Signed-Rank-Test für Paardifferenzen (auch: U-Test). Es erfolgt eine Bildung von Paardifferenzen, aus welchen eine Rangfolge erstellt wird. Diese Rangsummen werden in der Folge addiert. Hierdurch werden Rangsummen erzielt.

Der Test geht nicht von einer Normalverteilung der Datenmenge aus. Als Voraussetzung gilt die Annahme, dass eine ähnliche Verteilung der Werte vorliegt. Es ist davon auszugehen, dass die hier vorliegende Datenmenge etwa gleich um den Median verteilt ist.

Die Nullhypothese  $H_0$  wird beschrieben durch die Annahme, daß zwei zu vergleichende Werte derselben Grundgesamtheit entspringen.  $H_0$  wird abgelehnt, wenn den Stichproben unterschiedliche Verteilungen zugrunde liegen oder wenn das Ergebnis nicht symmetrisch bezüglich des Median ist. Das Signifikanzniveau wurde mit  $p < 0,05$  festgelegt.  $N$  gibt die Anzahl der in den Test eingehenden Werte an. Jenseits vom Skalenwert  $Z$  liegen bei einem einseitigen Test 5% der Fläche unter einer Kurve. Bei einem zweiseitigen Test sind es 10%.

### 3.4.3 Vorstellung untersuchter Parameterpaarungen

Für die Berechnungen sind die Wertepaarungen derart verändert worden, dass die Relevanz der Links- bzw. Rechtsseitigkeit der Operation wegfällt. Betrachtet wird jeweils immer die operierte Seite (s.u. Kp. Datenformatierung). Einfließende Variablen einer Parametergruppe entstammen jeweils einer identischen Untersuchungs- bzw. Diagnosegruppe. Untersucht wird z.B. jeweils die Paarung  $\Delta T$  zwischen linker und rechter Extremität prä- und postoperativ (Abbildungen M1-M5, M21-M25, M40-M44). Diese Paarung entspricht der Idee der eigentlichen Zielsetzung der Arbeit und soll besonderes Augenmerk erhalten. Ferner wurde eine statistische Auswertung relativer Temperaturdifferenzen vorgenommen (Abbildungen M6-M20, M26-M39, M45-M59). Analysen erfolgen mit jeweils dem Maximalwert und dem Flächenmittelwert des Fußrückens, da der Minimalwert durch Grenzziehungsfehler (vgl. S. 26) als am stärksten fehlerbehaftet erscheint. Ebenfalls werden Analysen für das  $\Delta T$  der Zehen I und II sowie für die Ferse im Vergleich prä- versus postoperativ erstellt.

Zur Verminderung des Einfließens meßtechnischer Effekte in das Ergebnis soll hier auch der Wert der Relativen Temperaturdifferenz betrachtet werden. Zu messtechnischen Effekten, die das Ergebnis nachhaltig beeinflussen können, werden Einflüsse gerechnet, die durch weitauseinanderliegende Messungen oder z.B. infolge einer Adaption an die Untersuchungsraumbedingungen auftreten können. Weitere Vorteile liegen in der Eliminierung von Skalierungsfehlern, sowie in der besseren Darstellbarkeit der Effekte durch Ausdruck in Prozentanteilen. Mit der Betrachtung gleichseitiger Extremitäten im Vergleich prä- versus postoperativ wird die Richtung der Temperaturveränderung betrachtet. So kann eine Temperaturerniedrigung (ein- oder beidseitig) aufgedeckt werden, auch ein Umverteilungsphänomen der kontralateralen Seite (Patienten Nr. 2,6,7,17,24) wird so leicht erkannt.

Ferner der Analyse zugeführt werden soll die Paarung aus der Temperatursumme von linkem und rechtem Bein prä- versus postoperativ. Gebildet wird die relative Temperaturdifferenz. Dieser Wert repräsentiert eine positive oder negative Summenerwärmung. Messfehler durch Raumtemperaturunterschiede bei unterschiedlichen Messzeitpunkten werden durch diese Summenbildung minimiert.

Gruppenanalysen erfolgen jeweils getrennt für die einzelnen Diagnosegruppen. Lediglich die Gruppen von Diagnose 2 und Diagnose 3 werden zusammengefaßt.

Ihre Diskriminierung ist ergebnisgebunden und kann in der statistischen Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

#### 3.4.4 Abgrenzung zu anderen Tests

Als mögliche Anwendung wäre noch der Fisher-Exakt-Test für Paardifferenzen zu nennen. Dieser bedingt eine Normalverteilung der Werte. Eine solche kann in dieser Untersuchung nicht angenommen werden, so dass die Anwendung dieses Tests hier nicht in Frage kommt.

#### 3.4.5 Datenformatierung

Für die statistischen Analysen werden die Daten derart aufbereitet, dass sie in einer für das Testvorgehen vergleichbaren Form vorliegen. So werden alle rechtsoperierten Patienten für die Statistik als von links operiert betrachtet (also: links=operierte Seite, rechts=nichtoperierte Seite).

#### 3.4.6 Graphische Darstellung

Graphische Darstellung des Ergebnisses einer jeweiligen Analyse durch den U-Test erfolgt durch den Box-Whisker-Plot. Der Box-Whisker-Plot zeigt neben dem Median (kleines Quadrat) und der ersten und dritten Quartile (Box/Parzelle) auch den Minimal- und Maximalwert der jeweiligen Verteilung (Vertikallinien mit horizontalem 'Schnurrbart': sog. Whiskers), soweit diese nicht über das 1,5fache des Interquartilenabstandes (IQR) hinausgehen. Werte außerhalb von 1,5 IQR aber noch innerhalb von 3 IQR gelten als Außreißer und würden einzeln als Kreis dargestellt. Extremwerte liegen mehr als 3 IQR von der Box entfernt, und würden durch Sterne markiert. Letztere beiden Phänomene kommen hier nicht zum Tragen und finden sich deshalb in der Darstellung nicht.

Die Sammlung der Daten erfolgte mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Excel (OfficeXP). Statistische Analysen und die graphische Darstellung der Box-Whisker-Plots erfolgten unter Zuhilfenahme des Statistikprogramms Statistika 5.5. Analyseergebnisse sind in Form von Box-Whisker-Plots wiedergegeben.

# Kapitel 4

## Ergebnisse

### 4.1 Etagenbezogene Temperaturdifferenzen (Fußrücken), postoperativ

Fusionen L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub> bei unilateralem Zugang mit thermographischem Befund; Untersuchungsgruppe 1

Nr.	Patient	Etage	$\Delta T [^{\circ}C]$	Zugang
1	MB	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	4.6	Links
13	IL	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	5.13	Links
14	GB	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	2.77	Links
21	HW	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	4.6	Links
22	HK	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	5.13	Links
25	MR	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	3.63	Links
34	BN	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub> ,	4.97	Links

Tabelle 3.1.1: Fusionen L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub> bei unilateralem Zugang mit thermographischem Befund



**Fusionen L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub> bei unilateralem Zugang mit thermographischem Befund; Untersuchungsgruppe 2**

Nr.	Patient	Etage	$\Delta T [^{\circ}C]$	Zugang
6	WS	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	3.77	Links
23	HS	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	1.3	Links
29	HW	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	2.03	Rechts
41	SH	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	2.87	Rechts

Tabelle 3.1.2: Fusionen L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub> bei unilateralem Zugang mit thermographischem Befund

**Fusionen L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub> bei unilateralem Zugang ohne thermographischen Befund; Untersuchungsgruppe 3**

Nr.	Patient	Etage	$\Delta T [^{\circ}C]$	Zugang
8	MS	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	0.07	Links
15	DS	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	0.03	Rechts
16	NW	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	0.27	Links
17	DS	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	0.4	Rechts

Tabelle 3.1.3: Fusionen L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub> bei unilateralem Zugang ohne thermographischen Befund

**Fusionen bei unilateralem Zugang (Nicht-L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>-Fusionen) mit thermographischem Befund; Untersuchungsgruppe 4**

Nr.	Patient	Etage	$\Delta T[^\circ C]$	Zugang
2	UD	L <sub>4</sub> -S <sub>1</sub>	2.97	Links
3	ID	L <sub>3</sub> -L <sub>5</sub>	1.27	Links
4	UP	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	4.43	Links
5	SS	Th <sub>10</sub> -L <sub>4</sub>	2.63	Links
7	FF	Th <sub>12</sub> -L <sub>4</sub>	4.03	Rechts
11	AS	L <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	1.0	Links
24	UM	L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub>	2.9	Links
33	RB	L <sub>5</sub>	4.7	Links
35	HP	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub> L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	3.63	Links

Tabelle 3.1.4: Fusionen bei unilateralem Zugang (Nicht-L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>-Fusionen) mit thermographischem Befund

**Fusionen mit perivertebralem (beidseitigem) Geschehen; Untersuchungsgruppe 5**

Nr.	Patient	Etage	$\Delta T[^\circ C]$	Zugang
9	ER	Th <sub>10</sub> -Th <sub>11</sub>	0.53	Rechts
10	AS	L <sub>1</sub> -L <sub>3</sub>	0.2	Links
19	HS	L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	0.1	Rechts
26	BJ	Th <sub>4</sub> -Th <sub>6</sub> Th <sub>10</sub> -Th <sub>12</sub>	0.83	Rechts
27	IH	Th <sub>11</sub> -L <sub>4</sub>	0.57	Rechts
30	MP	Th <sub>12</sub> -L <sub>4</sub>	0.17	Rechts
37	NL	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	0.03	Rechts

Tabelle 3.1.5: Fusionen mit perivertebralem (beidseitigem) Geschehen

## 4.2 Subjektive Beschwerden

### 4.2.1 Präoperative Beschwerden

Jeder Patient hatte präoperativ einen chronischen und in unterschiedlichem Maß invalidisierenden Rückenschmerz. Die Dauer des Rückenschmerzes war aufgrund unscharfer Patientenangaben aufgrund des meist lange zurückliegenden Beginns nicht exakt zu validieren. Laut Befragung betrug die Zeit durchschnittlich etwa 3 Jahre und 11 Monate. Die Extrema lagen bei 2 Monaten und bei 10 Jahren. Die Schmerzintensität wurde mit Hilfe der visuellen Analogskala erhoben. Bei dieser soll der Patient angeben, wie er seinen Schmerz quantifiziert, wenn Null keinen Schmerz und Zehn maximal vorstellbaren Schmerz beschreibt. Parästhesien und Schmerzen in unterschiedlichem Ausmaß sowie teilweise Paresen zwangen die Patienten sich operieren zu lassen. In dieser Studie zeigte keiner der Patienten im beobachteten Zeitraum eine Symptomatik im Sinne eines CRPS (Complex Regional Pain Syndrome).

### 4.2.2 Postoperative Beschwerden

Postoperativ erfolgte zusammen mit einer erneuten Thermographie eine Befragung hinsichtlich Schmerzausmaß und möglicher neu aufgetretener Beschwerden. Der Zeitpunkt hierfür war der jeweils frühestmögliche im Sinne postoperativer Mobilisation. Durchschnittlich war dies am 11. Tag postoperationem der Fall. Extrema lagen hier bei Tag 3 und 33. Es beklagte keiner der Patienten mehr, an präoperativ unaushaltbaren Schmerzen zu leiden. Das Schmerzausmaß war dem postoperativ erwartbaren Schmerz adäquat.

In der Patientengruppe mit postoperativer Anisothermie gaben vier Patienten auf Befragung nach Auffälligkeiten oder Missempfindungen an der unteren Extremität an, diese Anisothermie subjektiv wahrzunehmen. Von diesen fühlte sich allerdings nur ein Patient (Patient Nr. 27) von diesem Umstand ausdrücklich gestört. In einem Fall trat postoperativ eine retrograde Ejakulationsstörung auf (Patient Nr. 10, Z.n. OP, anamnestisch: 12 Tage postoperativ bemerkt).

## 4.3 Präoperative Thermogramme

Entsprechend der Untersuchungsanordnung wurde präoperativ thermographiert. Thermographiert wurden 22 Patienten, damit nahmen alle Probanden an der Untersuchung teil, die nicht Notfallpatienten waren und deshalb der präoperativen Aufnahme zugänglich waren. Die Thermogramme des Fußrückens aller Patienten zeigen (bei zwei Ausreißern: Patienten 25,33) im Seitenvergleich Temperaturdifferenzen unterhalb  $1^{\circ}\text{C}$  (siehe Tabelle). Der durchschnittliche Temperaturunterschied im Seitenvergleich beider Fußrückeninnenkonturen liegt bei unterhalb  $1^{\circ}\text{C}$ .

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft typische Originalbefunde zur präoperativen Temperaturverteilung an der unteren Extremität im Seitenvergleich. Linksseitig befindet sich die Skalierung des Messbereiches als farbkodierte Legende in Grad Celsius.

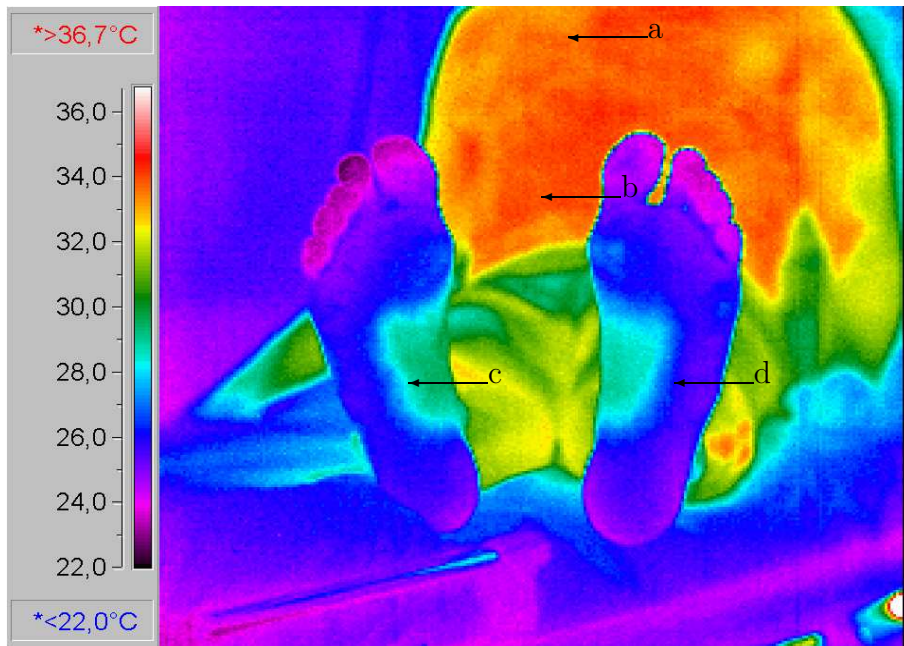


Abbildung 4.1: Thermogramm: Patient Nr. 29, Patient in Rückenlage, präoperativ. Fokus: Fußsohlen. Geringfügige Anisothermien liegen unterhalb der zweifachen Standardabweichung (s. Endphalanx II. Strahl). Weiterhin im Bild erkennbar: a) Rechter Thorax, b) Rechtes Abdomen, c) Rechte Fußsohle, d) Linke Fußsohle.

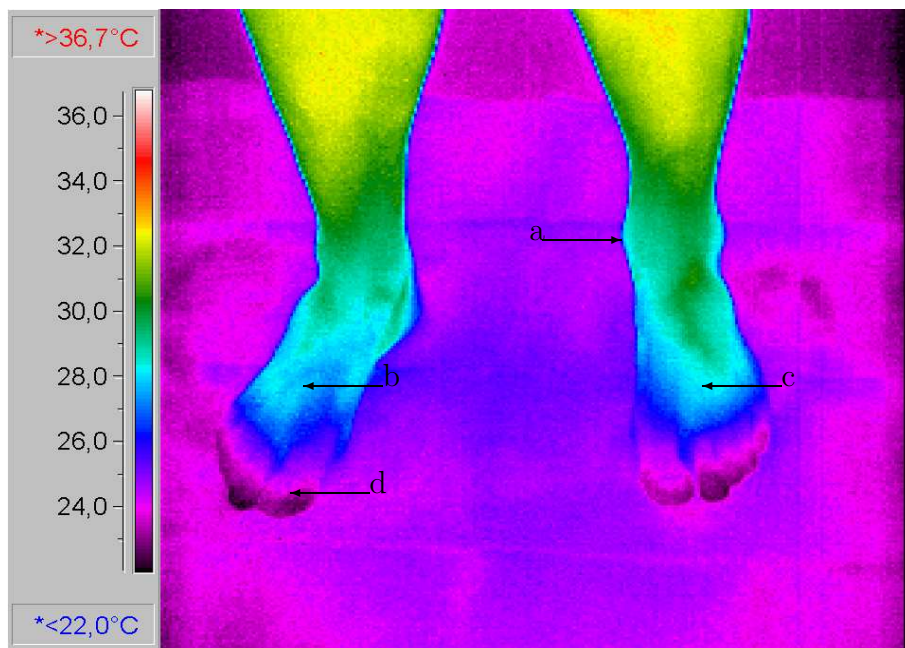


Abbildung 4.2: Thermogramm: Patient Nr. 29, Patient stehend, präoperativ. Fokus: Fußrücken. Unauffälliger Befund. Geringfügige Anisothermien unterhalb der zweifachen Standardabweichung (s. Endphalanx I. Strahl). Abbildungsperspektive von venral-oben (flächenparallel zur Fußrückenebene). a) Linker Innenknöchel, b) Fußrücken (Rechter Vorfuß), c) Fußrücken (Linker Vorfuß), d) Rechte Großzehe.

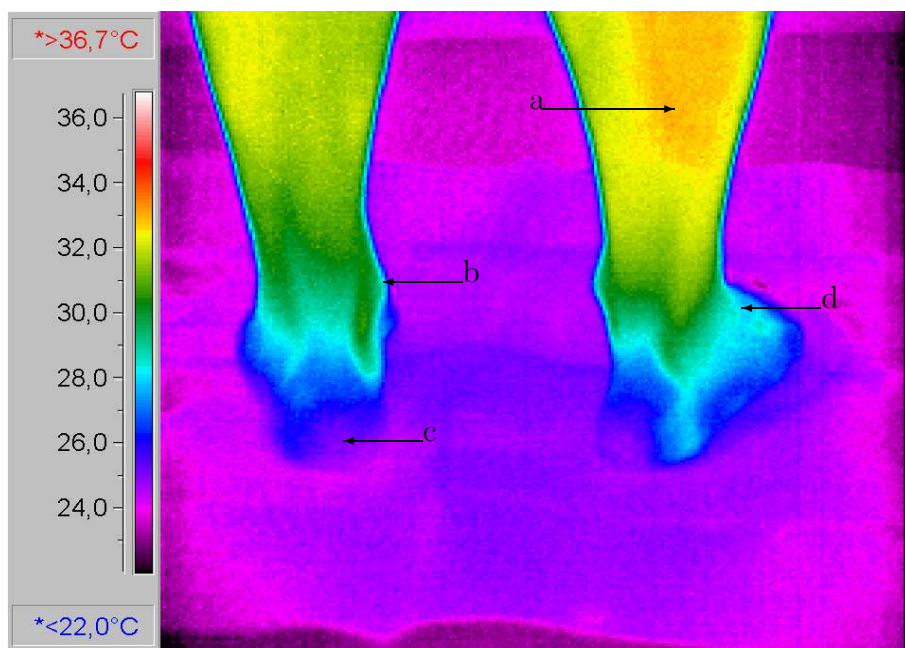


Abbildung 4.3: Patient Nr. 29, Patient stehend, präoperativ. Fokus: Ferse. Lokale Hyperthermie des rechten Fußes dorsolateral. Abbildungsperspektive von dorsal. a) Rechter Unterschenkel, b) Linker Innenknöchel, c) Linke Ferse (dorsal), d) Rechter Fußrücken.

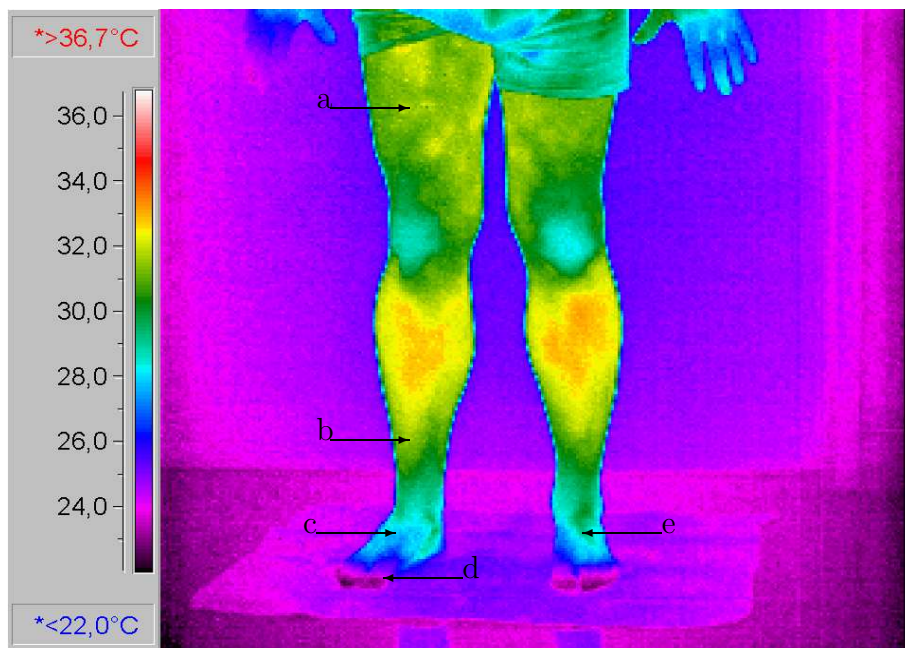


Abbildung 4.4: Thermogramm: Patient Nr. 29, Patient stehend, präoperativ. Fokus: Untere Extremität. Unauffälliger Befund. Abbildungsperspektive von ventral. a) Rechter Oberschenkel, b) Rechter Unterschenkel, c) Rechter Vorfuß (Fußrücken), d) Rechte Großzehe, e) Linker Vorfuß (Fußrücken).



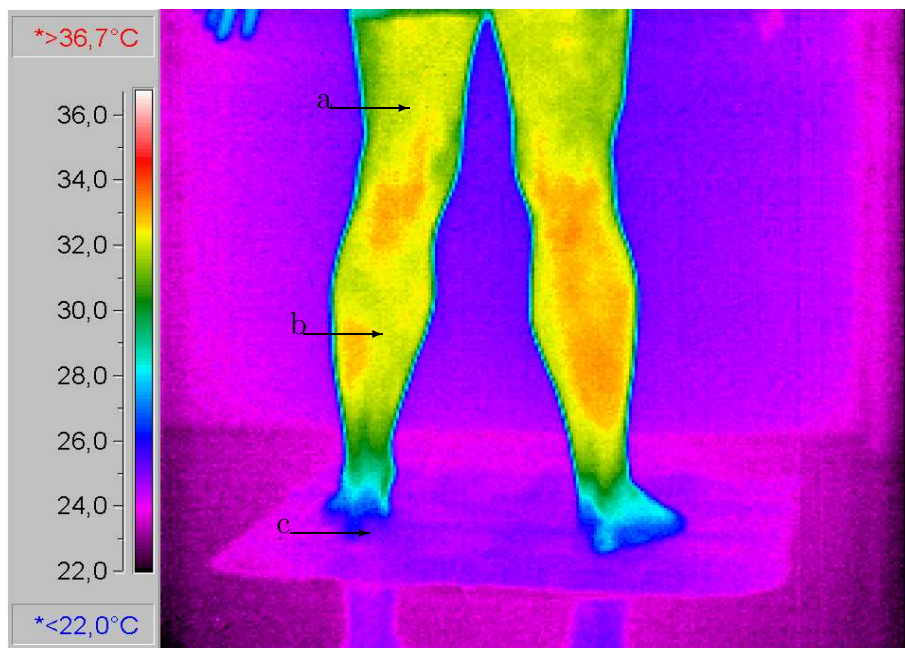


Abbildung 4.5: Patient Nr. 29, Patient stehend, präoperativ. Fokus: Unterschenkel. Regionale Anisothermien liegen auch hier unterhalb  $1^{\circ}\text{C}$ . Unauffälliger Befund. Abbildungsperspektive von dorsal. a) Linker Oberschenkel b) Linker Unterschenkel c) Linke Ferse.



## 4.4 Intraoperatives Monitoring

### 4.4.1 Allgemeines

In der vorgelegten Untersuchung kann gezeigt werden, dass bei einer Patientengruppe nach im vorderen Zugang durchgeführter Wirbelsäulenoperation Veränderungen der Sympathikusaktivität nachweisbar sind. Durch thermographiegestütztes Sympathikusmonitoring wurde die Temperaturentwicklung an der Fußsohle während des gesamten OP-Verlaufes in Echtzeitübertragung verfolgt. Ein ereignisbezogenes Temperaturprotokoll wurde geführt. Dokumentierte Temperaturentwicklungen wurden hinsichtlich der unmittelbar vorausgegangenen Operationsschritte diskutiert und kausal benannt.

Es wurde bewußt auf Temperaturangaben verzichtet, da die Temperaturentwicklung intraoperativ als sich im Fluss befindlich zu betrachten ist, unterschiedliche Ereignisse überlagern sich zusätzlich additiv oder subtraktiv. Alle Angaben bezüglich intraoperativer Temperaturentwicklung sind als Trendantwort auf den jeweils beschriebenen Reiz zu verstehen. Es wurden zehn Patienten intraoperativ thermographiert.

### 4.4.2 Intraoperativ thermographisch untersuchte Patienten (Untersuchungsgruppe 6)

Nr.	Diagnose	Etage	OP-Verfahren	Etage
22	Degen. Instabilität mit Lumbalstenose	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Laminektomie, d/v-Fusion	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
23	Osteochondrose	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
24	Degen. Spondylolisthese mit Spinalkanalstenose	L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub>	Dekompression, d/v-Fusion	L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub> L <sub>3</sub> -L <sub>4</sub>
25	Degen. Spondylolisthese mit Spinalkanalstenose	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	Laminektomie d/v-Fusion	L <sub>4</sub> L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>
29	Degen. Lumbalsyndrom	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>

Tabelle 3.4.2: Intraoperativ thermographisch untersuchte Patienten

Nr.	Diagnose	Etage	OP-Verfahren	Etage
30	Posttraum. R-konvexe Lumbalskoliose		VDS	Th <sub>12</sub> -L <sub>4</sub>
34	Spondylolisthese	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub> L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
35	Spondylodiszitis	L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	Abszessaus- räumung, d/v-Fusion	L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>
37	Spondylolisthese	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>
41	Spondylolisthese	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	d/v-Fusion	L <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>

Tabelle 3.4.2: Intraoperativ thermographisch untersuchte Patienten

### 4.4.3 Resultate intraoperativer Überwachung

Folgende Ereignisse sind intraoperativ aufgetreten:

1. Hautschnitt: Während der Hautdurchtrennung zeigte sich bei sieben der zehn Patienten (Patienten Nr. 22, 24, 25, 30, 34, 37, 41) das Auftreten einer Hyperthermie kontralateral zur operierten Seite, zwei davon (Patienten Nr. 37, 41) zusätzlich eine Hypothermie ipsilateral (Umverteilungsphänomen, vgl. S. 65). Zwei Patienten (Patienten Nr. 29, 35) zeigten hier keine thermographisch relevante Reaktion und einer (Patient Nr. 23) reagierte mit kontralateraler Abkühlung.
2. Bauchblasenpräparation: Während der Bauchblasenpräparation setzt sich die Temperaturentwicklung fort, die schon während der Hautinzision sichtbar war. Alle Patienten folgten diesem Trend. Jedoch im Verlauf einer Peritonealverletzung und auch während des Nähens setzte bei einem Patienten (Patient Nr. 34) eine deutliche Hyperthermie ipsilateral ein. Ein Patient zeigte während dieser Phase ein inverses Umverteilungsphänomen mit ipsilateraler Abkühlung und kontralateraler Erwärmung (Patient Nr. 34).
3. Wirbelkörperaffektion: Bei mechanischen Affektionen im Wirbelkörperbereich zeigte sich in sechs Fällen (Patienten Nr. 23, 24, 25, 29, 30, 35, 37) eine operationsseitige Abkühlung. Hierzu gehören Bandscheibenpräparation sowie -inzision, Grund- und Deckplattenresektion, Spineinschlag.

4. Grenzstrangmanipulation: Das mechanische Ereignis der Grenzstrangpräparation resultierte überwiegend in einer Hyperthermie gleichseitig zum Operationssitus (Patienten Nr. 23, 24, 25, 30, 34, 41). Bei Grenzstrangdehnung (Verlagerung aus dem unmittelbaren OP-Gebiet) zeigte sich eine ipsilaterale Abkühlung (Patient Nr. 30).
5. Kochsalzspülung: Durch Spülung des OP-Feldes mit physiologischer Kochsalzlösung konnte ipsilateral ein deutlicher und plötzlicher Temperatursprung nach oben verzeichnet werden (Patienten Nr. 23, 25, 30). Zur Verifizierung der Kochsalzlösung als kausales Ereignis und zum Ausschluss eines kalorischen Effektes durch nicht-physiologische Spülungstemperaturen wurde alternativ auch mit Glukose- und Stärkelösung bei unterschiedlichen Temperaturen (Kühlschrank [ $7^{\circ}\text{C}$ ], erwärmt [ $20^{\circ}\text{C}$ ], und annähernde Körpertemperatur [ $36^{\circ}\text{C}$ ] gespült (vgl. S. 24). Keine der Kontroll-Lösungen vermochte eine Temperaturänderung zu bewirken.
6. Gefäßverletzung: Die Verletzung der linken V. iliaca communis in einem Fall (Patient Nr. 41) bei rechtsseitiger Operation resultierte in einer rechtsseitigen Hyperthermie, innerhalb kürzester Zeit mit Beginn der Gefäßnaht (ca. eine Stunde Dauer) entwickelte sich eine Hyperthermie linksseitig und damit kontralateral zum Operationssitus (rechts).
7. Fasziennaht: Kontralaterale Entwicklung einer Hyperthermie trat bei acht Patienten (Patienten Nr. 22, 23, 25, 29, 30, 34, 35, 41) auf. Keine aktuelle Temperaturänderung bei etwa seitengleicher Temperatur war bei zwei Patienten festzustellen (Patienten Nr. 24, 37).
8. Hautnaht: Keine aktuelle Änderung der Temperaturentwicklung. Es wurde der Trend, der während der Fasziennaht bestand, fortgesetzt. Operationsseitige Hypo-, Hyper- und Isothermien werden zum Zeitpunkt der Hautnaht beobachtet.

So kann als Ergebnis festgehalten werden, dass jeweils in unmittelbarer Folge Temperaturveränderungen auftreten, wenn der Grenzstrang oder von ihm innervertierte Organe unterschiedlicher Manipulation ausgesetzt werden.

#### 4.4.4 Intraoperative Thermogramme

Beispielhaft wird im folgenden eine Bildserie typischer Originalbefunde vorgestellt, die einen Untersuchungsablauf in charakteristischer Weise wiedergibt.

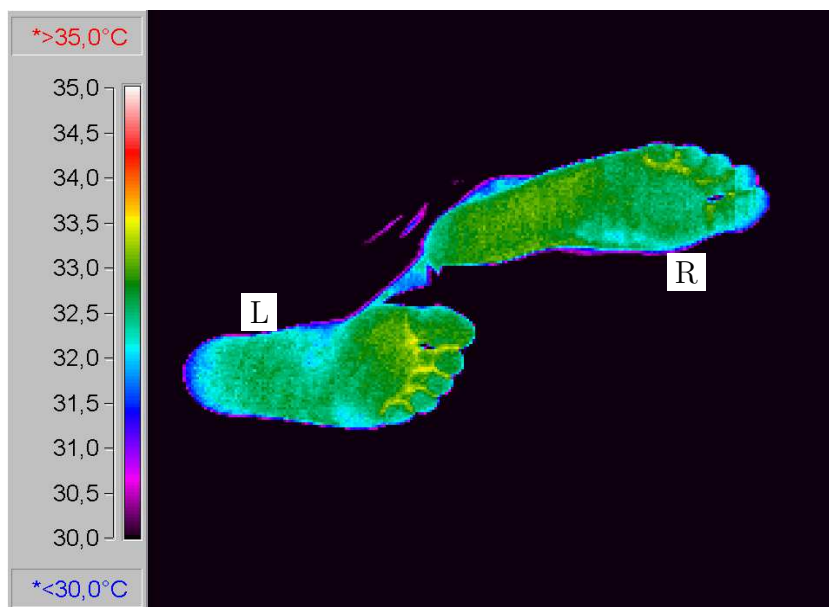


Abbildung 4.6: Patient Nr. 30. Ansicht auf beide Fußsohlen am Patienten in Links-Seitenlage. Linker Fuß des Patienten erscheint im Bild links unten. Post-traumatische Lumbalskoliose, seit 18 Monaten Belastungsschmerz, terminal auch Ruhebeschwerden. Operationverfahren: Ventrale Derotationsspondylodese Th<sub>12</sub>-L<sub>4</sub>. Zugang von rechts-retroperitoneal. Unmittelbar vor Hautschnitt.  $\Delta T$  der Fußsohleninnenkontur:  $0.1^{\circ}\text{C}$  (rechts wärmer). L) Linke Fußsohle, R) Rechte Fußsohle.

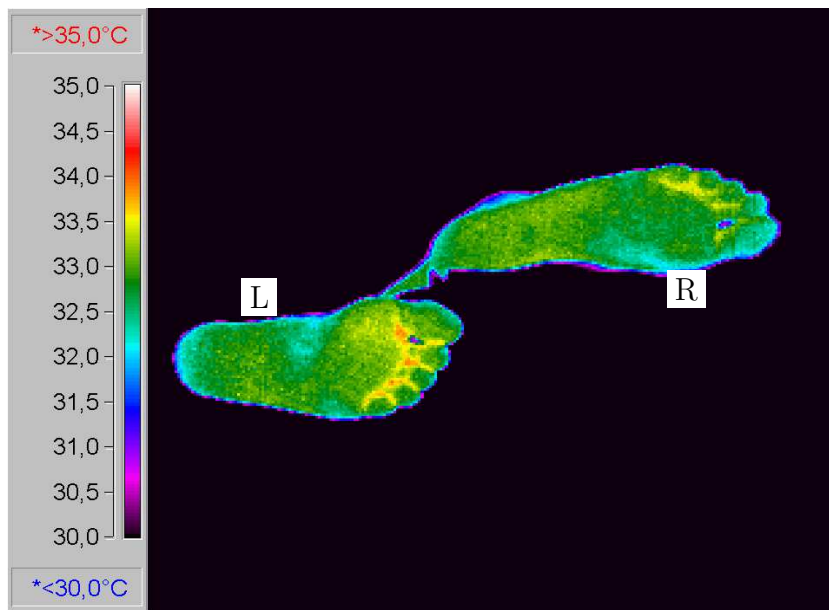


Abbildung 4.7: Nach Hautschnitt. Entwicklung einer Hyperthermie, kontralateral zur Zugangsseite (links) stärker als ipsilateral.

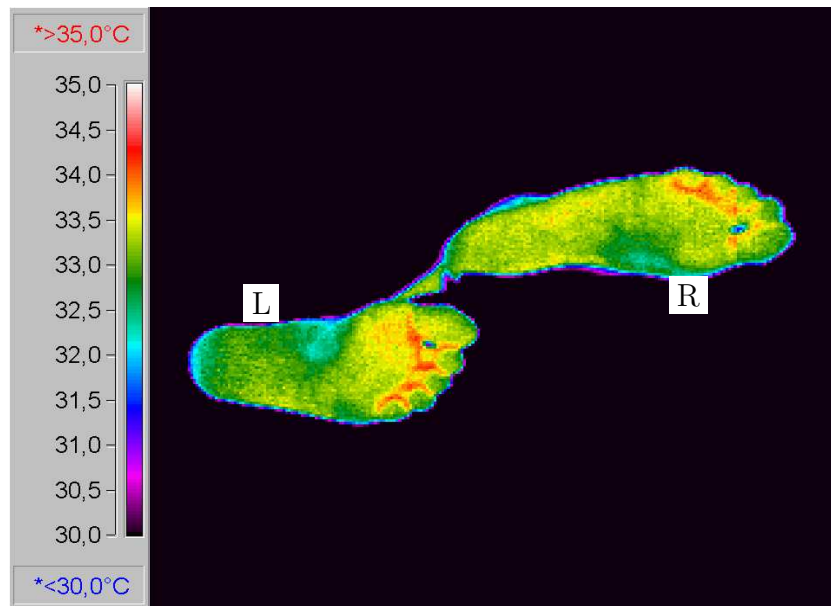


Abbildung 4.8: Thermogramm unmittelbar vor Spülungsschema mit Glukoselösung.

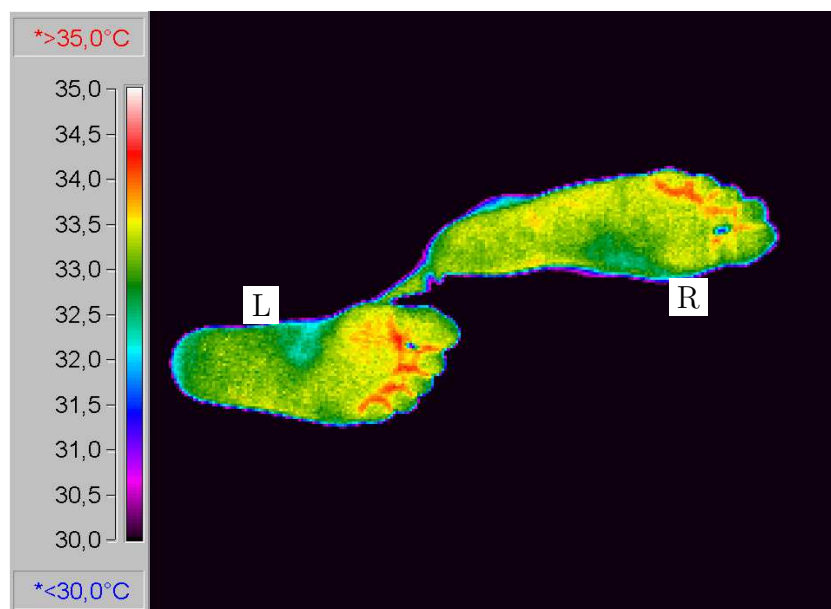


Abbildung 4.9: Thermogramm unmittelbar nach Spülungsschema mit Glukoselösung. Keine nennenswerte Entwicklung.

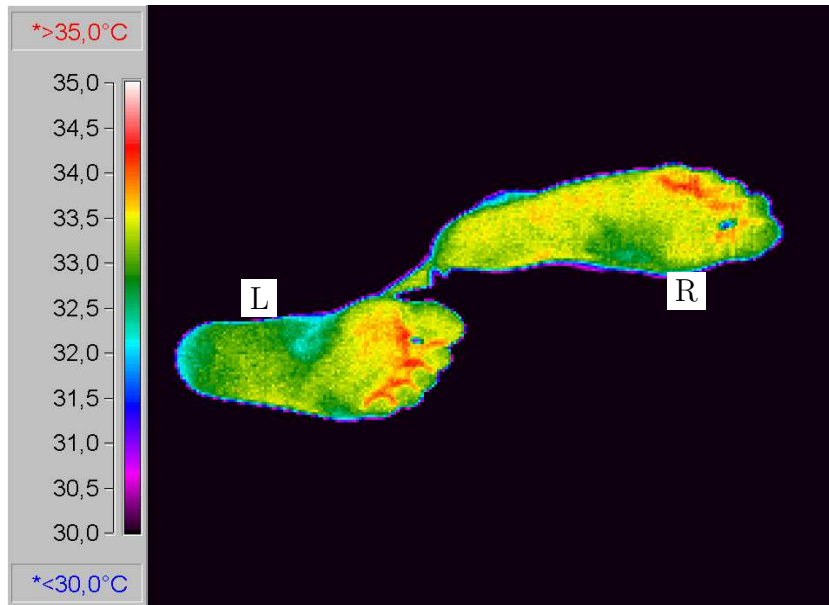


Abbildung 4.10: Thermogramm nach Spülung mit Hydroxyethylstärke-Schema. Keine Veränderung.

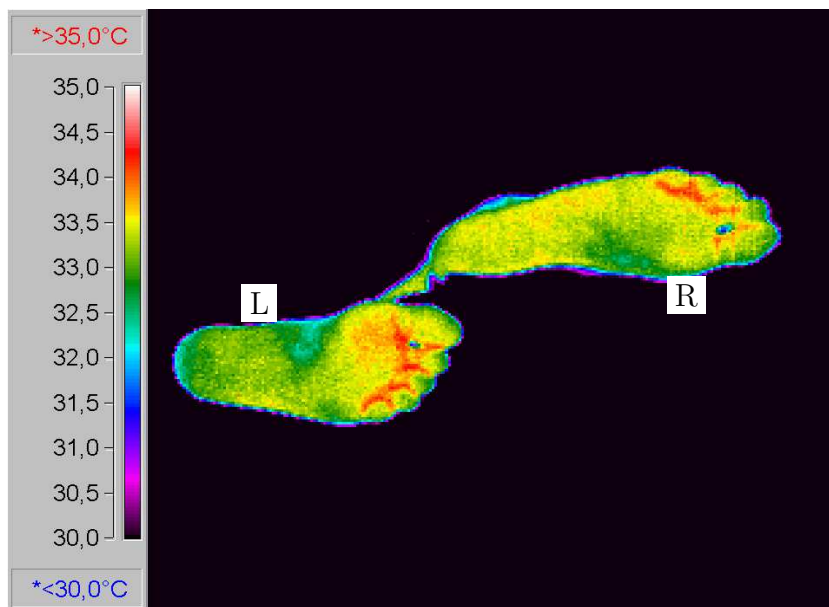


Abbildung 4.11: Thermogramm nach Spülung mit Ringer-Schema (enthält *NaCl*), Grenzstrang noch unter wenigen Lagen Bindegewebssepten verborgen. Keine Reaktion.

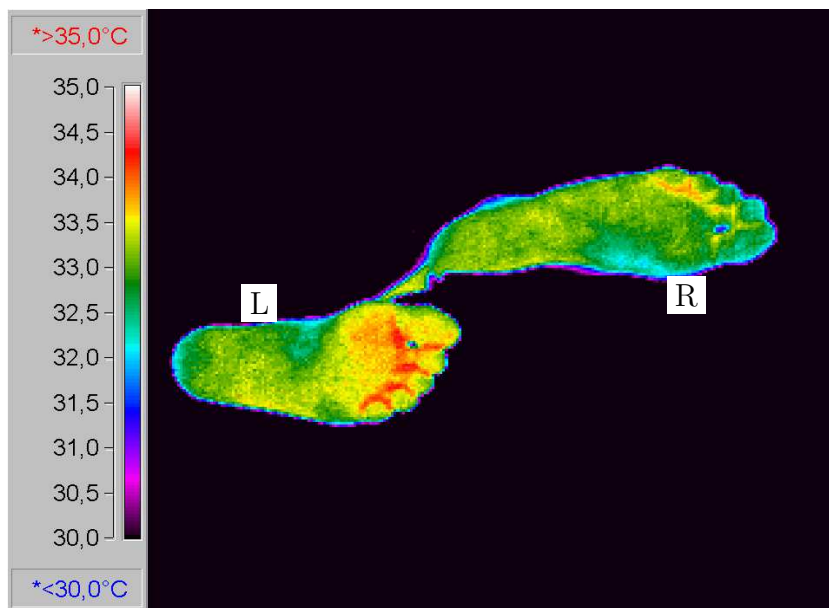


Abbildung 4.12: Nach Grenzstrangmanipulation (Dehnung). Ipsilaterale Hypothermie.

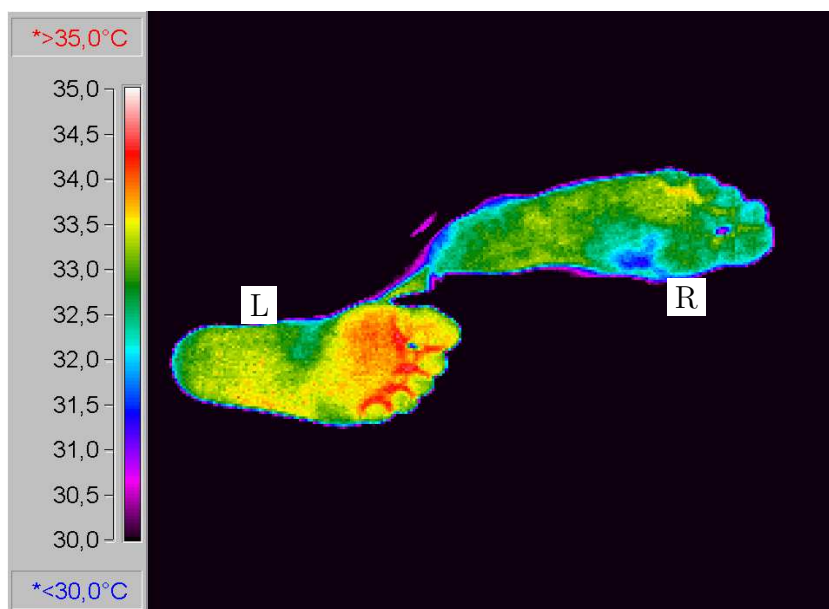


Abbildung 4.13: Weitere Dehnung des Grenzstranges. Ipsilaterale Hypothermie.



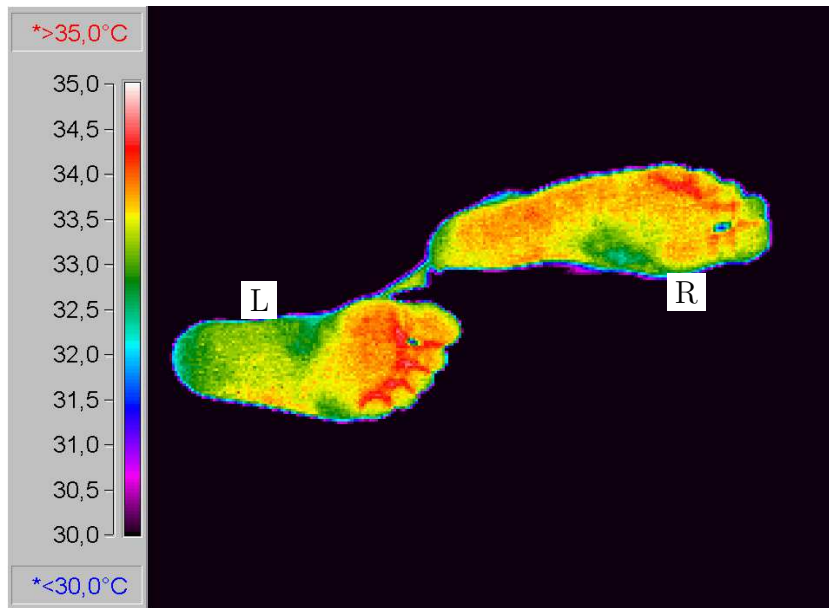


Abbildung 4.14: Komplette Freilegung des Grenzstrang. Thermogramm nach erneuter Spülung mit Ringer-Schema (enthält  $\text{NaCl}$ ). Jetzt Entwicklung einer Hyperthermie operationsseitig.

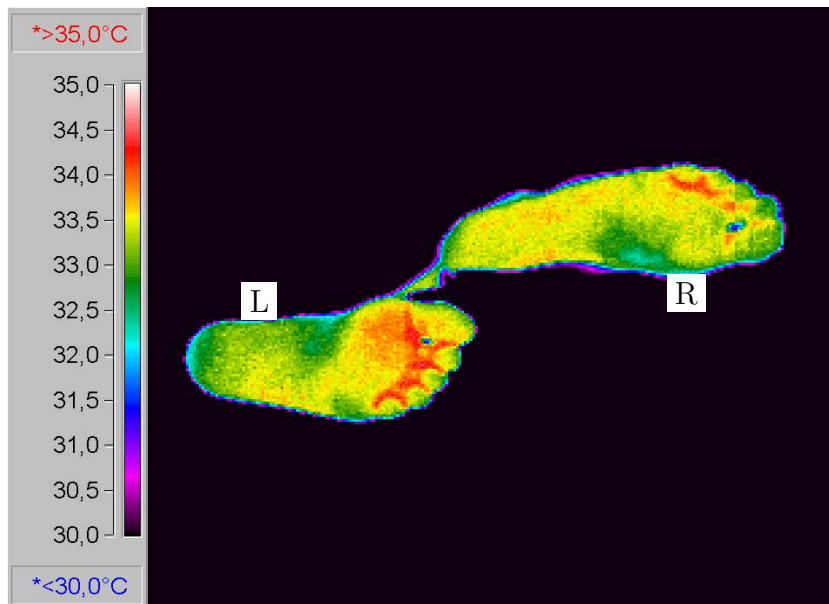


Abbildung 4.15: Einschlagen eines Loches zur Einbringung der Ankerschrauben in den Wirbelkörper. Ipsilaterale Abkühlung.

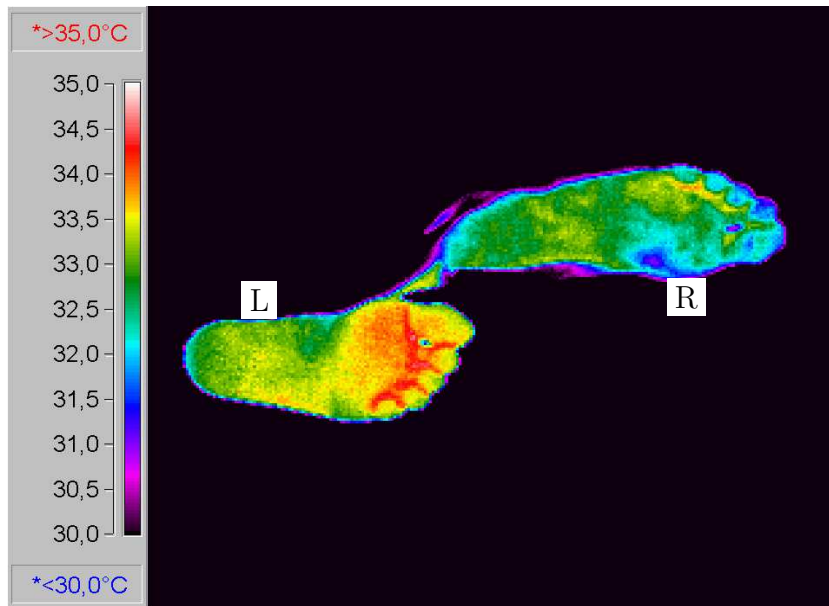


Abbildung 4.16: Kirschnerdraht in schmerzhafte Bandscheibe gestochen. Ipsilaterale Hypothermie (rechts).

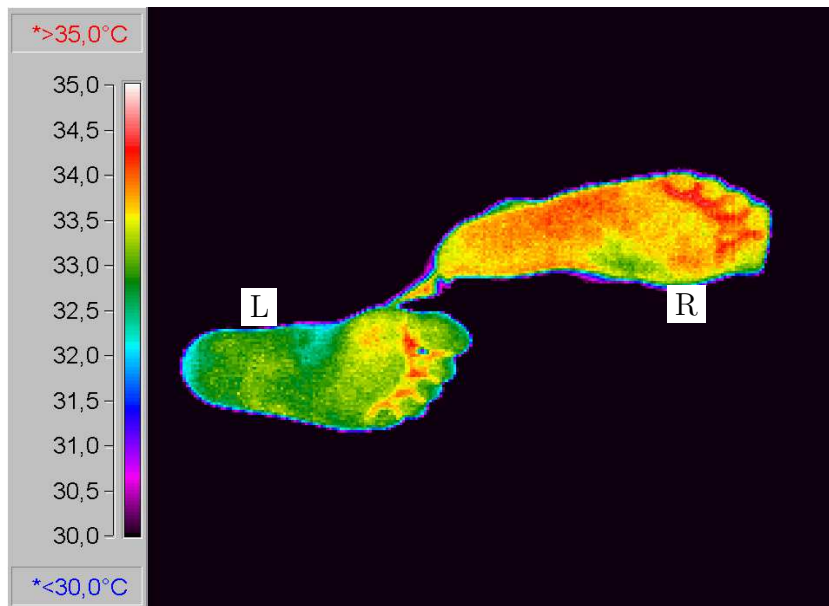


Abbildung 4.17: Nach Spülung mit physiologischer *NaCl*-Lösung. Rechtsseitiger Temperatursprung (Hyperthermie).

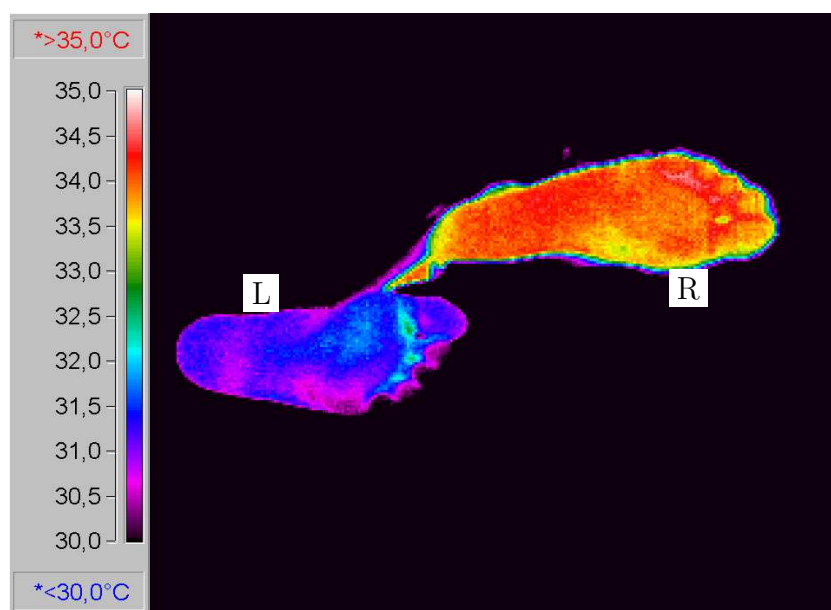


Abbildung 4.18: Thermogramm unmittelbar nach Hautverschluss: Operationsseitige Hyperthermie und kontralaterale Hypothermie i. S. e. Borrow-Lending-Phänomens (vgl. S. 63,64).

## 4.5 Postoperative Thermogramme

In den Untersuchungsgruppen 1, 2 und 4 zeigen alle Patienten auffällige Befunde, das heißt thermographische Seitendifferenzen oberhalb  $1^{\circ}\text{C}$ . Als pathologisch wird vereinbarungsgemäß ein Temperaturunterschied oberhalb  $1^{\circ}\text{C}$  entsprechend zweifacher Standardabweichung gewertet [101, 102, 103]. Die durchschnittliche thermographische Seitendifferenz in den Untersuchungsgruppen 1, 2 und 4 bezüglich der integrierten Fußrückeninnenkontur liegt bei  $4,4^{\circ}\text{C}$ ,  $2,5^{\circ}\text{C}$  bzw. bei  $2,7^{\circ}\text{C}$ . Das Intervall der postoperativen Thermographie beträgt durchschnittlich 11 Tage. Ein zeitlich regelmäßiger postoperativer Untersuchungstermin war klinisch nicht herstellbar, hierzu s.u. sowie im Kapitel Limitationen.

In allen Fällen, in denen der Zugang einseitig (also nur von links oder nur von rechts) vorgenommen wurde und das Krankheitsgeschehen nicht zwingend den perivertebralen Raum beidseits ventral der Wirbelkörper involvierte, zeigte sich postoperativ eine zum Operationssitus ipsilateral hypertherme untere Extremität. Waren beide Seiten von pathologischen oder operativen Prozessen betroffen, zeigte sich in allen Fällen ein beidseits hyperthermes postoperatives Thermogramm. Fuß- und Zehenbereich zeigten die Seitenunterschiede am deutlichsten. Zeitpunkt der postoperativen Untersuchung war der mobilitätsbedingt frühestmögliche nach dem Eingriff. Durchschnittlich war dies am 11. Tag (minimal 3 Tage, maximal 33 Tage) postoperativ der Fall.

Die folgenden Abbildungen zeigen anhand typischer Originalbefunde die Situation postoperativer Temperaturverteilung an der unteren Extremität im Seitenvergleich. Linksseitig befindet sich die Skalierung des Messbereiches als farb-kodierte Legende in Grad Celsius.

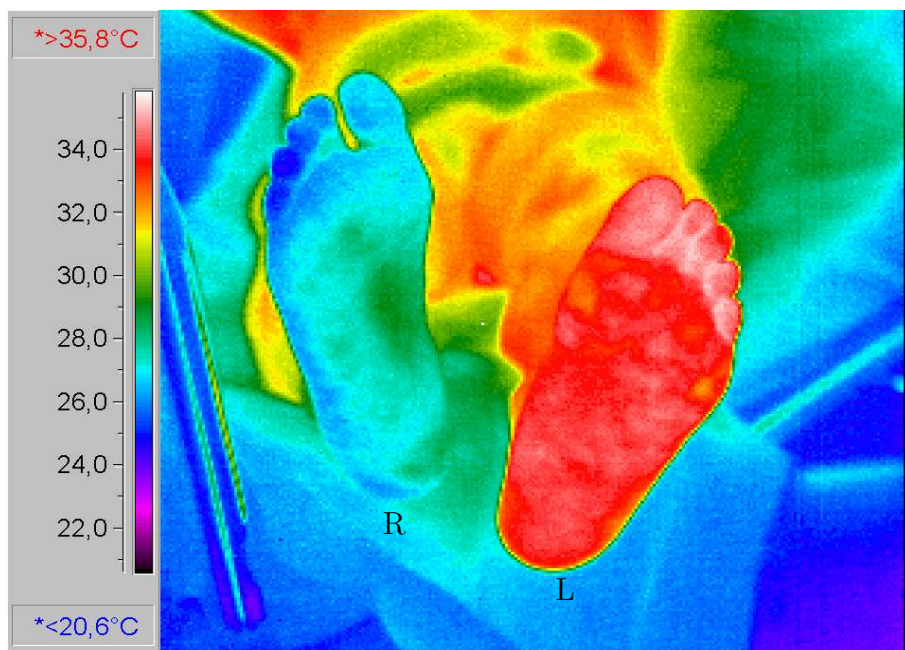


Abbildung 4.19: Patient Nr. 21, Patient in Rückenlage, postoperativ. Z.n. ventraler Spondylodese L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>. Fokus: Fußsohle. Deutliche Hyperthermie linksseitig. Abbildungsperspektive von kaudal auf beide Fußsohlen am Patienten in Rückenlage.

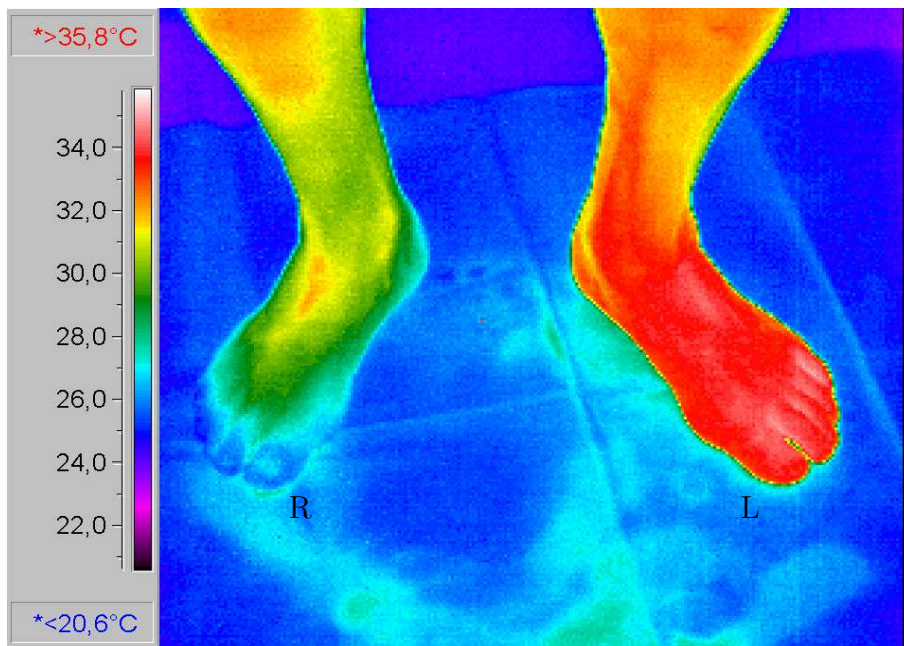


Abbildung 4.20: Patient Nr. 21, Patient stehend, postoperativ. Fokus: Fußrücken. Deutliche Hyperthermie linksseitig. Abbildungsperspektive von vorne-oben.

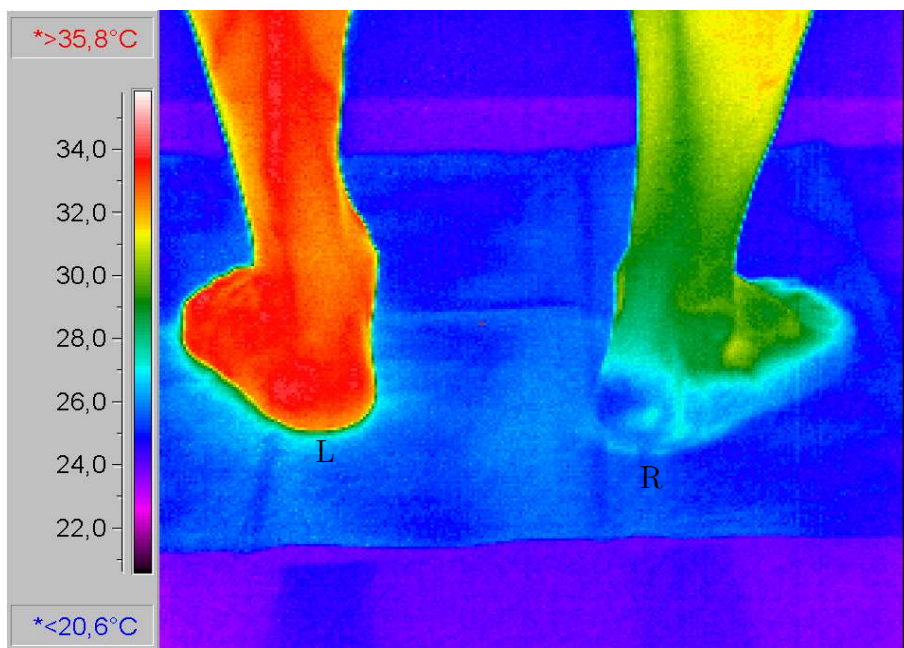


Abbildung 4.21: Patient Nr. 21, Patient stehend, postoperativ. Fokus: Ferse. Deutliche Hyperthermie linksseitig. Abbildungsperspektive von dorsal.



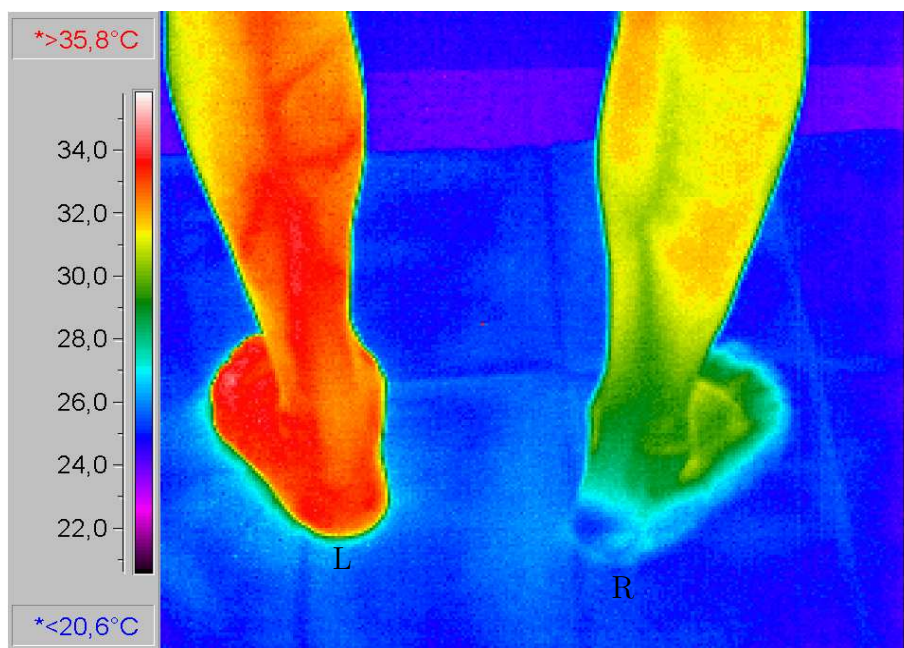


Abbildung 4.22: Patient Nr. 21, Patient stehend, postoperativ. Fokus: Unterschenkel. Deutliche Hyperthermie linksseitig. Abbildungsperspektive von dorsal.

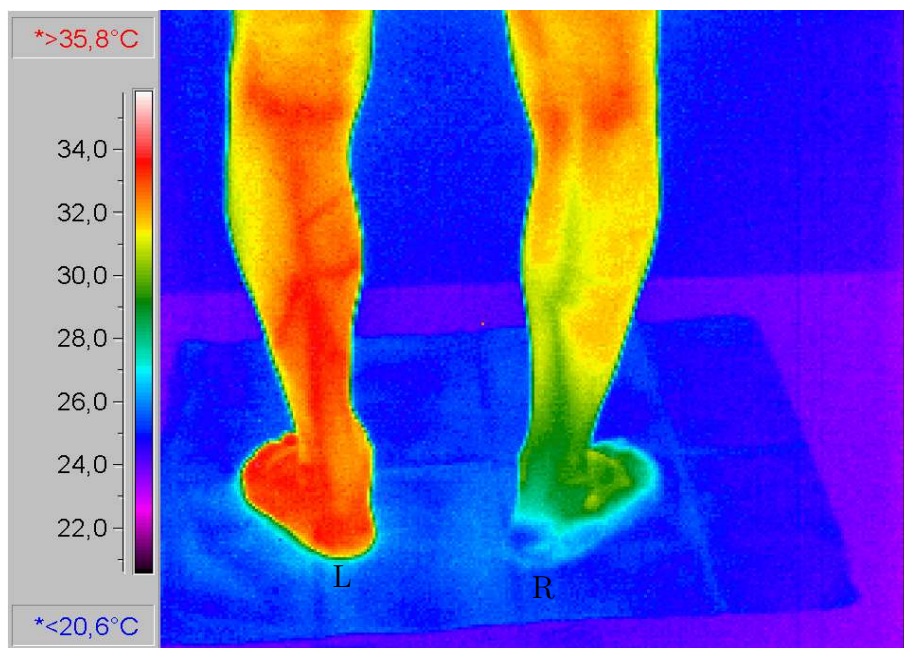


Abbildung 4.23: Patient Nr. 21, Patient stehend, postoperativ. Fokus: Untere Extremität. Deutliche Hyperthermie linksseitig. Regionale Anisothermie-Straßen von unbekannter Ursache; möglicherweise artefakt- oder anatomisch-funktionell bedingt. Abbildungsperspektive von dorsal.



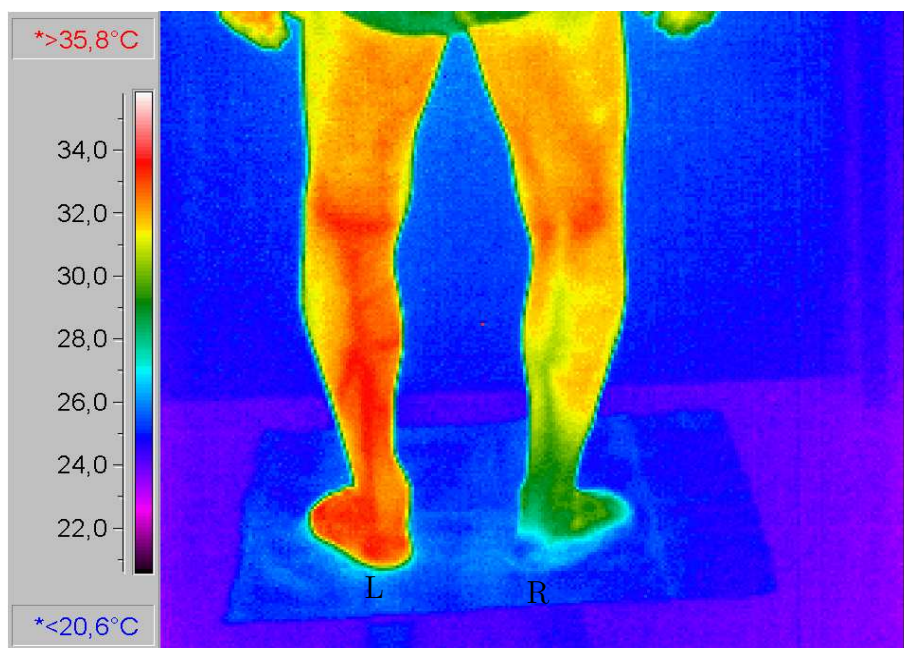


Abbildung 4.24: Patient Nr. 21, Patient stehend, postoperativ. Fokus: Oberschenkel. Oberschenkel unauffällig. Abbildungsperspektive von dorsal.

## 4.6 Vorstellung statistischer Ergebnisse

### 4.6.1 Graphische Darstellung der statistischen Analyse

Im folgenden wird eine Auswahl an Graphiken mit typischen Ergebnissen aus U-Test-Analysen vorgestellt (Abbildungen 4.25-4.30; identisch mit [Anhang:] Abbildungen M1-M4, M6-M7 ). Eine vollständige Liste der Ergebnisse findet sich im Anhang (Abbildungen M1-M60).

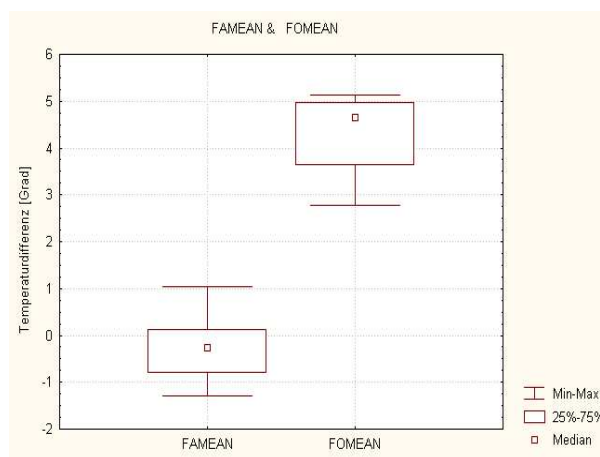


Abbildung 4.25: Diagnose 1 (Etage  $L_4$ - $L_5$ ): Temperaturdifferenz (gemittelte Flächentemperatur der Fußrückeninnenfläche, MW aus drei manuellen Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts).  $N=6$ ,  $T=0$ ,  $Z=2,201$ ,  $p=0,028$

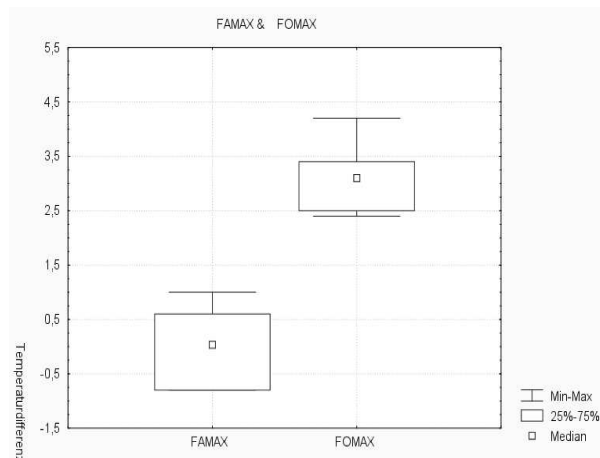


Abbildung 4.26: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Temperaturdifferenz (Maximaltemperatur der Fußrückeninnenfläche, MW aus drei Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

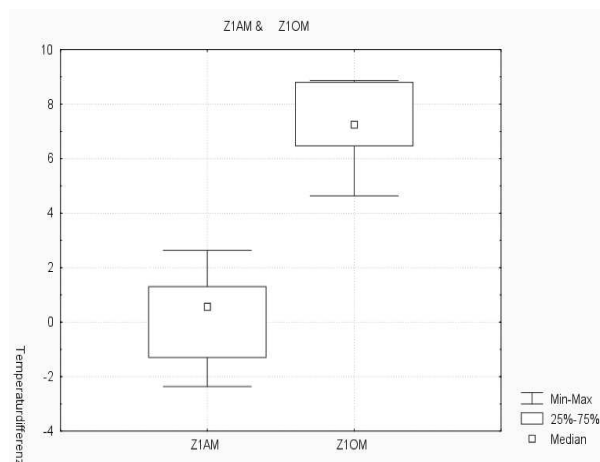


Abbildung 4.27: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 1 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus drei Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

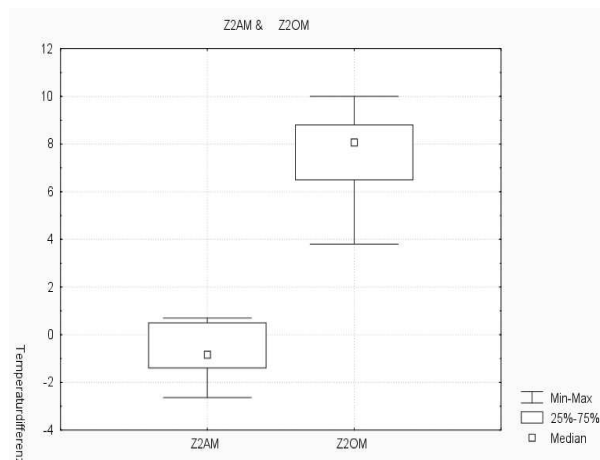


Abbildung 4.28: Diagnose 1 (Etage  $L_4-L_5$ ): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 2 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus drei Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts).  $N=6$ ,  $T=0$ ,  $Z=2,201$ ,  $p=0,028$

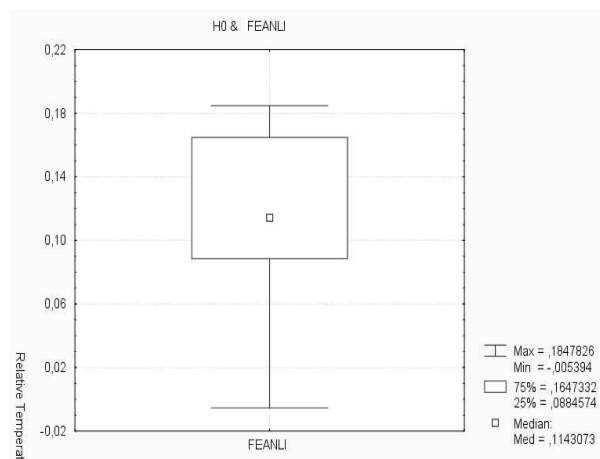


Abbildung 4.29: Diagnose 1 (Etage  $L_4-L_5$ ): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus drei manuellen Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  (hier: Median bei 12% z.B. von  $20^\circ C=2,4^\circ C$  absolute Temperaturdifferenz).  $N=6$ ,  $T=1$ ,  $Z=1,992$ ,  $p=0,046$

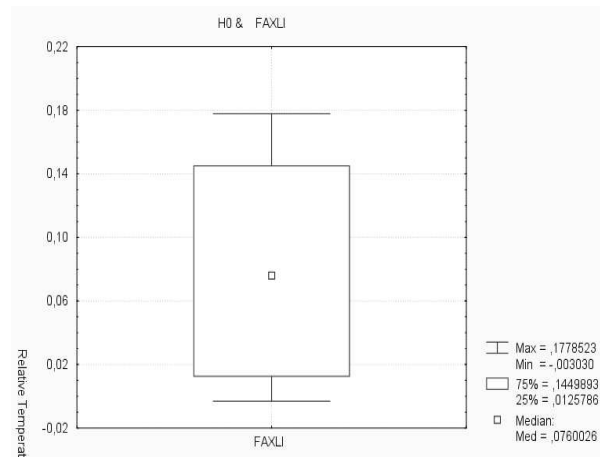


Abbildung 4.30: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, Maximalwert aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  (hier: Median bei 7,5% z.B. von  $20^\circ\text{C}=1,5^\circ\text{C}$  absolute Temperaturdifferenz).  $N=6$ ,  $T=1$ ,  $Z=1,992$ ,  $p=0,046$

## 4.6.2 Beschreibung der statistischen Ergebnisse

### Diagnosegruppe 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>)

Signifikante Temperaturdifferenzen ( $p < 0,05$ ) ergibt der U-Test beim Vergleich der Fußrückeninnenkontur in der Diagnosegruppe 1. Dies gilt sowohl bei Betrachtung des gemittelten Flächenwertes (Abbildung 4.25) als auch bei Zugrundelegen der Maximaltemperatur (Abbildung 4.26). Auch Zehen 1 und 2 sowie der Fersenvergleich zeigen in dieser Gruppe signifikante Werte (Abbildungen 4.27, 4.28). Zehen und Fersen erweisen sich jedoch als weniger zuverlässiger Wert verglichen mit der Fußrückeninnenkontur. Die relativen Temperaturdifferenzen für den prä-versus postoperativen Vergleich ergeben sich erwartungsgemäß für die operierte Seite (hier alle als links bezeichnet) signifikante Werte (Abbildungen Anhang M6-M10), für die nichtoperierte Seite (hier alle als rechts bezeichnet) nichtsignifikante Werte (Abbildungen Anhang M11-M14). Der Wert für die Betrachtung der Ferse ist entgegen der Erwartung knapp signifikant. Der Vergleich zwischen rechtem und linkem Bein präoperativ versus postoperativ eine Summenerwärmung oder Summenabkühlung repräsentieren. Die Diagnosegruppe 1 zeigt eine postoperative Summenerwärmung bei thermaler Seitendifferenz unterhalb des Signifikanzniveaus (Abbildungen Anhang M16-M20).

### Diagnosegruppe 2+3 (Etagen L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>)

In der Diagnosegruppe 2+3 ergeben sich insgesamt nichtsignifikante Werte für den Seitenvergleich von Fußrückeninnenfläche, sowie Zehen und Ferse postoperativ (Abbildungen Anhang M21-M25). Nähere Betrachtung zeigt, dass gleich häufig signifikante (oberhalb 1 Grad C und nicht signifikante (relative Isothermie unterhalb 1 Grad C)) Werte vorkommen und in der Summe einen nichtsignifikanten Wert ergeben (vgl. S. 30, S. 74). Die relativen Temperaturdifferenzen in dieser Gruppe zeigen für die linke Seite signifikante Werte (Abbildungen Anhang M26, M28-M30) mit einem Ausreißer (Abbildung Anhang M27), der knapp unterhalb einer Signifikanz liegt. Relative Temperaturdifferenzen für die rechte Seite sind zum Teil signifikant (Abbildungen Anhang M31, M32) und zum Teil nicht signifikant (Abbildungen Anhang M33-L34).

### Diagnosegruppe 4 (Fusionen bei unilateralem Zugang in unterschiedlichen Etagen)

Auch bei Zugängen auf anderen Etagen lassen sich postoperativ thermale Seitendifferenzen der unteren Extremität zeigen (vgl. S. 31), die oberhalb der Signifikanzgrenze von 1 Grad C liegen. Da nur wenige vergleichbare Fälle vorliegen, sind diese Ergebnisse einer mathematischen Exploration sinnvollerweise nicht zugänglich.

### Diagnosegruppe 5 (Fusionen mit perivertebralem [beidseitigem] Geschehen)

In der Diagnosegruppe 5 zeigt sich erwartungsgemäß bei Durchführung eines U-Tests unabhängig der Variablen generalisiert ein nicht signifikantes Ergebnis (Abbildungen Anhang M41-M60).

## 4.7 Umverteilungsphänomen (Borrow-Lending)

Bei Betrachtung der unteren Extremitäten seitengesondert prä- versus postoperativ (mit Trendvergleich der Seitenveränderungen) lassen sich unterschiedliche Resultate feststellen:

1. Positives Umverteilungsphänomen: Die operierte Seite zeigt eine Hyperthermie, die nichtoperierte zeigt eine Hypothermie (Patienten Nr. 2, 6, 11, 17, 24, 25, 33).
2. Fehlendes Umverteilungsphänomen: Beide Seiten zeigen eine Hyperthermie, die operierte jedoch in größerem Ausmaß (Patienten Nr. 8, 9, 10, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 29, 30, 34, 37)

3. Fehlende Beurteilbarkeit wegen fehlender präoperativer Datenerfassung (Notfallkohorte, Patienten Nr. 1, 3, 4, 5, 7, 13, 19, 35, 41)
4. Inverses Umerteilungsphänomen: Die operierte Seite kühlt ab, die nichtoperierte Seite zeigt eine Temperaturerhöhung
5. Beidseitige Abkühlung (Patienten Nr. 26, 27)

Eine ausführliche Besprechung des Borrow-Lendings oder Umverteilungsphänomens findet sich im Diskussionsteil (vgl. S. [63](#)).

# Kapitel 5

## Diskussion

### 5.1 Einleitung

Ventrale Operationsverfahren in der Orthopädie als Therapieform bei progredienten motorischen Ausfallsyndromen sowie beim therapieresistenten chronischen Rückenschmerz sind seit Jahren etabliert. Vordere Spondylodeseverfahren, allen voran die anteriore lumbale interkorporelle Fusion (ALIF) sind dabei als adäquate Therapieform zu nennen. Die ALIF hat in der Therapie des resistenten chronischen Rückenschmerzes infolge degenerativer Instabilität einen hohen Stellenwert erreicht [74, 96]. Wie bei jedem Therapieverfahren gilt auch bei diesem, dass der operative Erfolg mit der Folge möglicher Nebenwirkungen erkauft wird. Zur Erfassung und Quantifizierung eines Teils dieser Nebenwirkungen hat sich die Infrarot-Telethermographie als ein ausgezeichnetes Untersuchungsverfahren erwiesen.

Durch die Operation potentiell betroffene sympathische Funktionen im Bereich L<sub>2</sub>-S<sub>1</sub> des lumbalen Grenzstranges sind die sympathische Hautinnervation und die Fortpflanzungsfunktion des Mannes [67, 88, 92, 108]. Gefäßweite, Piloreaktion, Schweiß- und Ejakulationsfunktion sind hier die interessierenden Faktoren. Die Affektion dieser Funktionen war in der Vergangenheit bereits Gegenstand von Untersuchungen [11, 28, 107] und für viele Aspekte finden sich in der Literatur Hypothesen und Modelle (s.u.).

Die Thermographie wurde in dieser Untersuchung als überlegenes System zum Monitoring der Sympathikusaktivität gewählt. Die Grundlagen für thermale Emission als Funktion einer Summe von durchblutungsrelevanten Entitäten soll im folgenden erläutert werden. Die Frage nach den Einflussgrößen, die die messbare Wärmestrahlung beeinflussen, ist bis heute unzureichend geklärt [14]. Zum Verständnis peripherer Temperaturregulation ist die Klärung dieser Frage jedoch von besonderer Bedeutung.

Kausale Mechanismen operationsbedingter lumbaler Grenzstrangblockaden werden betrachtet.



## 5.2 Besprechung physiologischer und anatomischer Grundlagen

### 5.2.1 Herkunft messbarer Wärmestrahlung

Das Abbild der Durchblutungsverhältnisse wird im wesentlichen durch oberflächliche Arterien und Venen des Hautgefäßnetzes generiert [14]. Hierbei spielt die Dichte des Gefäßnetzes eine Rolle und als limitierender Faktor auch die Dicke der Haut. Ob Muskelwärme an der messbaren Wärmestrahlung beteiligt ist, wurde in der Vergangenheit kontrovers diskutiert [1]. Die Muskelwärme als relevanter Wärmefaktor wird bei Buchwald et al. verneint [14]. Andere Untersuchungsergebnisse zeigen jedoch, dass, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß, eine Muskelbeteiligung in die thermographische Oberflächenvermessung relevant einfließt [27].

### 5.2.2 Mechanismen der Thermoregulation

Gezeigt hat sich, dass thermographische Seitendifferenzen schwerpunktmäßig an den Akren, also Händen und Füßen auftreten. Ein Erklärungsmodell besagt, dass die thermoregulative sympathische Innervation am Körperstamm in der Hauptsache sudomotorische Versorgung unterhält, während in der Peripherie die Wärmeregulation primär durch sympathisch unterhaltene arterio-venöse Shunts gewährleistet wird [18]. Unter physiologischen Bedingungen zeigen die Akren die geringste Temperaturstabilität des Körpers [14]. Anders ausgedrückt, die Akren verfügen über ein hochleistungsfähiges System zur Temperaturadaption durch Wärmeabgabe für den gesamten Organismus. Dieser Mechanismus ist sinnvollerweise sympathikusgesteuert. Denn viele Situationen, die mit erhöhter Sympathikusaktivität einhergehen (fright- and fight-Situation), gehen mit erhöhter Wärmeproduktion einher und werden somit simultan aktiviert.

### 5.2.3 Temperaturstabilität

Normalerweise herrscht eine sehr große Temperaturstabilität für die jeweiligen Körperregionen. Seitenunterschiede existieren nicht oder nur in minimalem Umfang und sind in wiederholten Messungen, z.B. über fünf Jahre, reproduzierbar. [102, 103]. Die Extremitäten weisen die größte Temperaturinstabilität auf, wobei die Akren eine Sonderstellung einnehmen. Durch die relativ großen Schwankungen sympathischer Aktivität zeigen sie situationsbedingt starke Veränderungen des sie durchströmenden Blutvolumen [14]. Größere, im allgemeinen seitenparallele Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, emotionaler Lage u.a. [21, 22, 37, 68, 90] sind im Thermogramm dokumentierbar. Durch Untersuchungsstandardbedingungen werden diese jedoch minimal gehalten. Andere Artefakte können eine exakte Befunderhebung empfindlich stören (vgl. S. 70). Sie zu erkennen, besser noch zu vermeiden, hat größte Priorität.

### 5.2.4 Pathophysiologie der Temperaturregulation nach Sympathikusaffektion und Borrow-Lending

Die Angaben zu Veränderungen der Hauttemperatur bei Sympathikusschädigung sind in der älteren Literatur uneinheitlich. Sowohl Überwärmung als auch Abkühlung der betroffenen Region wurde beobachtet [71]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung gehen bezüglich dieser unterschiedlich gerichteten Anisothermie mit denen der Literatur konform (vgl. S. 39).

Hinsichtlich der Temperatur über die Zeit muss die Art der Sympathikusaffektion differenziert werden. Transiente Sympathikusaffektionen, wie sie etwa bei der 'Placebo'-Blockade durch lumbale sympathikusnahe Kochsalz-Instillation (laut Tran et al.: 19.9 Stunden Schmerzfreiheit [98, 105]) oder auch vorübergehend operationsbedingt [60] vorkommen, sind im Allgemeinen voll reversibel. Therapeutische Sympathektomien können einen dauerhaften Erfolg i. S. einer permanenten Gefäßdilatation haben. Therapeutische Sympathektomien können aber auch einen pathophysiologischen Verlauf nehmen und zeigen dann andere Charakteristika [7]. Ihre Indikation wird deshalb zurückhaltend gestellt. Initiale Vasodilatation in den ersten Wochen mit Erwärmung wird von einer langsam kontinuierlichen Hautdurchblutungsminderung abgelöst. Schließlich ist sie deutlich niedriger als im gesunden Gebiet. Als ursächlich wird eine Veränderung der neuromuskulären Übertragung angesehen. Von wahrscheinlich keinem oder nur geringem Einfluss sind zirkulierende Katecholamine auf die glatte Gefäßmuskulatur im Gesunden. Nach partiellen peripheren Nervenläsionen werden Gefäße in nur geringem Ausmaß reinnerviert. Unter denervierten Bedingungen bekommen zirkulierende Katecholamine einen größeren Einfluss auf die Blutgefäße. Ferner bildet sich an den Gefäßen eine Supersensibilität gegenüber den Transmittern aus. In der Folge wird eine konstante Vasokonstriktion erreicht, die weitgehend unabhängig von der sympathischen Restinnervation ist [7]. Erwähnt sei, dass nur temperaturregulative Hautgefäßversorgung sympathisch relevant innerviert ist. Sauerstoffversorgende nutritive Gefäße nehmen an der sympathischen Innervation nicht oder nur in geringem Ausmaß teil [23]. Die Gefäßweitenregulation der nutritiven Muskel- und Organgefäße ist überwiegend durch lokale nonneurale Faktoren [23] gesteuert.

Aber auch ein Nebeneinander von Abkühlung und Überwärmung innerhalb einer Extremität sind in der vorliegenden Arbeit beobachtet worden. Präoperativ thermographisch beobachtet (Patienten Nr. 22, 25, 33, 37), lag zumeist ein Krankheitsprozess mit partieller, nicht spezifizierter Affektion der Sympathikusfasern und tieflumbalem Rückenschmerz vor. Interpretierbar ist dieses Phänomen als das in der Literatur beschriebene Phänomen der Autosympathektomie [2]. Aber auch als akutes Ereignis intraoperativ waren beide Phänomene als unmittelbare Antwort auf sympathisch wirksame Einflüsse erkennbar (vgl. S. 73). Auch postoperativ zeigten sich unterschiedlich gerichtete Anisothermien an der unteren Extremität. Jetzt allerdings nicht im gleichen Fuß, sondern auf der operierten Sei-

te Überwärmung und kontralateral eine Abkühlung bei einseitiger Präparation. Bei beidseitiger Präparation resultierte hier beidseitige Hyperthermie. Ein Erklärungsmodell [47] postuliert eine Durchblutungsverschlechterung der Gegenseite bei Mehrdurchblutung auf der operierten Seite. Diese Änderung der Blutverteilung wird als Hämometakinese oder als Borrow-Lending-Phänomen (Umverteilungsphänomen) bezeichnet. Dieses Modell wird für lumbale Sympathektomie im Tierversuch beschrieben, im Einzelfall aber auch am Menschen beobachtet. Auch in der vorliegenden Untersuchung zeigten 5 von 31 Patienten (Patienten Nr. 2, 6, 7, 17, 24) gesichertermaßen die Charakteristika eines Umverteilungsphänomens, ein Patient (Patient Nr. 30) entwickelte ein inverses Umverteilungsphänomen mit Hypothermie operationsseitig und Hyperthermie kontralateral. Beim inversen Umverteilungsphänomen zeigt sich analog der unilateralen Sympathikusbeteiligung eine operationsseitige Betonung der Temperaturänderung.

### 5.2.5 Entwicklung der Hauttemperatur nach perivertebraler (beidseitiger) Grenzstrangaffektion

Im Fall der Einbeziehung des lumbalen Grenzstranges beider Seiten ist in dieser Arbeit thermographisch regelmäßig ein beidseitiger Temperaturanstieg der unteren Extremität zu beobachten. Zugrunde liegende Prozesse sind weiträumige eitrig-entzündliche oder ausgedehnte Präparation bei (Hemi-)Vertebrektomien.

Welche Modelle könnten hier zu einer schlüssigen Erklärung führen? Das Literaturstudium liefert keine Hinweise auf Studien, die hilfreiche Analogien hätten liefern können. Als Folge nach einseitigen therapeutischen Sympathektomien wurde als Akutresultat bisher sowohl Erwärmung als auch Abkühlung der betroffenen Extremität (Verschlechterung einer arteriellen Insuffizienz) beobachtet [59]. Eine andere Untersuchung zeigt nach einseitiger Sympathektomie eine beidseitige Hyperthermie, auf der operierten Seite stärker ausgeprägt als auf der nichtoperierten [47]. Dieser Umstand macht horizontale sympathische Cross-Links zwischen Partnersegmenten gleicher oder benachbarter Etagen wahrscheinlich. Dagegen steht das Modell des Borrow-Lending-Phänomens (vgl. S. 63), welches eine Mehrdurchblutung für die operierte Seite und eine Minderdurchblutung für die nichtoperierte Seite beschreibt. Aus dem gefäßchirurgischen Alltag werden nach Auskunft der Chirurgen dieses Hauses akute beidseitige Hypothermien nach therapeutischer Sympathektomie nicht beobachtet.

Denkbar ist jedoch auch eine beidseitige Abkühlung der unteren Extremitäten. Den Fokus bildet ein operativ affizierter, nicht jedoch primär durchtrennter Grenzstrang. Aktuelle Hypothesen zur Erklärung der Pathologie sind für das CRPS (vgl. S. 77) beschrieben [8]. Baron und Jänig [8] beschreiben in einer allgemeinen Hypothese die Pathophysiologie für die beim CRPS beobachteten Symptome. Dieses Erklärungsmodell soll herangezogen werden, um hypothetische, in dieser Untersuchung jedoch nicht beobachtete Phänomene einer beidseitigen

Abkühlung zu erklären.

Für Schmerzafferenzen ist beschrieben worden, dass sie nach Denervierung Spontanaktivität entwickelten, und somit Schmerzsyndrome unterhalten könnten. Diese Spontanaktivität sei ferner aktivierbar durch z.B. chemische, oder taktile Reize. Diese Impulsbildung könne schon wenige Stunden nach der Verletzung auftreten. Grundsätzlich vorstellbar ist ein solcher Prozess allerdings auch für efferente Systeme. Dies wäre eine mögliche Grundlage für die Erklärung einer bilaterale Hypothermie an der unteren Extremität.

Als 'zentrale Sensibilisierung' beschreiben beide Autoren einen Prozess der veränderten Informationsverarbeitung von Afferenzen auf Höhe des Rückenmarkes nach peripheren nervalen Verletzungen. Besonders betroffen sind demnach auch inhibitorische Kontrollsysteme. Beide Mechanismen sind also mögliche Modelle für eine verstärkte Vasokonstriktion beidseits mit nachfolgender Hypothermie.

Blutgefäße werden ferner nach Läsionen von Vasokonstriktorafferenzen denerviert und zum Teil reinnerviert. Beide Prozesse führen zu verstärkter Reaktion der Blutgefäße auf zirkulierende Katecholamine. Dieser Prozess tritt weniger akut als vielmehr nach mehreren Wochen postoperativ auf. Auch diesem Prozess wird wesentlicher Anteil am Entstehen oben beschriebener Durchblutungsstörungen zugeschrieben.

Die Beobachtungen am sympathischen System sind und werden auch in der Zukunft schwierig zu beurteilen sein. Zum einen erschwert die große Variabilität des Grenzstranges [19, 64, 82, 108] Beurteilung und Interpretation. Zum anderen wirkt sich das teilweise unterschiedliche Verhalten des Grenzstranges sowohl im Vergleich Mensch/Tier erschwerend aus. Analogien zwischen physiologischen und pathophysiologischen Verhältnissen sind nur eingeschränkt zulässig [8].

### 5.2.6 Anordnung der sympathischen Hautinnervation

Über die Sympathikusverteilung am Bein herrscht bis in die heutige Zeit Unklarheit. Mehrere Theorien zur sympathischen Hautverteilung wurden mit Hilfe unterschiedlicher Untersuchungsmethoden entwickelt. Es werden Verteilungsmuster beschrieben, die den Head-Dermatomen der sensiblen Schmerzfortleitung ähnliche Zonen beinhalten [3]. Andere Autoren erkannten prinzipielle Übereinstimmungen, betonen aber weiterhin die Unterschiede in Verlauf und Ausdehnung [32, 111]. Von Überlappung [80] sowie großer Variabilität in der Ausdehnung [103] wird berichtet. Dermatome überlappen derart, dass übernächste Dermatome aneinander grenzen und sich dazwischenliegendes Segment zu gleichen Teilen auf die beiden Nachbarareale verteilt. Andere Untersuchungen propagieren eine absolute Nichtvorhersagbarkeit der sympathischen Hautverteilung [3]. In einer Arbeit von Gandhavadi et al. 1982 [32] wird für präganglionäre Sympathikusfasern ein segmentaler Verlauf angenommen, der dem der sensiblen Dermatome nahe kommt. Eine gefäßkodierte Sympathikusverteilung wird hingegen für die postganglionären

Fasern beschrieben. Ein sympathisch innerviertes Areal zentriert sich somit um einen Gefäßhauptstamm. Eine Kontinuität im Faserverlauf vom Gefäß auf die Haut wird ferner bei Gandhavadi postuliert.

Keines der großen anatomischen Standardwerke [9, 110] bespricht das Thema der sympathischen Hautverteilung der unteren Extremität ausführlich. Bei Benninghoff heißt es lediglich, dass Störungen der Thermoregulation in ihrer Ausbreitung den sensiblen Dermatomen folgten, da sympathische Fasern innerhalb des peripheren Nerven in den sensorischen Faszikeln enthalten seien.

### 5.2.7 Einführung des Begriffs 'Thermatom'

Ash [3] unterstützt ferner Ergebnisse von nichteinheitlichem Verlauf der Bahnen für die unterschiedlichen sympathikusvermittelten Funktionen, da diese auch nicht von paralleler Aktivität seien. Über zwanzig Dermatome sind bisher vorgenommen worden [3, 32, 40, 54, 55, 58, 76, 79, 80, 95]. Es wurde der Begriff 'Thermatom' [54, 55] für sich thermographisch darstellende Sympathikusverteilung analog zum sensiblen Dermatom der Haut geprägt. Ein Thermatom ist gekennzeichnet durch segmentale thermoregulatorische Verteilung sympathischer Nervenfasern an der Haut. Thermatome sind lediglich teilkongruent mit den sensiblen Dermatomen ohne sich zu entsprechen [55, 97]. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie kann die Existenz einer schlüssigen segmentalen Thermatomverteilung nach Grenzstrangblockade (vgl. S. 65) nicht erkannt werden.

### 5.2.8 Grenzstranganatomie macht interindividuell reproduzierbare Thermatome unwahrscheinlich

Die Anatomie des lumbalen Grenzstranges ist eine der am meisten variierenden des menschlichen Körpers, wobei zwischen männlichen und weiblichen Individuen keine nachweisbaren Unterschiede bestehen [19]. Entsprechend der Spinalnervenausstritte wären im Lendenbereich möglicherweise fünf Spinalganglien denkbar. Die Anzahl und Anordnung ist jedoch sehr variabel [19]. Rocco zählte in einer Untersuchung an 68 Grenzsträngen die Häufigkeit der vorhandenen Grenzstrangganglien. Im Bereich  $L_4$  wurden neun und im Bereich  $L_4-L_5$  acht Ganglien gefunden, auf Höhe  $L_5$  und  $L_5-S_1$  insgesamt nur jeweils drei. Bezogen auf die Anzahl der untersuchten Organe ist die Häufigkeit also relativ gering. Mit größter Regelmäßigkeit kommen Ganglien im Bereich  $L_2-L_3$  und  $L_3-L_4$  vor [19, 82]. Nach  $L_1$  hin nimmt die Häufigkeit ab, so dass annähernd eine Normalverteilung mit Scheitel bei  $L_2-L_3/L_3-L_4$  zu bestehen scheint. Zwischen den einzelnen Ganglien bestehen Verbindungen sowohl vertikal als auch horizontal. Die vertikalen Verbindungen können direkt oder ein Ganglion überspringend bestehen [19]. Ferner bestehen Unterschiede in Form (elliptisch, zylindrisch), Größe und Entfernung von der Wirbelsäulenvorderkante.

All diese Unterschiede machen interindividuell reproduzierbare Thematome unwahrscheinlich. Sogenannte Bypass-Verbindungen zwischen Ganglien mit Auslassen eines interponierten Ganglion lässt mehrsegmentale Hyperthermien in auch nicht operierten Bereichen möglich erscheinen, wie auch Non-Hyperthermien in operierten Gegenden, wenn die Grenzstrangfasern aus einem nichtaffektierten Ganglion außerhalb des OP-Gebietes gefeuert werden.

### 5.2.9 Unterschiedliche Verfahren zum Sympathikusmonitoring

In dieser Studie wurde zum Sympathikusmonitoring die Infrarot-Thermographie eingesetzt, weil sie die meisten Vorteile auf sich vereint. Hohe Sensitivität, hoher Kontrast, hohes Auflösungsvermögen und geringe Patientenbelastung.

Der Vertreter der Kontaktthermographie ist die Flüssigkristallthermographie [76, 109]. Hier werden Cholesterolderivate als flüssige Kristalle, zumeist Ester, auf flexible Tücher oder Kissen aufgebracht, die an die Körperoberfläche angelegt mit charakteristischem temperaturabhängigem Farbumschlag reagieren. Die gewünschte Eigenschaft der Kristalle liegt in der Fähigkeit, in einem nahen Temperaturbereich mit großer Sensitivität temperaturspezifische Farbumschläge zu durchlaufen, so dass ein genügend sensitives System zur Temperaturmessung resultiert. Die Laken oder Kissen auf die die Kristalle aufgebracht sind, werden zum Zweck der Untersuchung in einen Rahmen gespannt an dessen Verlängerung in bestimmter Entfernung eine Kamera angebracht ist. So kann das Untersuchungsergebnis unter gleichbleibenden Abbildungsbedingungen als Kontaktthermogramm festgehalten werden.

Bezüglich der Ergebnisse zwischen Thermographie mit Flüssigkristallen und der Infrarot-Thermographie besteht eine hohe Korrelation [76]. Vorteile der Flüssigkristallthermographie gegenüber der Infrarot-Thermographie liegen in geringen Kosten, Einfachheit der Apparatur und einem ausgeprägten Kontrastunterschied. Hauptvorteile der Infrarot-Thermographie sind die Tatsache, dass keine kontaktbedingten Temperaturverfälschungen auftreten, außerdem können ausgedehntere Areale in einer Aufnahme berücksichtigt werden.

Als klinische Anwendungsgebiete kommen grundsätzlich die gleichen Indikationen in Frage wie sie für die Tele-Thermographie gelten. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten für eine Thermographiekamera, bleibt diese eher dem Klinik-einsatz vorbehalten, während in der Praxisniederlassung eher die Flüssigkristallmethode Anwendung findet.

Weitere Verfahren zum Sympathikusmonitoring bieten sich mit zum Teil ähnlich guter Wirksamkeit an, erfordern aber beispielsweise ein höheres Maß an Compliance, bzw. bieten einen geringeren Grad an Zuverlässigkeit hinsichtlich Dokumentation und Auswertung. Der Jod-Stärke-Test ist ein qualitativer kolorimetrischer Wasserindikator und beruht auf dem Farbumschlag von gelblich-braun



nach violett-braun, an den Stellen des Körpers, an denen durch Schwitzaktivität vorher aufgetragene Jodtinktur mit darübergegebener Stärke reagiert [36, 65]. Mit dem Ninhydrin-Test nach Moberg kann ebenfalls eine Schweißsekretionsstörung qualitativ und quantitativ diagnostiziert werden. Aminosäuren des Schweißes verbinden sich mit Ninhydrin zu einem blauen bis violetten Farbstoff. Handfläche oder Fußsohle werden auf einen Bogen weißen Papiers gedrückt. Anschließend wird das Papier in einer Lösung von Ninhydrin (1%) in Aceton mit einigen Tropfen Eisessig gezogen. Erhitzung für drei Minuten im Heißluftsterilisator zeigt bei physiologischer Schweißsekretion einen violetten Abdruck, während anhydrotische Bezirke weiß bleiben [35, 58, 85].

Auch die Elektrosympathikographie (Electrical skin resistance, sympathetic skin response) ist ein Verfahren zum Sympathikusmonitoring [30, 32, 53, 79, 80]. Hierbei erfährt ein nicht wahrnehmbarer Strom, der durch den Körper geleitet wird, bei seiner Passage durch den Organismus einen Widerstand, der fast gänzlich in der Haut lokalisiert ist. Ein Defekt in der Haut läßt den Widerstand, unabhängig von dessen ursprünglicher Höhe, nahe Null sinken. Ältere Untersuchungen zeigen, dass der elektrische Hautwiderstand in großem Umfang von der sympathischen Innervation abhängt. Erhöhte sympathische Stimulation, z.B. durch emotionale Erregung, mindert den elektrischen Widerstand, psychische und physische Inaktivität erhöhen den Hautwiderstand. Ältere Untersuchungen an Probanden mit segmentalem Sympathikusdefekt zeigten dies. Topographische Parallelen zwischen thermographischen Interpretationen (Thermatomen) und charakteristischen sympathikographischen Hautverteilungsmustern wurden erkannt [80].

## 5.3 Diskussion untersuchungsbezogener Resultate

### 5.3.1 Intraoperative mechanische Manipulation als Ursache thermaler Asymmetrie

Intraoperatives Monitoring zeigt kausale Zusammenhänge, die postoperativ beobachtete Phänomene erklären können. Es imponierte postoperativ neben einer überwärmten unteren Extremität auf der operierten Seite, in einem Fall eine retrograde Ejakulationsstörung [67, 93, 108]. Bestimmte operative Manöver resultieren thermographisch in einer spontanen Erwärmung oder Abkühlung der Fußsohle. Ipsilaterale Hypothermie und/oder kontralaterale Hyperthermie bei Hautschnitt und Peritonealpräparation zeigte sich bei fast allen Patienten (vgl. S. 102). Hier könnte ein Reflexbogen durch Reiz postganglionärer sympathischer Fasern oder auch Schmerzfasern den beschriebenen Erfolg vermitteln. Gleiches gilt für die perivertebrale Präparation. Alle genannten Strukturen sind postganglionär sympathisch innerviert. Bei mechanischer Manipulation des eigentlichen Grenzstranges

(präganglionäre Fasern) zeigen sich zwei unterschiedliche Reaktionen. Die Präparation mit Druckeinwirkung resultiert in ipsilateraler Hyperthermie (kontralateraler Hypothermie), die Verlagerung mit Dehnung zeigt Hypothermie ipsilateral.

### 5.3.2 Thermoregulatorische Folgen intraoperativer Kochsalzspülung

Für die kochsalzbedingten Ereignisse (ipsilaterale Hyperthermie bei Spülung des Operationssitus mit physiologischer Kochsalzlösung) könnte man postulieren, dass Kochsalzlösung eine lokalanästhetische Wirkung am Grenzstrang hat und bei ausreichender Präparation die sensiblen Strukturen der Kochsalzlösung direkt zugänglich sind. Blockierung des Nerven wird erreicht, wie in der Operationsreihe beobachtet. Direkt nach Hautverschluss präsentieren sich in der Untersuchungsreihe drei unterschiedliche Befundmöglichkeiten: Operationsseitige Hypo-, Hyper-, und Isothermie. Postoperative Thermographie (durchschnittlich 11 Tage postoperativ, min. 3. Tag, max. 33. Tag) zeigte bei allen Patienten mit einseitiger Wirbelkörperpräparation eine operationsseitige Hyperthermie der unteren Extremität. Auch die zum Operationsende ipsilateral iso- oder hypothermen Extremitäten entsprachen dann diesem Bild. Die Erklärung könnte darin liegen, dass Kochsalzlösung, welche in jeder Operation benutzt wird um den Situs zu spülen, durch das Interzellularvolumen diffundiert und unterschiedlich schnell die für eine Blockade sensiblen Strukturen des Grenzstrangs erreicht. Das Ergebnis ist der unmittelbar postoperativ interindividuell differierende isotherme oder unterschiedlich gerichtete anisotherme Wärmezustand der unteren Extremität. Dieser uniformiert sich jedoch innerhalb einer Woche in der Untersuchungsgruppe zu einem operationsseitig hyperthermen Zustand. Für diesen Mechanismus spricht auch der die Diffusion forcierende Kompressionsreiz, der mit beginnender Fasziennaht auftritt. Ab dem Zeitpunkt der Fasziennaht zeigt sich nämlich auch eine zunehmende operationsseitige Erwärmung. Als ursächlich können *NaCl*-Ionen gelten, die, durch Wundverschluss ansteigenden Gewebedruck provoziert, durch das Interzellularvolumen diffundieren. In der Folge ist eine progrediente operationsseitige Hyperthermie beobachtbar.

Von einem am sympathischen Grenzstrang wirksamen Blockadepotential von Natriumchlorid berichteten bisher erst wenige andere Untersucher [105]. In älteren Studien wurden nach Kochsalzinjektionen in Grenzstrangnähe Schmerzreduktion sympathisch verursachter Schmerzen für 18 bzw. 20 Stunden beobachtet [84, 98]. Als ursächlich wurde vielfach ein Placeboeffekt [84, 98] angenommen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sprechen deutlich gegen einen Placeboeffekt. Eine Indikation zur Anwendung hypertotonischer Kochsalzlösung zur intrathekalen Applikation findet sich in der Schmerzbehandlung benignen und malignen Erkrankungen [66]. In der sogenannten Differential-Subarachnoidal-Blockade wird durch Injektion isotonischer Kochsalzlösung zwischen psychogenem Schmerz (prolongierte



Schmerzlinderung) und Placeboeffekt (kurzdauernder Schmerzlinderung) unterschieden [4] und für die intradurale Injektion eiskalter Kochsalzlösung wird die Blockade schmerzleitender C-Fasern über einen Zeitraum von Wochen beschrieben [4]. Brelsford und Uematsu [13] injizierten Kochsalzlösung malleolusnah in Nachbarschaft des posterioren Tibialisnerven. Hintergrund war die Vermutung, dass Veränderungen der Vasomotorenaktivität zumindest teilweise aufgrund mechanischer Kompression durch Injektionsvolumina verursacht sein könnte. Eine kochsalzbedingte periphere Blockade postganglionärer sympathischer Vasomotorefferenzen zeigte sich jedoch nicht [13]. Auch Minderung der Reflexaktivität wurde beobachtet [105].

### 5.3.3 Artefakte

Circadiane Temperaturvariationen sind eine Entität von Störgrößen im Sinne von Artefakten. Solche liegen im Bereich unterhalb von  $0.5^{\circ}\text{C}$  [10]. Krankheitswert wird einer Seitendifferenz u.a. deshalb erst oberhalb  $1.0^{\circ}\text{C}$  (zweifache Standardabweichung) analog dem Studiendesign früherer Arbeiten [71, 102, 103] beigegeben. Negative thermographische Befunde sind bei nachgewiesenen Gefäßobliterationen zu erwarten. Ferner ist bei Adipositas häufig eine sehr unregelmäßige, fleckige Oberflächenverteilung zu beobachten. Ein Hotspot könnte bei einer schräg gescannten Fläche unerkannt bleiben [106]. Vasomotionsänderungen (vornehmlich Dilatation) durch pharmakologische Interaktion (z.B Sildenafil [Viagra], Anästhetika, Antikonzeptiva) sind erwartungsgemäß seitengleich und können bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden [69].

### 5.3.4 Bekannte und hypothetische unerwünschte Wirkungen bei Grenzstrangaffektion

In der Literatur beschrieben sind als Nebenwirkungen ferner Ausfälle weiterer durch Sympathikusaktivität vermittelter Funktionen. An der unteren Extremität wird u.a. der Ausfall der Piloaktion (reflektorische Aufstellung der Behaarung der Extremitäten) und der Ausfall der sudomotorischen Funktion beschrieben [33]. Es wurde ferner von einem Fall einer thorakalen Grenzstrangläsion berichtet. Zwei Wochen nach rechtseitiger thorakoskopischer, ventraler Stabilisierung berichtete ein Patient über Kopfschmerz, Schwindel, niedrigen Blutdruck, gleichseitige Schweißdrüsenfunktionseinbuße und gleichseitige Hypothermie. Kontralateral beklagte der Patient eine Hyperhidrosis [111]. Weiterhin denkbare Nebenwirkungen könnten sich aus der hämodynamischen Natur der hyperthermischen Befunde ergeben. Während sich in den Kapazitäts- und Widerstandsgefäßen der hyperthermen Extremität das Blut partiell poolt, könnte daraus eine Minderversorgung anderer Bereiche resultieren. Gehirn und Nieren sind hier als sensibelste Organe beispielhaft zu nennen. Auch andere Organe könnten Folgen durch einen relativen Volumenmangel erleiden. So ist vorstellbar, dass bei kardialen Risiko

unter abfallendem Druck ein Frequenzanstieg mit konsekutiver Dekompensation resultiert. Durch eine extreme Borrow-lending-Situation könnte eine unter AVK kompensierte Versorgung der kontralateralen Extremität dekompensieren. Per definitionem ist also zunächst von einer transienten (Sympathikusaffektion) oder dauerhaften (Sympathikusblockade) Aktivitätsveränderung des Sympathikus auszugehen.

Angemerkt sei, dass die Wirkungen und Nebenwirkungen solcher Sympathikusaffektionen in ähnlicher Form bei therapeutischer Sympathektomie beobachtet wurden, die bei okklusiver Gefäßerkrankung zum Einsatz kommt [7, 38, 51, 59, 73, 94].

### 5.3.5 Beurteilung des Thermographieverfahrens

Welchen Stellenwert nimmt die Thermographie ein und wo liegen die Grenzen dieses Systems? Aus den Erfahrungen dieser Studie kann von einer sehr guten Eignung zum sympathischen Monitoring auf Grenzstrangebene gesprochen werden. Durch unmittelbare Wiedergabe der sympathisch gesteuerten Vasomotion in Echtzeit, kann hier kein anderes Verfahren mit der Thermographie konkurrieren. Die Methode erreicht eine sehr hohe Sensitivität (Diskriminationslimen  $0.1^{\circ}\text{C}$ ). Der Einsatz der Thermographie in anderen Bereichen der Medizin in Diagnostik und Verlaufskontrolle der Schmerztherapie wird kontrovers beurteilt. Die Aussagen reichen von vollkommener Ablehnung der thermographischen Methode zu diagnostischen Zwecken [71] bis zur Empfehlung die Thermographie als diagnostisches Instrument bei einem breiten Indikationsspektrum einzusetzen [71].

In der Frühphase der medizinischen Thermographie wurde spezifische [54] Aussagekraft thermographischer Befunde postuliert. So wurden chronische Rückenschmerzsyndrome oder psychogene Schmerzsyndrome thermographisch differentialdiagnostiziert. Hiervon muss nach vergleichender Sichtung der Literatur Abstand genommen werden [89]. Nach anfänglicher Euphorie und dem weiten Einsatz der Thermographie als diagnostisches Instrument auf vielen Gebieten [27], ist man heute aufgrund mangelnder Spezifität vielfach wieder von dieser Methode abgerückt [95]. Reliabler diagnostischer Nutzen der thermographischen Methode hinsichtlich spezifischer oder semi-spezifischer Krankheitszuordnung ist also zu bezweifeln. Aufgrund des begrenzten Aussagewerts ist die Thermographie als Suchtest abzulehnen [14]. Die Thermographie hat derzeit und wahrscheinlich mittelfristig komplementären Charakter, der im Verlaufs-Monitoring von sympathikochirurgischen Manövern sein Korrelat findet. Thermographie ist in der Abbildung thermorelevanter Aktivität weder sympathikusspezifisch noch frei von Artefakten [72, 106]. Deshalb liegen in vorsichtiger Befundung und Interpretation gleichzeitig die Möglichkeiten und Grenzen dieser Methode.

### 5.3.6 Verlauf von Sympathikusaffektionen und Folgezuständen

Es wird berichtet, dass operativ bedingte Sympathikusblockaden sich innerhalb von ca. sechs Monaten zurückbilden. Danach normalisiert sich das Thermogramm wieder und es ist von einer Wiederherstellung physiologischer Verhältnisse auszugehen. Therapeutische Sympathikusblockaden mit Lokalanästhetika resultierten u.a. in einer Hyperthermie für durchschnittlich 3 Tage und 18 Stunden [98]. Bei persistierender retrograder Ejakulationsstörung kann eine medikamentöse Therapie (trizyklische Antidepressiva, z.B. Imipramin) zu spontaner jedoch nicht dauerhafter Herstellung anterograder Ejakulation führen [46, 70]. Auch chirurgische Therapieverfahren (Abrahams-Technik, Young-Dees-Operation) von unterschiedlicher Erfolgsrate kommen zur Anwendung [46].

Dieser Erfahrungswert selbsttätiger Rückbildung ist die Grundlage der 'Therapie' bei der ejakulativen Dysfunktion. Aufgrund derzeit mangelnder dauerhaft wirksamer Therapieprinzipien wird nach Zuwarten eines halben Jahres die Wiederkehr dieser Funktion erwartet.

### 5.3.7 Kausalitätsansätze für kochsalzinduzierte Grenzstrangblockade

Es stellt sich natürlich die Frage, welche Mechanismen hinter dem Umstand einer ca. sechsmonatigen Erholungsphase bis zur Wiederaufnahme störungsfreier Nervenfunktion stehen. Handelt es sich um eine Membranerholung im Sinne von Kanalblockierung und/oder Pumpentätigkeit oder noch anderer sich ultraprotrahiert erholender Transportmechanismen? Auch andere Mechanismen im Sinne von Kompensationsvorgängen sind vorstellbar. Es könnte isoliert eine Normalisierung der Extremitätentemperatur auftreten. Auch wäre eine kumulierte Reaktivierung eines Teils der vorher ruhenden Sympathikusfunktionen vorstellbar, wie es von anderen Untersuchungen her bekannt ist [45]. Während in der vorliegenden Arbeit in einigen Fällen die Grenzstrangblockade mit *NaCl* eindeutig festgestellt werden konnte (Patienten Nr. 23, 25, 30), zeigte sich während anderer Eingriffe der Effekt weniger eindeutig. Als Parameter ist die Echtzeitdarstellung der Nervenfunktion im Thermogramm zu nennen, die in einigen Fällen schlagartigen Temperaturanstieg zeigte. Die Authentizität der positiven Fälle ist eindeutig. Warum in anderen Fällen kein positives Ergebnis erzielt worden ist, kann unterschiedlich begründet sein. Zunächst stellt sich die Frage, welche Strukturen möglicherweise verantwortlich für eine Blockadeinduktion durch Kochsalz sind. In Frage kommen präganglionäre myelinisierte und postganglionäre Fasern. Letztere kommen schwach- und nicht-myelinisiert vor. Ferner liegt das Grenzstrangganglion mit seiner Synapse und die zahlreichen peripher des Grenzstrang liegenden Ganglia intermedia im Zentrum möglicher Angriffsorte. Welche subanatomische Struktur verantwortlich ist und welche pharmakokinetischen Mechanis-

men zugrundeliegen, bleibt eine Fragestellung zukünftiger Untersuchungen. Für die beobachteten Phänomene kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Natriumchlorid an bestimmter nervaler Struktur ein Blockadepotential besitzt. Ist diese Struktur intraoperativ frei zugänglich für das in Lösung befindliche Ion, so war spontan eine deutliche Hyperthermie der operationsseitigen unteren Extremität festzustellen. War während der Operation der Effekt nicht eindeutig oder nicht spontan, so war die Zielstruktur möglicherweise nicht hinreichend freigelegt (Perineurium, Bindegewebe), obwohl der Nerv makroskopisch eindeutig sichtbar war. Analog dazu passt das Bild der bereits dargelegten Möglichkeiten, von direkt postoperativ thermographischen Befunden (Hypo-, Hyper-, oder Isothermie der operationsseitigen Extremität verglichen mit der kontralateralen Seite, vgl. S. 40). Ferner ist auch der intraoperative Grenzstrang ein dynamisch feuernder Nerv, so dass überlagernde Ereignisse des operativen Manövers den gesuchten Effekt hätten zumindest teilweise maskieren können. In welchem Umfang  $Na^+$  und/oder  $Cl^-$  an einer Reaktion am Nerven teilnehmen, bleibt zu klären. In einer früheren Studie wird das Gewicht dem  $Cl^-$  zugeschrieben [105]. Korrelat war eine herabgesetzte Wahrnehmungsschwelle bezüglich des Tastsinnes bei subarachnoidal Injektion von physiologischer Kochsalzlösung im Lumbalbereich.

### 5.3.8 Existenz segmentaler Thematome

Eine konsistente interindividuell reproduzierbare Segmentverteilung im Sinne von Thematomen (Definition vgl. S. 66) kann anhand der Ergebnisse dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Der Vergleich mit keiner der bisher vorgenommenen Thematomeinteilungen hat klare wiederkehrende Übereinstimmung gezeigt. Unabhängig von in der Literatur vorgestellten Thematomeinteilungen, konnte auch anhand der thermographischen Ergebnisse dieser Studie keine schlüssige Systematik interindividuell wiederkehrender Thermotopographie erkannt werden. Obgleich hypertherme Bezirke im Bereich bekannter Dermatomgrenzen lagen, konnte jedoch aufgrund großer Variation und geringer Schärfe der Temperaturübergänge eine schlüssige Thematomgliederung nicht erkannt werden. Diese Feststellung zeigen auch schon die Ergebnisse früherer Arbeiten [89]. Eine vergleichende Untersuchung der Thermographien dieser Arbeit zeigt dies deutlich. Unwahrscheinlich erscheint, dass hier gesehene Temperaturmuster mit wachsender Gruppengröße eine Systematik offenbaren könnten, die hier gesehenen Trends zuwider läuft. Ergebnisse früherer Arbeiten [3, 32, 40, 54, 55, 58, 76, 79, 80, 95] beschreiben reproduzierbare Thematomgliederungen. Von diesen Ergebnissen muß zumindest vor dem Hintergrund des hier vorgestellten Studiendesigns Abstand genommen werden.

### 5.3.9 Anatomische Erklärungsansätze für thermographische Untersuchungsergebnisse

Die Grenzstranganatomie macht interindividuell reproduzierbare Thematome unwahrscheinlich (vgl. S. 66). Zwei Hauptergebnisse aus der thermographischen Untersuchung sind, dass zum einen keine reproduzierbaren Thematome zu diskriminieren sind, und dass außerdem in der L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>-Etage etwa gleich häufig ein signifikanter Temperaturunterschied und eine relative Isothermie unterhalb der Signifikanzgrenze bei gleicher Eingriffsebene nebeneinander stehen.

Ad 1. Dass Thematome sich nicht eindeutig anhand der Ergebnisse dieser Studie herausarbeiten lassen, kann auf folgende Gründe zurückgeführt werden:

Es bestehen in großer Variabilität Verbindungen zwischen den einzelnen Ganglien sowohl vertikal als auch horizontal. Vertikale Verbindungen können zu größeren hyperthermen Arealen als erwartet führen. Sogenannte Bypass-Verbindungen zwischen Ganglien mit Auslassen eines interponierten Ganglion lässt mehrsegmentale Hyperthermien in auch nicht operierten Bereichen möglich erscheinen, wie auch Non-Hyperthermien in operierten Gegenden, wenn die Grenzstrangfasern aus einem nichtaffektierten Ganglion außerhalb des Operationsgebietes ge feuert werden (z.B. bei Ganglienlage in großer Entfernung vom Situs, s.u.).

Ad 2. Bei gleicher Eingriffsebene bei einseitigem Wirbelsäulenzugang ergibt sich ein etwa in gleicher Häufung vorkommendes Bild: Signifikanter Temperaturunterschied und relative Isothermie im Bereich unterhalb der Signifikanzgrenze. Hier bestehen grundsätzlich die Möglichkeiten, dass kein Blockadeereignis eingetreten ist, oder dass Ganglien beider Seiten blockiert wurden (über horizontale Verbindung). Auch ist es möglich, dass die Strukturen von wesentlichem Blockadepotential beider Seiten identisch sind oder fehlen. Identität wäre beim fusionierten solitären Grenzstrangganglion einer definierten Etage gegeben. Die lumbalen Grenzstränge der Ratte fusionieren beispielsweise häufig zu einem gemeinsamen, median ventral der Wirbelsäule verlaufenden Strang [64, 97]. In Analogie dazu sind weitere im Ausmaß nicht vorhersagbare Variationen auch in der menschlichen Grenzstranganatomie vorstellbar.

Weiterhin nachgewiesen ist eine große Variabilität der Entfernung der Grenzstrangstrukturen von der Wirbelsäulenvorderkante [82]. Mit zunehmender Entfernung vom Operationssitus nimmt die Wahrscheinlichkeit einer zeitlich unmittelbaren Beeinflussung im Sinne eines Blockadeereignisses durch den Operationszugang ab. Die durchschnittliche Entfernung der Grenzstrangganglien im Bereich der L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>-Etage ist wesentlich größer als am L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>-Übergang [82]. Die mit der Entfernung zunehmende Isolation durch Fett- und Faszienstrukturen verhindert also die Blockade durch das *NaCl*.

In beiden Gruppen finden sich sowohl links- als auch rechtsseitige Zugänge, zugangsabhängige Unterschiede werden damit sehr unwahrscheinlich. Weiteren Untersuchungen anheimgestellt seien Überlegungen, ob und in welcher Form eine Abhängigkeit des Blockadepotentials der Form (elliptisch und zylindrisch) oder

der Größe [82] unterliegen könnten.

### 5.3.10 Beteiligung des Sympathikus' an der männlichen Sexualfunktion

Ejakulation ist das Ergebnis eines Reflexbogens. Startereignis ist die Erektion. Via N. pudendus (sensorische Reizung) werden die intrakordalen sympathischen Kerne Th<sub>12</sub>-L<sub>2</sub> erreicht. Resultierende parasympathische Efferenzen aus S<sub>2</sub>-S<sub>4</sub> bewirken, dass Ejakulatkomponenten in die Pars prostatica urethrae gelangen. Physische und psychische Orgasmusreaktion resultiert aus Integration vorgenannter Ereignisse durch das Großhirn [67].

Ejakulationsstörungen treten bei Affektionen sympathischer Ganglien oder Fasern im Bereich Th<sub>12</sub>-L<sub>2</sub> auf [19, 67, 86, 88, 92, 108]. Diese können als (zum Teil) schmerzhafte retrograde oder bei ausbleibender Emmision des Samen in die hintere Urethra als trockener Orgasmus auftreten [93]. Einseitige Sympathikusaffektionen oder Ganglienresektionen zeigten keine Veränderung der Sexualfunktion [108]. Beidseitige Ganglienresektion unterschiedlicher Kombination im Lumbalbereich zeigte permanenten Ausfall der Ejakulationsfunktion im Bereich 6–54% [88, 108].

### 5.3.11 Limitationen

Es wurde bereits auf sich durch kleine Gruppengrößen ergebende Nachteile eingegangen. Diese Arbeit ist als Vorschau auf weitere Untersuchungsreihen zu verstehen, die die Ergebnisse dieser Arbeit untermauern und fortführen. Die eingetretenen Ergebnisse präsentieren sich hier in eindeutiger Weise, so dass ihrer Beobachtung auch in kleinen Fallzahlen Aussagekraft gebührt.

Bei Betrachtung der präoperativen Thermogramme fällt auf, dass der interphalangeale Vergleich sich am wenigsten zuverlässig bezüglich präoperativer Isothermie präsentiert. Temperaturdifferenzen oberhalb 1°C wurden beobachtet (Patienten 6, 9, 15, 21, 22, 25, 37). Ursächlich kann eine nicht-artefaktbedingte Anisothermie im Sinne nichtstandardisierter Bedingungen sein (Bodentemperaturdifferenzen). Andererseits kann läsionsbedingt Anisothermie herrschen (Wirbelsäulenerkrankung, Autosympathektomie [2]). Auch methodebedingt kann durch Koordinatenabweichung in der Punktmessung ein überhöhter Temperaturunterschied zustande kommen.

Angemerkt werden soll weiterhin, dass die strikte Einhaltung der Standardbedingungen eine Klimakammer verlangt. In dieser Untersuchung wurde bewusst unter klinischen Bedingungen gearbeitet, d.h. die Bedingungen wurden zum Teil approximiert. Dieses wurde für legitim im Sinne einer solchen Untersuchung erachtet. Hier kommt es auf den Seitenvergleich und weniger auf den wahren Wert an. Im Gegensatz dazu ist bei interindividuellen Reihen zu unterschiedlichen Zeit-



punkten der wahre Wert von größerer Relevanz. Solche liegen jedoch hier nicht vor, so dass eine Approximierung vertretbar ist.

Störeinflüsse, so ist anzunehmen, wirken auf beide Extremitäten etwa gleich stark ein. Ein Seitenvergleich wird also nicht relevant verfälscht.

Dem Studiendesign entsprechend wurden die Patienten sowohl prä- als auch postoperativ thermographiert. Jedoch kamen 9 der 31 Patienten (siehe Anhang B) als Notfalleinweisung, so dass hier auf eine präoperative Aufnahme verzichtet werden musste. Eine ASA-Klassifikation wurde für jeden Teilnehmer dieser klinischen Untersuchung vorgenommen. Alle Patienten entsprachen ASA I.

Während der intraoperativen Aufnahme tauchte eine weitere Problematik auf. Der relaxierte Fuß in Patientenrückenlage ist methodebedingt nicht in idealer 90-Grad-Fokussierung aufzunehmen. Hier wird verwiesen auf den Umstand, dass entsprechend der Fragestellung thermographische Seitenunterschiede von Bedeutung sind, Abweichungen im Sinne absoluter Temperaturangaben methodebedingt und bewusst in Kauf genommen sind.

Postoperativ konfrontierte die Situation häufig mit mangelnder Compliance von seiten der Patienten. Körperliche Schwäche oder postoperativer Schmerz hinderen hier den Patienten die 'modifizierte Nullstellung' (vgl. S. 23) einzunehmen. In diesem Fall wurden die Aufnahmen am liegenden Patienten aufgenommen. Die Bedingung, den Aufnahmewinkel in 90-Grad-Stellung zu wählen, fand regelmäßige Beachtung.

Das Intervall zwischen Operation und postoperativer Thermographie ist idealerweise bei einer postoperativen Thermographie klein und regelmäßig. Der klinische Verlauf jedoch gab vor, wann die Patienten einer Untersuchung unterzogen werden konnten. Nicht befriedigend zu untersuchen war ein möglicher kalorischer Effekt der Spüllösungen intraoperativ auf ein mögliches Blockadepotential am sympathischen Grenzstrang. In drei Fällen (Patienten Nr. 23, 25, 30) war der Grenzstrang eindeutig sichtbar freipräpariert. Hier wurde systematisch mit unterschiedlichen Lösungen und Temperaturen gearbeitet. Weder Glukose- noch Stärkelösung zeigte bei unterschiedlichen Temperaturen (siehe Ergebnisse) ein Blockadepotential. Anscheinend sind diese Lösungen nicht nennenswert in der Lage Grenzstrangblockaden zu induzieren. Kochsalzlösung zeigte beim ersten Kontakt jeweils den Effekt einer kompletten Grenzstrangblockade, so dass keine Untersuchungsmöglichkeit mehr für Spüllösungen anderer Temperatur am gleichen Organismus bestand.

Es kann festgehalten werden, dass eine Abhängigkeit sehr wohl von der Chemie der Spüllösung besteht, keine Korrelation wurde jedoch im Zusammenhang mit Temperaturvariation beobachtet. Weiteren Untersuchungen obliegt eine weitere Darstellung der Abhängigkeiten von Temperatur und Spülmittelchemie bezüglich eines Blockadepotentials am Grenzstrang.

Aufmerksam soll weiterhin darauf gemacht werden, dass das Bildformat aus drucktechnischen Gründen qualitativ von der Monitorabbildung abweicht. Die anatomischen Grenzen erscheinen für die Ergebnisermittlung (siehe Kapitel: Di-

gitale Datenverarbeitung und Bildauswertung) teilweise zu ungenau. Die Flächen wurden jedoch visumanuell vom Monitorbild mit ausreichend hoher Abbildungsschärfe ermittelt.

## 5.4 Vorstellung weiterer Themen aus dem Formenkreis sympathischer Dysfunktion

### 5.4.1 Schmerzmedizinische Relevanz von Sympathikusverletzungen

Sympathikusverletzungen können auch schmerzmedizinisch relevant werden [8, 43, 44, 50, 75]. Complex regional pain syndrome (CRPS) ist eine Diagnose der eine Gruppe von Krankheitszeichen zugrundeliegt. Diese können u.a. bestehen in Allodynie (Schmerzauslösung durch normalerweise nicht schmerzinduzierende Reize), Hyperalgesie (überschießende Schmerzempfindung auf Schmerzreize), autonome und trophische Veränderungen, und vaso- sowie sudomotorische Veränderungen im Schmerzgebiet. Beginn der Symptome ist innerhalb eines Monats nach dem schädigenden Ereignis.

Konzepte und Taxonomie der autonomen Schmerzsyndrome wurden Anfang der 90er Jahre überarbeitet [33, 91] und von der IASP (International Association for the Study of Pain, der neue Begriff CRPS eingeführt. Der Schirmbegriff CRPS fordert regionalen Schmerz, Sensibilitätsstörungen in der Folge eines schädigenden Ereignis. Weitere Symptome (s.o.) können assoziiert sein. Die Kombination der Befunde übersteigt hierbei das erwartbare Ausmaß der Antwort auf physische Schädigung.

CRPS Typ I (früher: Reflex sympathetic dystrophy, RSD) entwickelt sich normalerweise ohne Nachweis einer definitiven Nervenschädigung. Es ist nicht auf die Ausbreitung eines peripheren Nerven limitiert und offensichtlich unverhältnismäßig zu dem verletzenden Ereignis.

CRPS Typ II (früher: Kausalgie) entwickelt sich normalerweise unmittelbar nach partieller peripherer Nervenverletzung, kann aber im Einzelfall auch noch nach Monaten auftreten. Zumeist sind Medianus-, Ischias-, Tibialis- oder Ulnarisnerv betroffen.

Sympathetically maintained pain (SMP), ist eine Schmerzkomponente (als Bestandteil von CRPS Typ I/II), welche als variables Phänomen bei einer Reihe von Krankheiten assoziiert sein kann. SMP wird durch noradrenerge sympathische Aktivität und zirkulierende Katecholamine unterhalten und kann durch pharmakologische Blockaden oder Provokationstechniken gezeigt werden [63].

Schmerzcharakter beim CRPS wird als brennend, stechend und als einschließend beschrieben. Bei leichter Berührung, Belastung, Temperaturänderung, visuellen oder auditorischen Stimuli sowie nach emotionalem Stress zeigt sich oft eine



Exazerbation. Postoperativ-diagnostisch ist u.a. eine Änderung des Schmerzcharakters zu erfragen, da dieser sich von dem postoperativer 'normaler' Schmerzen unterscheidet. Der Endzustand eines CRPS ist gekennzeichnet durch pergamentartige Haut von blassem Kolorit, Abbau subkutaner Fettreserven, atrophische Muskulatur und Kontrakturen. Osteoporose ist nachweisbar.

### 5.4.2 Mechanismen neuropathischer Schmerzsyndrome

Ein Modell zur Erklärung sympathisch unterhaltener neuropathischer Schmerzsyndrome sieht wie folgt aus: Pathologische Interaktion zwischen sympathischen Efferenzen und nozizeptiven Fasern könnte durch eine periphere Nervenläsion getriggert sein. Sympathikusaktivität und Noradrenalinfreisetzung bewirken somit Schmerzentstehung. In vielen Untersuchungen wird die Möglichkeit erörtert, dass durch mechanische Nervenverletzungen eine chemische Interaktion am (sensibilisierten) afferenten Rezeptor oder am Ort ektoper Reizbildung über den Transmitter Noradrenalin entstehen könnte. Auch hyperaktive Interaktion zwischen sympathischen Nervenenden und C-Faser-Nozizeptoren könnte zahlreiche Frühphase-Symptome erklären. Neben den typischen neuropathischen Symptomen wie Allodynie und Hyperpathie (überschießende Schmerzempfindung auf schmerzhaft Reize) könnten auch vom Sympathikus unabhängige inflammatorische Schmerzen das Bild besonders in der Spätphase überlagern [11, 24]. Denn klinische Erfahrung zeigt, dass Sympathikusblockaden bei der Diagnose CRPS anfänglich gut, später aber nur noch unzureichend wirksam sind. Spätere sekundäre Veränderungen in der zentralen Schmerzverarbeitung könnte die weite Ausbreitung der Symptome bei CRPS, noch lange nachdem die initiale Ursache abgeheilt oder entfernt worden ist, erklären [83]. Die Existenz afferenter Fasern im sympathischen System ist nicht gesichert [88] und als möglicher Grundstein aktueller Erklärungsmodelle wieder verlassen worden. Eine endgültig befriedigende Erklärung der Pathophysiologie des CRPS gibt es noch nicht [12].

### 5.4.3 Immunologische Aspekte der Sympathikusfunktion

Sympathische Interaktion hat aber noch weitere Auswirkungen, was den globalen Anspruch an Einfluss unterstreicht. Publikationen haben die Beteiligung des Sympathikus auch an der Immunmodulation gezeigt. Nervenendigungen sympathischer Neurone sind im Parenchym vieler immunologisch aktiver Organe nachgewiesen worden. Dort besteht enge Nachbarschaft zu Lymphozyten, Monozyten und Makrophagen. Adrenerge Stimulation dieser Rezeptoren kann Veränderungen der Zellproliferation, Zellmigration, der Antikörpersynthese und -freisetzung bewirken. So ist eine maßgebliche Beeinflussung der Entzündungsreaktion gegeben [84].

# Kapitel 6

## Zusammenfassung

Bei Patienten liegt nach ventraler Wirbelsäulenoperation regelmäßig eine Affektion des sympathischen Grenzstranges vor. Thermographie zum Sympathikusmonitoring ist hierbei hervorragend geeignet. Grenzstrangaffektionen zeigen sich klinisch durch eine überwärmte untere Extremität auf der operierten Seite und sind möglicherweise verursacht durch eine Sympathikusblockade. Kausal kommen unterschiedliche mechanische Ereignisse in Betracht sowie möglicherweise eine Blockadeinduktion durch physiologische Kochsalzlösung. Die Folgen einer möglichen Grenzstrangblockade sind erfahrungsgemäß nach etwa sechs Monaten klinisch nicht mehr oder nur noch in geringem Umfang nachweisbar. Der thermographisch messbare Erfolg der Sympathikusblockade findet in Hautfeldern erhöhter Temperatur sein Korrelat. Aufgrund interindividuell variierender nervaler Anatomie werden keine nach Größe und Form reproduzierbaren Hautfelder erhöhter Temperatur gefunden. Für die Existenz von Thermatomen zeigten sich keine Anhaltspunkte.

# Anhang A

## Bezeichnungen für Rohdaten (Legende)

### A.1 Diagnosen

Diagnose	Bezeichnung
1	Fusionen L4/L5 bei unilateralem Zugang
2	Fusionen L5/S1 bei unilateralem Zugang mit thermographischem Befund
3	Fusionen L5/S1 bei unilateralem Zugang ohne thermographischen Befund
4	Fusionen bei unilateralem Zugang (nicht L5/S1-Fusionen)
5	Fusionen mit perivertebralem (beidseitigem) Geschehen

Tabelle Anhang A.1: Diagnosen

## A.2 Kernvariablen

Pat. Daten	Bezeichnung	Dimension
Name	Name des Patienten	
Sex	Geschlecht weiblich=0 männlich=1	
Alter	Alter des Patienten	Jahre [a]
Größe	Größe des Patienten	[cm]
Masse	Körpermasse des Patienten	[kg]
BMI	Body-Mass-Index	[ $kg/cm^2$ ]
Diagnose	siehe oben	
OP-Zugang	1=links, 2=rechts	
IntPOTh	Intervall postpostop. Termographie	Tage [d]

Tabelle Anhang A.2: Kernvariablen

### A.3 Temperaturparameter Fußinnenfläche (präoperativ)

Variablen	Bezeichnung	Dimension
FAM1lin	Fußinnenfläche präop. Messung1 links min Temp.	Grad <i>C</i>
FAM1lean	Fußinnenfläche präop. Messung1 links $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FAM1lax	Fußinnenfläche präop. Messung1 links max. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM2lin	Fußinnenfläche präop. Messung2 links min. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM2lean	Fußinnenfläche präop. Messung2 links $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FAM2lax	Fußinnenfläche präop. Messung2 links max. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM3lin	Fußinnenfläche präop. Messung3 links min. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM3lean	Fußinnenfläche präop. Messung3 links $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FAM3lax	Fußinnenfläche präop. Messung3 links max. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM1rin	Fußinnenfläche präop. Messung1 rechts min. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM1rean	Fußinnenfläche präop. Messung1 rechts $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FAM1rax	Fußinnenfläche präop. Messung1 rechts max. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM2rin	Fußinnenfläche präop. Messung2 rechts min. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM2rean	Fußinnenfläche präop. Messung2 rechts $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FAM2rax	Fußinnenfläche präop. Messung2 rechts max. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM3rin	Fußinnenfläche präop. Messung3 rechts min. Temp.	Grad <i>C</i>
FAM3rean	Fußinnenfläche präop. Messung3 rechts $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FAM3rax	Fußinnenfläche präop. Messung3 rechts max. Temp.	Grad <i>C</i>

Tabelle Anhang A3: Temperaturparameter Fußinnenfläche (präoperativ)

## A.4 Temperaturparameter Fuß, akral (präoperativ)

Variablen	Bezeichnung	Dimension
Z1AM1li	Zeh1 präop. Messung1 links	Grad <i>C</i>
Z2AM1li	Zeh2 präop. Messung1 links	Grad <i>C</i>
Z1AM2li	Zeh1 präop. Messung2 links	Grad <i>C</i>
Z2AM2li	Zeh2 präop. Messung2 links	Grad <i>C</i>
Z1AM3li	Zeh1 präop. Messung3 links	Grad <i>C</i>
Z2AM3li	Zeh2 präop. Messung3 links	Grad <i>C</i>
Z1AM1re	Zeh1 präop. Messung1 rechts	Grad <i>C</i>
Z2AM1re	Zeh2 präop. Messung1 rechts	Grad <i>C</i>
Z1AM2re	Zeh1 präop. Messung2 rechts	Grad <i>C</i>
Z2AM2re	Zeh2 präop. Messung2 rechts	Grad <i>C</i>
Z1AM3re	Zeh1 präop. Messung3 rechts	Grad <i>C</i>
Z2AM3re	Zeh2 präop. Messung3 rechts	Grad <i>C</i>
FerAM1li	Ferse präop. Messung1 links	Grad <i>C</i>
FerAM2li	Ferse präop. Messung2 links	Grad <i>C</i>
FerAM3li	Ferse präop. Messung3 links	Grad <i>C</i>
FerAM1re	Ferse präop. Messung1 rechts	Grad <i>C</i>
FerAM2re	Ferse präop. Messung2 rechts	Grad <i>C</i>
FerAM3re	Ferse präop. Messung3 rechts	Grad <i>C</i>

Tabelle Anhang A4: Temperaturparameter Fuß, akral (präoperativ)

## A.5 Temperaturparameter Fußinnenfläche (postoperativ)

Variablen	Bezeichnung	Dimension
FOM1lin	Fußinnenfläche postop. Messung1 links min. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM1lean	Fußinnenfläche postop. Messung1 links $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FOM1lax	Fußinnenfläche postop. Messung1 links max. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM2lin	Fußinnenfläche postop. Messung2 links min. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM2lean	Fußinnenfläche postop. Messung2 links $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FOM2lax	Fußinnenfläche postop. Messung2 links max. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM3lin	Fußinnenfläche postop. Messung3 links min. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM3lean	Fußinnenfläche postop. Messung3 links $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FOM3lax	Fußinnenfläche postop. Messung3 links max. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM1rin	Fußinnenfläche postop. Messung1 rechts min. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM1rean	Fußinnenfläche postop. Messung1 rechts $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FOM1rax	Fußinnenfläche postop. Messung1 rechts max. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM2rin	Fußinnenfläche postop. Messung2 rechts min. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM2rean	Fußinnenfläche postop. Messung2 rechts $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FOM2rax	Fußinnenfläche postop. Messung2 rechts max. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM3rin	Fußinnenfläche postop. Messung3 rechts min. Temp.	Grad <i>C</i>
FOM3rean	Fußinnenfläche postop. Messung3 rechts $\emptyset$ Temp.	Grad <i>C</i>
FOM3rax	Fußinnenfläche postop. Messung3 rechts max. Temp.	Grad <i>C</i>

Tabelle Anhang A5: Temperaturparameter Fußinnenfläche (postoperativ)

## A.6 Temperaturparameter Fuß, akral (postoperativ)

Variablen	Bezeichnung	Dimension
Z1OM1li	Zeh1 postop. Messung1 links	Grad <i>C</i>
Z2OM1li	Zeh2 postop. Messung1 links	Grad <i>C</i>
Z1OM2li	Zeh1 postop. Messung2 links	Grad <i>C</i>
Z2OM2li	Zeh2 postop. Messung2 links	Grad <i>C</i>
Z1OM3li	Zeh1 postop. Messung3 links	Grad <i>C</i>
Z2OM3li	Zeh2 postop. Messung3 links	Grad <i>C</i>
Z1OM1re	Zeh1 postop. Messung1 rechts	Grad <i>C</i>
Z2OM1re	Zeh2 postop. Messung1 rechts	Grad <i>C</i>
Z1OM2re	Zeh1 postop. Messung2 rechts	Grad <i>C</i>
Z2OM2re	Zeh2 postop. Messung2 rechts	Grad <i>C</i>
Z1OM3re	Zeh1 postop. Messung3 rechts	Grad <i>C</i>
Z2OM3re	Zeh2 postop. Messung3 rechts	Grad <i>C</i>
FerOM1li	Ferse postop. Messung1 links	Grad <i>C</i>
FerOM2li	Ferse postop. Messung2 links	Grad <i>C</i>
FerOM3li	Ferse postop. Messung3 links	Grad <i>C</i>
FerOM1re	Ferse postop. Messung1 rechts	Grad <i>C</i>
FerOM2re	Ferse postop. Messung2 rechts	Grad <i>C</i>
FerOM3re	Ferse postop. Messung3 rechts	Grad <i>C</i>

Tabelle Anhang A6: Temperaturparameter Fuß, akral (postoperativ)



# Anhang B

## Werte für Rohdaten

### B.1 Werte für Rohdaten I

Pat.-Nr.	Alter	Größe	Masse	BMI	Diagnose	OP-Zugang	IntPOTh
1	40	167	61	21,87	1	1	1
2	58	160	47	18,36	1	1	1
3	66	166	75	27,22	1	1	9
4	34	172	59	19,94	1	1	14
5	39	157	65	26,37	1	1	14
6	65	165	65	23,88	1	1	5
7	51	165	86	31,59	1	1	8
8	59	180	99	30,56	1	1	8
9	43	173	69	23,05	2	1	13
10	50	181	72	21,98	2	1	9
11	48	176	77	24,86	2	2	18
13	35	174	71	23,45	2	2	9
14	39	172	75	25,35	3	1	6
15	21	181	75	22,89	3	1	12
16	56	165	85	31,22	3	2	13

Tabelle Anhang B.1: Werte für Rohdaten I

Werte für Rohdaten I (Fortsetzung)

Pat.-Nr.	Alter	Größe	Masse	BMI	Diagnose	OP-Zugang	IntPOTh
17	48	168	73	25,86	3	2	12
19	61	165	63	23,14	4	1	14
21	44	167	54	19,36	4	1	12
22	68	151	68	29,82	4	1	7
23	52	167	82	29,40	4	1	9
24	40	168	82	29,05	4	1	4
25	15	175	52	16,98	4	1	8
26	65	185	90	26,30	4	1	33
27	43	165	75	27,55	4	2	6
29	15	170	65	22,49	5	1	10
30	66	174	75	24,77	5	2	17
33	44	156	72	29,59	5	2	5
34	19	176	76	24,54	5	2	9
35	70	178	84	26,51	5	2	19
37	21	180	70	21,60	5	2	11
41	48	176	67	21,63	5	2	8

Tabelle Anhang B.1 (Fortsetzung): Werte für Rohdaten I

## B.2 Werte für Rohdaten II

Pat.-Nr.	FAM1lin	FAM1lean	FAM1lax	FAM2lin	FAM2lean	FAM2lax
1			ausgeschlossen			
2	22,4	27,6	31,8	22,4	27,5	31,8
3	26,5	29,2	31,3	26,4	29,2	31,3
4			ausgeschlossen			
5	24,8	30,9	33,0	24,8	30,9	33,0
6	26,6	30,9	33,4	26,6	30,9	33,4
7	24,6	27,6	29,8	24,6	27,6	29,8
8	24,2	28,7	31,7	24,2	28,8	31,7
9	21,7	25,8	28,5	21,7	25,9	28,5
10	22,2	28,0	31,7	22,2	28,0	31,7
11			ausgeschlossen			
13	22,3	27,1	30,6	22,4	27,0	30,6
14	25,0	29,1	32,6	25,0	29,1	32,6
15	23,0	27,4	30,7	23,0	27,4	30,7
16	25,4	29,3	32,0	26,0	29,3	32,0
17	28,1	31,2	32,8	28,2	31,2	32,8
19			ausgeschlossen			
21	22,9	27,1	31,1	22,9	27,2	31,1
22	23,6	28,8	32,1	23,3	28,9	32,1
23			ausgeschlossen			
24	27,3	32,2	33,3	29,3	32,2	33,3
25			ausgeschlossen			
26			ausgeschlossen			
27			ausgeschlossen			
29	21,1	26,9	30,3	21,1	26,8	30,3
30	27,5	32,6	34,0	28,2	32,7	34,0
33	27,1	32,0	33,5	27,7	32,1	33,5
34	22,6	27,8	30,8	22,7	27,8	30,8
35	25,2	28,8	30,8	25,2	28,7	30,8
37	25,1	31,1	33,4	25,2	31,2	33,4
41			ausgeschlossen			

Tabelle Anhang B.2: Werte für Rohdaten II

**B.3 Werte für Rohdaten III**

Pat.-Nr.	FAM3lin	FAM3lean	FAM3lax	FAM1rin	FAM1rean	FAM1rax
1			ausgeschlossen			
2	22,4	27,5	31,8	22,2	26,5	30,8
3	26,3	29,2	31,2	26,1	29,6	31,6
4			ausgeschlossen			
5	24,1	30,9	33,0	25,0	30,8	32,4
6	26,5	30,9	33,4	28,0	32,2	34,2
7	24,7	27,6	29,8	25,6	28,4	30,6
8	24,6	28,7	31,7	23,7	28,9	31,3
9	21,7	25,8	28,5	21,7	25,8	28,4
10	22,2	28,0	31,7	22,6	27,8	31,6
11			ausgeschlossen			
13	22,3	27,0	30,6	21,9	26,9	29,9
14	25,1	29,1	32,6	25,3	29,1	32,4
15	23,0	27,4	30,7	22,3	27,6	30,6
16	26,0	29,3	32,0	25,8	29,6	32,8
17	28,2	31,2	32,8	28,6	31,8	33,2
19			ausgeschlossen			
21	22,9	27,2	31,1	23,0	27,0	30,9
22	23,6	28,9	32,1	20,0	28,6	32,1
23			ausgeschlossen			
24	29,1	32,2	33,3	28,0	32,4	33,5
25			ausgeschlossen			
26			ausgeschlossen			
27			ausgeschlossen			
29	21,1	26,8	30,3	20,9	26,5	29,5
30	28,5	32,7	34,0	28,7	32,3	33,8
33	27,7	32,0	33,5	27,7	32,3	33,7
34	22,7	27,8	30,8	22,5	27,1	30,3
35	25,2	28,7	30,8	25,0	29,3	31,5
37	25,1	31,1	33,4	25,4	31,0	33,1
41			ausgeschlossen			

Tabelle Anhang B.3: Werte für Rohdaten III

## B.4 Werte für Rohdaten IV

Pat.-Nr.	FAM2rin	FAM2rean	FAM2rax	FAM3rin	FAM3rean	FAM3rax
1			ausgeschlossen			
2	22,2	26,5	30,8	22,2	26,5	30,8
3	26,4	29,6	31,6	26,2	29,5	31,6
4			ausgeschlossen			
5	24,3	30,7	32,4	24,3	30,8	32,4
6	28,0	32,2	34,2	28,4	32,2	34,2
7	25,6	28,4	30,6	25,9	28,4	30,6
8	24,0	28,9	31,3	23,9	28,9	31,3
9	21,7	25,7	28,4	21,7	25,8	28,4
10	22,6	27,8	31,6	22,6	27,8	31,6
11			ausgeschlossen			
13	21,9	26,9	29,9	21,9	26,9	29,9
14	24,8	29,0	32,4	25,4	29,1	32,4
15	22,3	27,7	30,6	22,3	27,7	30,6
16	26,3	29,6	32,8	26,1	29,6	32,8
17	28,9	31,8	33,2	28,8	31,8	33,2
19			ausgeschlossen			
21	23,0	27,0	30,9	23,0	27,1	30,9
22	20,0	28,8	32,1	20,0	28,6	32,1
23			ausgeschlossen			
24	29,2	32,4	33,5	28,0	32,4	33,5
25			ausgeschlossen			
26			ausgeschlossen			
27			ausgeschlossen			
29	20,9	26,5	29,5	20,9	26,5	29,5
30	26,8	32,2	33,8	27,8	32,2	33,8
33	28,2	32,3	33,7	28,1	32,3	33,7
34	22,3	27,0	30,3	22,3	27,1	30,3
35	25,3	29,3	31,5	26,0	29,3	31,5
37	25,8	31,0	33,1	25,6	31,0	33,1
41			ausgeschlossen			

Tabelle Anhang B.4: Werte für Rohdaten IV

### B.5 Werte für Rohdaten V

Pat.-Nr.	Z1AM1li	Z2AM1li	Z1AM2li	Z2AM2li	Z1AM3li	Z2AM3li
1			ausgeschlossen			
2	26,6	22,8	26,0	22,7	26,8	22,8
3	28,5	28,1	28,8	28,1	28,5	28,2
4			ausgeschlossen			
5	32,4	32,0	32,8	31,4	33,0	31,8
6	28,1	27,4	28,1	27,4	28,1	27,3
7	26,2	25,7	25,9	25,8	26,2	25,8
8	27,8	25,3	27,9	25,7	27,9	25,7
9	23,2	22,2	23,2	22,5	23,0	22,1
10	24,1	23,0	23,8	23,0	23,8	23,0
11			ausgeschlossen			
13	24,3	23,1	24,2	23,1	24,3	23,1
14	26,4	25,7	26,3	25,7	26,5	25,3
15	23,8	23,4	23,6	23,4	23,6	23,3
16	29,9	28,5	29,7	27,9	29,9	28,1
17	32,1	29,9	32,2	29,8	32,3	29,8
19			ausgeschlossen			
21	24,3	23,5	24,3	23,7	24,3	23,7
22	24,4	25,0	25,0	24,7	24,4	24,8
23			ausgeschlossen			
24	33,3	32,3	33,3	32,3	33,1	32,3
25			ausgeschlossen			
26			ausgeschlossen			
27			ausgeschlossen			
29	22,6	21,9	22,9	22,1	22,9	22,1
30	31,7	32,1	32,1	31,7	32,1	32,0
33	33,0	32,4	33,1	32,1	33,0	32,4
34	28,7	24,4	28,7	24,6	28,7	24,5
35	27,1	25,9	27,4	25,9	27,1	25,9
37	32,2	29,0	32,4	29,0	32,3	29,3
41			ausgeschlossen			

Tabelle Anhang B.5: Werte für Rohdaten V

**B.6 Werte für Rohdaten VI**

Pat.-Nr.	Z1AM1re	Z2AM1re	Z1AM2re	Z2AM2re	Z1AM3re	Z2AM3re
1			ausgeschlossen			
2	23,8	23,8	23,8	24,2	23,9	23,9
3	28,5	28,7	28,6	28,7	28,4	28,4
4			ausgeschlossen			
5	31,5	31,1	31,8	30,8	31,8	31,2
6	30,6	30,0	30,4	30,0	30,4	30,0
7	27,4	27,0	27,4	27,5	27,4	27,0
8	26,6	25,0	26,5	25,2	26,6	25,0
9	22,9	22,3	22,8	22,3	22,8	23,0
10	25,2	23,6	25,3	23,6	25,2	23,6
11			ausgeschlossen			
13	24,0	22,7	24,3	22,8	24,0	23,0
14	26,5	25,9	26,4	26,0	26,5	26,0
15	23,2	23,2	23,4	23,5	23,9	23,5
16	28,8	28,7	29,5	29,1	29,8	29,1
17	32,9	31,6	32,7	31,7	32,7	31,7
19			ausgeschlossen			
21	24,3	23,7	24,3	23,7	24,3	23,7
22	24,3	23,7	24,4	23,8	24,6	24,3
23			ausgeschlossen			
24	32,8	32,0	32,8	32,1	32,8	32,0
25			ausgeschlossen			
26			ausgeschlossen			
27			ausgeschlossen			
29	22,2	22,2	22,2	21,8	22,2	22,2
30	31,9	31,1	32,0	31,0	31,8	30,9
33	33,4	31,9	33,4	32,0	33,7	32,0
34	24,5	23,5	24,8	23,1	25,0	23,5
35	28,5	27,5	28,5	27,3	28,5	27,3
37	32,6	28,2	32,5	28,4	32,5	28,1
41			ausgeschlossen			

Tabelle Anhang B.6: Werte für Rohdaten VI

**B.7 Werte für Rohdaten VII**

Pat.-Nr.	FerAM1li	FerAM2li	FerAM3li	FerAM1re	FerAM2re	FerAM3re
1			ausgeschlossen			
2	25,0	24,8	24,6	25,1	25,0	24,9
3	27,4	27,1	27,2	28,3	28,3	28,1
4			ausgeschlossen			
5	26,4	26,0	25,6	28,0	27,7	28,0
6	28,7	28,8	28,6	29,9	29,9	29,9
7	26,6	26,9	26,6	26,6	27,2	26,6
8	26,5	26,4	26,5	26,3	26,5	26,5
9	24,5	24,3	24,4	24,7	24,9	24,3
10	27,0	26,8	26,8	26,6	26,6	26,6
11			ausgeschlossen			
13	24,8	25,0	25,0	24,8	25,0	25,0
14	28,0	28,0	28,1	27,8	27,8	27,7
15	23,8	23,8	23,8	23,1	23,1	23,4
16	27,7	28,4	28,5	28,1	27,8	27,7
17	30,1	30,2	30,2	29,7	29,4	29,6
19			ausgeschlossen			
21	26,6	26,7	26,7	26,5	26,5	26,5
22	25,2	25,4	25,3	25,4	25,6	25,7
23			ausgeschlossen			
24	30,9	30,9	30,9	30,5	30,6	30,5
25			ausgeschlossen			
26			ausgeschlossen			
27			ausgeschlossen			
29	22,5	26,1	25,9	26,1	26,1	26,1
30	31,7	31,8	31,6	31,4	26,1	31,4
33	28,2	28,4	28,1	27,1	26,1	27,4
34	22,8	22,4	22,9	23,3	26,1	23,3
35	26,6	26,9	26,8	27,6	26,1	27,6
37	28,1	27,1	27,1	27,0	26,1	26,6
41			ausgeschlossen			

Tabelle Anhang B.7: Werte für Rohdaten VII



**B.8 Werte für Rohdaten VIII**

Pat.-Nr.	FOM1lin	FOM1lean	FOM1lax	FOM2lin	FOM2lean	FOM2lax
1	26,0	32,5	34,2	24,9	32,5	34,2
2	25,0	30,4	32,2	27,5	30,5	32,2
3	29,7	32,8	35,8	28,1	32,8	35,8
4	26,4	30,9	32,7	24,0	30,9	32,7
5	25,6	30,8	32,9	25,1	30,7	32,9
6	29,7	33,6	35,0	29,7	33,6	35,0
7	27,8	32,7	35,1	26,6	32,7	35,1
8	28,7	33,4	35,0	30,0	33,5	35,0
9	30,5	33,3	34,8	31,0	33,3	34,8
10	26,6	32,6	33,7	27,2	32,4	33,7
11	25,0	29,1	30,9	25,6	29,2	30,9
13	23,2	28,5	31,4	23,2	28,5	31,4
14	25,3	28,7	31,9	25,3	28,6	31,9
15	21,1	28,3	32,6	23,2	28,7	32,6
16	26,9	31,3	33,4	26,7	31,2	33,4
17	25,8	31,3	33,9	25,7	31,3	33,9
19	27,8	31,5	32,8	25,0	31,5	32,8
21	26,9	31,5	33,1	24,6	31,5	33,1
22	31,1	33,9	35,3	31,3	33,9	35,3
23	25,2	29,1	32,6	25,0	29,1	32,6
24	28,8	33,1	34,6	30,4	33,1	34,6
25	26,7	31,4	32,7	26,3	31,5	32,7
26	25,9	30,5	32,0	25,1	30,5	32,0
27	24,9	29,0	31,6	24,9	29,0	31,6
29	27,8	32,9	34,0	26,7	32,9	34,0
30	26,4	31,9	33,6	26,6	31,9	33,6
33	26,0	30,2	32,5	26,2	30,2	32,5
34	23,8	30,0	32,6	23,8	30,0	32,6
35	24,2	28,1	31,2	25,2	28,3	31,2
37	27,0	32,8	34,4	27,2	32,8	34,4
41	27,2	30,8	33,2	26,5	30,8	33,2

Tabelle Anhang B.8: Werte für Rohdaten VIII

**B.9 Werte für Rohdaten IX**

Pat.-Nr.	FOM3lin	FOM3lean	FOM3lax	FOM1rin	FOM1rean	FOM1rax
1	24,9	32,6	34,2	22,7	27,9	31,8
2	25,0	30,4	32,2	21,4	25,7	28,8
3	28,5	32,8	35,8	26,3	30,0	33,3
4	26,4	31,0	32,7	21,8	25,9	28,3
5	25,4	30,7	32,9	21,1	25,8	29,6
6	30,3	33,7	35,0	25,6	30,0	32,6
7	26,1	32,7	35,1	21,9	27,5	30,9
8	30,3	33,5	35,0	24,5	28,8	32,1
9	30,5	33,3	34,8	28,9	32,0	33,4
10	28,3	32,3	33,7	23,0	28,7	31,8
11	22,9	29,1	30,9	22,1	26,2	29,6
13	23,1	28,4	31,4	25,0	30,5	33,2
14	24,7	28,6	31,9	25,2	28,7	31,9
15	23,2	28,7	32,6	20,6	28,4	33,7
16	27,2	31,3	33,4	28,1	31,7	33,3
17	27,4	31,3	33,9	26,6	31,3	34,6
19	28,4	31,5	32,8	26,4	30,3	31,5
21	26,2	31,5	33,1	24,3	28,5	31,4
22	31,9	33,9	35,3	26,7	31,1	33,7
23	24,9	29,1	32,6	22,7	24,7	26,5
24	26,6	32,2	34,6	25,9	31,8	33,4
25	28,4	31,5	32,7	24,8	28,9	31,1
26	25,0	30,5	32,0	22,9	26,8	29,8
27	24,9	28,9	31,6	30,6	33,0	34,1
29	27,8	32,9	34,0	27,8	32,7	33,7
30	36,8	32,0	33,6	26,0	32,5	34,6
33	26,0	30,2	32,5	26,7	31,1	33,0
34	23,6	30,1	32,6	25,5	30,0	32,3
35	25,0	28,1	31,2	24,8	28,7	31,8
37	27,0	32,9	34,4	28,5	33,0	34,3
41	26,6	30,8	33,2	25,5	30,9	34,6

Tabelle Anhang B.9: Werte für Rohdaten IX

**B.10 Werte für Rohdaten X**

Pat.-Nr.	FOM2rin	FOM2rean	FOM2rax	FOM3rin	FOM3rean	FOM3rax
1	22,7	27,9	31,8	22,7	28,0	31,8
2	21,6	25,8	28,8	21,6	25,7	28,8
3	26,3	30,0	33,3	26,9	30,1	33,3
4	21,8	25,9	28,3	21,8	25,6	28,1
5	21,1	25,8	29,6	21,1	25,7	29,6
6	26,0	30,0	32,6	25,9	30,0	32,6
7	21,9	27,6	30,9	21,9	27,6	30,9
8	24,5	28,9	32,1	24,5	28,9	32,1
9	27,9	32,0	33,4	27,8	32,0	33,4
10	22,9	28,6	31,8	23,0	28,7	31,8
11	22,3	26,3	29,6	22,1	26,3	29,6
13	25,2	30,5	33,2	26,2	30,5	33,2
14	25,2	28,7	31,9	25,2	28,7	31,9
15	22,5	29,0	33,7	24,1	29,1	33,7
16	29,0	31,7	33,3	28,1	31,6	33,3
17	26,1	31,3	34,6	26,8	31,4	34,6
19	24,1	30,2	31,5	27,6	30,2	31,5
21	23,6	28,5	31,4	24,4	28,6	31,4
22	26,9	30,9	33,7	27,1	31,0	33,7
23	22,7	24,7	26,5	22,7	24,6	26,3
24	28,5	31,8	33,4	27,4	31,8	33,4
25	24,6	28,8	31,1	24,4	28,8	31,1
26	22,9	26,9	29,8	22,9	26,9	29,8
27	30,8	33,0	34,1	30,8	33,0	34,1
29	28,1	32,7	33,7	28,7	32,7	33,7
30	27,0	32,5	34,6	27,7	32,5	34,6
33	26,7	31,0	33,0	25,9	31,0	33,0
34	25,5	30,0	32,3	23,7	30,0	32,3
35	24,8	28,9	31,8	24,8	28,5	31,8
37	27,2	33,0	34,3	27,7	33,0	34,3
41	26,6	30,9	34,6	25,5	30,9	34,6

Tabelle Anhang B.10: Werte für Rohdaten X

**B.11 Werte für Rohdaten XI**

Pat.-Nr.	Z1OM1li	Z2OM1li	Z1OM2li	Z2OM2li	Z1OM3li	Z2OM3li
1	33,7	33,4	33,7	33,3	33,5	33,3
2	32,1	31,3	32,0	30,9	31,6	30,9
3	33,9	32,7	33,5	33,3	33,5	32,9
4	32,1	32,0	32,3	32,0	32,5	32,0
5	31,5	31,8	31,6	32,0	31,0	32,0
6	33,8	33,8	34,1	33,7	34,1	33,5
7	32,4	32,2	34,0	32,9	33,2	32,7
8	34,0	33,8	34,2	33,6	34,2	33,7
9	34,0	33,7	34,0	33,7	33,9	33,7
10	33,0	33,0	32,9	32,8	32,8	33,0
11	29,9	29,8	29,4	29,8	29,2	29,8
13	24,5	24,9	24,5	24,8	24,6	24,9
14	26,6	26,4	26,6	26,1	26,6	26,1
15	24,9	25,7	24,2	25,8	24,7	25,2
16	32,4	31,9	32,4	31,9	32,6	32,1
17	31,5	28,2	30,9	29,1	31,8	29,5
19	32,2	31,7	32,2	31,3	32,3	31,7
21	30,8	30,9	30,8	30,8	30,8	30,8
22	34,0	34,0	33,9	34,0	33,9	34,0
23	31,6	32,2	32,0	32,0	32,0	32,0
24	33,9	33,9	33,8	33,9	34,0	34,0
25	32,0	31,1	31,9	31,4	31,9	31,0
26	30,5	30,8	30,4	31,0	30,4	30,8
27	26,1	25,4	26,0	25,4	26,1	25,1
29	33,4	33,3	33,4	33,5	33,3	33,3
30	32,2	31,0	32,2	30,8	32,1	31,2
33	28,3	27,2	27,8	27,4	28,5	27,4
34	27,5	30,8	27,6	30,8	28,1	30,8
35	27,4	26,5	27,0	26,5	26,6	25,8
37	33,2	33,1	33,4	33,4	33,2	33,3
41	30,9	30,5	30,2	29,9	31,4	29,9

Tabelle Anhang B.11: Werte für Rohdaten XI

**B.12 Werte für Rohdaten XII**

Pat.-Nr.	Z1OM1re	Z2OM1re	Z1OM2re	Z2OM2re	Z1OM3re	Z2OM3re
1	25,4	24,5	25,4	24,4	25,4	24,5
2	23,0	22,3	23,0	22,2	23,1	22,2
3	28,8	29,2	29,4	28,2	28,8	30,1
4	22,4	23,4	22,4	22,9	22,7	22,9
5	22,7	21,9	22,7	22,0	22,3	21,9
6	27,5	27,1	27,5	27,2	27,6	27,2
7	26,3	23,7	26,0	24,9	26,5	24,2
8	26,7	26,0	26,4	26,0	26,6	25,7
9	33,0	32,1	33,1	32,2	33,1	32,2
10	26,1	24,2	26,1	24,1	26,1	24,1
11	24,3	23,4	24,8	23,5	24,6	23,8
13	29,9	30,0	30,0	30,2	29,8	30,2
14	26,7	26,3	26,3	26,0	26,0	26,0
15	26,1	26,6	26,1	25,5	26,1	24,4
16	32,2	31,4	32,2	31,3	32,2	31,7
17	32,2	29,9	31,5	29,8	32,0	29,8
19	31,0	30,0	31,0	30,0	31,0	30,0
21	25,4	25,0	25,6	25,0	25,5	25,8
22	28,0	27,9	27,9	28,0	28,0	27,9
23	23,8	23,9	23,9	23,9	23,8	23,9
24	30,7	30,6	30,7	30,4	30,5	30,4
25	27,5	26,1	26,4	26,1	26,4	26,2
26	24,6	23,8	24,8	24,1	24,8	24,1
27	34,0	33,3	33,8	33,3	34,0	33,4
29	33,2	33,3	33,4	33,3	33,4	33,2
30	33,3	32,7	33,3	32,9	33,7	32,9
33	30,8	29,2	30,8	29,1	30,8	29,5
34	30,6	29,8	30,8	29,8	30,0	30,1
35	26,7	26,6	27,2	26,4	26,1	26,4
37	33,7	33,2	33,7	33,5	33,9	33,3
41	31,5	30,6	30,3	30,9	30,9	30,6

Tabelle Anhang B.12: Werte für Rohdaten XII

**B.13 Werte für Rohdaten XIII**

Pat.-Nr.	FerOM1li	FerOM2li	FerOM3li	FerOM1re	FerOM2re	FerOM3re
1	30,9	31,1	31,1	26,6	26,7	26,8
2	25,8	26,0	26,0	23,4	23,5	23,7
3	31,1	31,1	32,0	27,2	27,2	28,1
4	30,8	30,8	30,9	25,7	25,7	25,9
5	26,8	26,6	26,6	23,8	23,8	23,9
6	31,7	31,7	31,7	28,7	28,8	28,9
7	32,2	31,1	32,0	24,6	23,9	24,7
8	33,1	33,5	33,6	26,6	26,6	27,1
9	32,8	32,8	32,8	28,8	29,1	28,9
10	32,0	32,0	32,1	24,0	24,3	24,0
11	33,9	33,7	33,9	33,0	33,0	33,0
13	29,1	29,1	29,2	32,2	32,9	32,8
14	28,3	28,4	28,5	27,8	27,7	27,7
15	26,8	27,4	25,8	27,1	26,8	26,8
16	26,7	26,7	26,6	29,3	29,1	29,1
17	31,3	30,9	29,8	30,2	30,6	31,0
19	30,3	30,3	30,3	28,5	28,5	28,7
21	31,3	31,3	31,3	27,8	27,7	27,7
22	30,1	30,2	30,1	28,7	28,6	28,7
23	26,8	26,9	26,9	25,0	25,0	24,8
24	29,2	29,6	28,8	26,3	26,7	26,5
25	32,7	32,4	32,4	28,6	28,6	28,6
26	25,7	25,6	25,6	24,1	23,8	24,1
27	28,2	28,4	28,3	32,4	32,6	32,6
29	32,6	32,7	32,7	32,0	32,1	32,1
30	30,2	29,7	30,0	30,1	30,0	29,9
33	27,9	28,0	28,2	28,2	28,2	28,2
34	29,4	29,5	29,6	28,9	29,4	29,4
35	27,7	27,7	27,7	27,2	27,2	27,1
37	32,2	32,0	32,1	32,5	32,5	32,6
41	29,0	28,1	28,1	27,9	27,9	28,5

Tabelle Anhang B.13: Werte für Rohdaten XIII

# Anhang C

## Daten Umverteilungsphänomen

Pt.	FAMleanMW	FOMleanMW	FAMreanMW	FOMranMW	Befund
1		32,5		27,9	4
2	27,5	30,4	26,5	25,7	1
3	29,2	32,8	29,6	30,0	2
4		30,9		25,8	4
5	30,9	30,7	30,8	25,8	3
6	30,9	33,6	32,2	30,0	1
7	27,6	32,7	28,4	27,6	1
8	28,7	33,5	28,9	28,9	2
9	25,8	33,3	25,8	32,0	2
10	28,0	32,4	27,8	28,7	2
11		29,1		26,3	4
13	27,0	28,5	26,9	30,5	2
14	29,1	28,6	29,1	28,7	3
15	27,4	28,6	27,7	28,8	2
16	29,3	31,3	29,6	31,7	2
17	31,2	31,3	31,8	31,3	1
19		31,5		30,2	4
21	27,2	31,5	27,0	28,5	2
22	28,9	33,9	28,7	31,0	2
23		29,1		24,7	4
24	32,2	32,8	32,4	31,8	1

Tabelle Anhang C: Datenvergleich prä- vs. postoperativ links  
und prä- vs. postoperativ rechts

Daten Umverteilungsphänomen (Fortsetzung)

Pt.	FAMleanMW	FOMlenMW	FAMreanMW	FOMreanMW	Befund
25		31,5		28,8	4
26		30,5		26,9	4
27		29,0		33,0	4
29	26,8	32,9	26,5	32,7	2
30	32,7	31,9	32,2	32,5	5
33	32,0	30,2	32,3	31,0	3
34	27,8	30,0	27,1	30,0	2
35	28,7	28,2	29,3	28,7	3
37	31,1	32,8	31,0	33,0	2
41		30,8		30,9	4

Tabelle Anhang C (Fortsetzung): Datenvergleich prä- vs. postoperativ links und prä- vs. postoperativ rechts

	Befund
1	Positives Umverteilungsphänomen
2	Fehlendes Umverteilungsphänomen
3	Beidseitige Abkühlung
4	Fehlende Beurteilbarkeit
5	Inverses Umverteilungsphänomen

Befundlegende zu Tabelle Anhang C



# Anhang D

## Protokoll intraoperativer Ereignisse mit signifikantem Temperatursprung

Nr.	Ereignis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1a	Hyperthermie OP-seitig prä-inzisionem								x		
1b	Isothermie OP-seitig prä-inzisionem	x	x	x	x	x		x		x	x
2a	Kontralaterale Überwärmung während Inzision u./o. Subkutanpräparation	x	x		x		x		x	x	x
2b	oder Abkühlung ipsilateral									x	x
2c	Abkühlung kontralateral			x							
3a	Bei Laparotomie: Ipsilat. Abkühlung und kontralat. Erwärmung (inverses Umverteilungsphänomen)								x		
3b	Fortgeschritt. Peritonealpräp.: bds. Erwärmung kontralat. > ipsilateral								x		
3c	oder ipsilateral Abkühlung									x	x
4a	Peritonealverletzung und Übernähung:										
4b	Ipsilateral hyperthermiert								x		
5a	Präparation Grenzstrangnähe: Ipsilat. Erwärmung										
5b	Mechanische Manipulation (Druck) des sichtbaren Grenzstranges:										
	Ipsilaterale Erwärmung	x		x	x		x		x		
5c	oder kontralaterale Abkühlung						x				
5d	Mechanische Dehnung bei räumlicher Verlagerung des Grenzstranges:										
	Ipsilaterale Abkühlung			x			x				
6a	NaCl-Spülung des Grenzstranges:										
	Ipsilaterale Erwärmung			x	x		x				
6b	2. NaCl-Spülung:										
	abgeschwächte ipsilat. Erwärmung			x	x						
6c	3. NaCl-Spülung: kein Temperatursprung			x							
7a	Bandscheibeninzision: Ipsilat. Abkühl.			x	x	x	x			x	x
7b	Bandscheibenresektion:Ipsilat. Abkühl.			x	x	x	x				x

Tabelle Anhang D: Protokoll intraoperativer Ereignisse

Protokoll intraoperativer Ereignisse (Fortsetzung):

Nr.	Ereignis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8a	Deckplattenresektion: bds. Abkühlung ipsilateral > kontralateral			x	x		x		x		x
8b	Spaneinschlag: Ipsilateral Abkühlung			x							x
8c	oder ipsilaterale Erwärmung										
8d	Schraubeneindrehen: Kontralat. Erwärm.						x				
9a	Gefäßverletzung kontralat. (li V. iliaca com. bei OP rechtsseitig): Hyperthermie OP-seitig									x	
9b	Gefäßnaht: Hyperthermie linksseitig									x	
10a	Naht der oberfl. Rückenfaszie: kontralaterale Erwärmung oder		x	x	x	x			x		
10b	Isothermie (Trend ipsilat. Erwärmung)	x									x
11a	Nach Hautnaht: Kontralat. Hyperthermie	x	x	x	x	x			x		x
11b	oder Isothermie der Fußsohlen	x									
12a	Nach NaCl-Spülung: Protrahierter kontralateraler Temperaturanstieg nach ipsilateraler Soforthyperthermie	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabelle Anhang D (Fortsetzung): Protokoll intraoperativer Ereignisse

Die Nummerierung horizontal in der ersten Tabellenzeile beschreibt die Individuen der Patientengruppe 6. Der Patient P1 der Intraop-Gruppe entspricht Patient UM24 des im Ergebniskapitel beschriebenen Patientenguts. Ferner entspricht P2 HK22 ; P3 HS23 ; P4 MR25 ; P5 HW29 ; P6 MP30 P7 HP35 ; P8 BN34 ; P9 SH41 P10 NL37.

Die vertikale Nummerierung listet die intraoperativen Ereignisse.

## Anhang E

### Kohorte Notfallpatienten (nur postoperativ thermographiert)

Nr.	Patient	Geschlecht	Alter
1	MB	f	40
3	ID	f	61
4	UP	f	52
5	SS	f	15
7	FF	f	43
13	IL	f	34
19	HS	m	48
35	HP	m	65
41	SH	f	48

Tabelle Anhang E: Notfallpatienten

# Anhang F

## Präoperativer Fragebogen

Nr.	Patient	Sex	Dauer der Rückenbeschwerden [Monate]	Brenn-Schmerz	Sonstige sensible Symptome	Bein-temp. Diff. [subj.]	VAS [aus 10] Rücken
1	MB	f	84	-	-	-	10
2	UD	f	120	-	-	-	8
3	ID	f	36	-	-	-	10
4	UP	f	2	-	-	-	9
5	SS	f	36	-	-	-	6
6	WS	m	24	-	-	-	7
7	FF	f	84	-	-	-	6
8	MS	f	4	-	-	-	10
9	ER	f	12	-	-	-	2
10	AS	m	6	-	-	-	7
11	AS	f	180	-	-	-	9
13	IL	f	24	-	-	-	10
14	GB	f	60	-	-	-	8
15	DS	m	48	-	-	-	6
16	NW	m	48	-	-	-	7

Tabelle Anhang F: Präoperativer Fragebogen

Präoperativer Fragebogen (Fortsetzung):

Nr.	Patient	Sex	Dauer der Rückenbeschwerden [Monate]	Brenn-Schmerz	Sonstige sensible Symptome	Bein-temp. Diff. [subj.]	VAS [aus 10] Rücken
17	DS	f	60	-	-	-	8
19	HS	m	2	-	Kribbeln OS opseitig	-	9
21	HW	m	84	-	-	-	9
22	HK	m	96	-	-	-	5
23	HS	f	60	-	-	-	9
24	UM	f	2	-	Kribbeln OS-US-Fuß opseitig	-	10
25	MR	f	12	-	-	-	3
26	BJ	f	6	-	-	-	5
27	IH	f	96	-	-	-	7
29	HW	m	120	-	-	-	9
30	MP	m	18	-	-	-	6-7
33	RB	f	6	-	-	-	1
34	BN	f	120	-	-	-	10
35	HP	m	1	-	-	-	9
37	NL	f	12	-	-	-	8
41	SH	f	12	-	Hypästhesie L Fußbrücken	-	9

Tabelle Anhang F (Fortsetzung): Präoperativer Fragebogen

# Anhang G

## Postoperativer Fragebogen

Nr.	Patient	Intervall postoperative Thermographie [Tage]	Brenn- Schmerz	Sonstige sensible Symptome	Bein- temp.- Diff. [subj.]	VAS [aus 10] Rücken
1	MB	7	-	-	-	1.5
2	UD	12	-	-	-	1
3	ID	14	-	-	-	0
4	UP	9	-	-	-	1
5	SS	8	-	-	-	2
6	WS	9	-	-	-	0.5
7	FF	6	-	-	-	2
8	MS	6	-	-	-	3.5
9	ER	19	-	-	-	0
10	AS	10	-	-	-	1
11	AS	3	-	-	-	2
13	IL	14	-	-	-	3
14	GB	9	-	-	-	0.5
15	DS	12	-	-	-	0
16	NW	12	-	-	-	0.5
17	DS	13	+	-	-	2
19	HS	8	-	-	-	1
21	HW	8	-	-	-	2
22	HK	7	-	-	-	1-2

Tabelle Anhang G: Postoperativer Fragebogen

Postoperativer Fragebogen (Fortsetzung):

Nr.	Patient	Intervall postoperative Thermographie [Tage]	Brenn- Schmerz	Sonstige sensible Symptome	Bein- temp.- Diff. [subj.]	VAS [aus 10] Rücken
23	HS	13	-	-	beids. hyper- therm	2
24	UM	7	-	-	opseitig hyper- therm	2
25	MR	6	-	-	opseitig hyper- therm subj. störend	1
26	BJ	5	-	Kribbeln Ober- schenkel opseitig	-	0.5
27	IH	17	-	Kribbeln Ober- schenkel opseitig	-	2
29	HW	9	-	-	-	3.5
30	MP	11	-	-	-	1-2
33	RB	10	-	-	-	1
34	BN	14	-	-	opseitig hyper- therm	1
35	HP	33	-	-	-	2
37	NL	9	-	-	-	0.5
41	SH	18	-	-	-	1

Tabelle Anhang G (Fortsetzung): Postoperativer Fragebogen

## Anhang H

# Thermographisches Bildmaterial: Untersuchungsgruppe 1



Abbildung H.1: Temperaturleiste  $20^{\circ}\text{C}$  (blau) bis  $34^{\circ}\text{C}$  (gelb)



Abbildung H.2: Patient Nr. 1, postoperative Thermographie





Abbildung H.3: Patient Nr. 13, postoperative Thermographie



Abbildung H.4: Patient Nr. 14, präoperative Thermographie

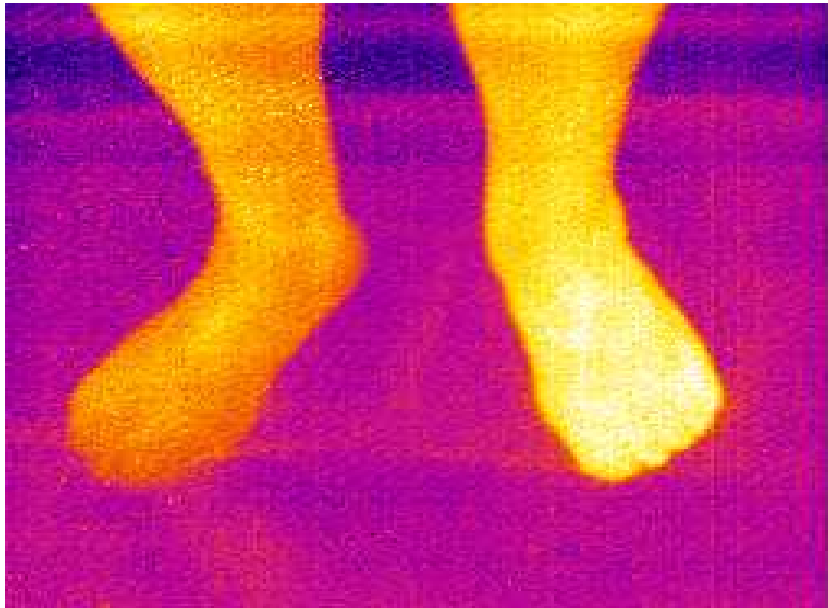


Abbildung H.5: Patient Nr. 14, postoperative Thermographie



Abbildung H.6: Patient Nr. 21, präoperative Thermographie



Abbildung H.7: Patient Nr. 21, postoperative Thermographie



Abbildung H.8: Patient Nr. 22, präoperative Thermographie

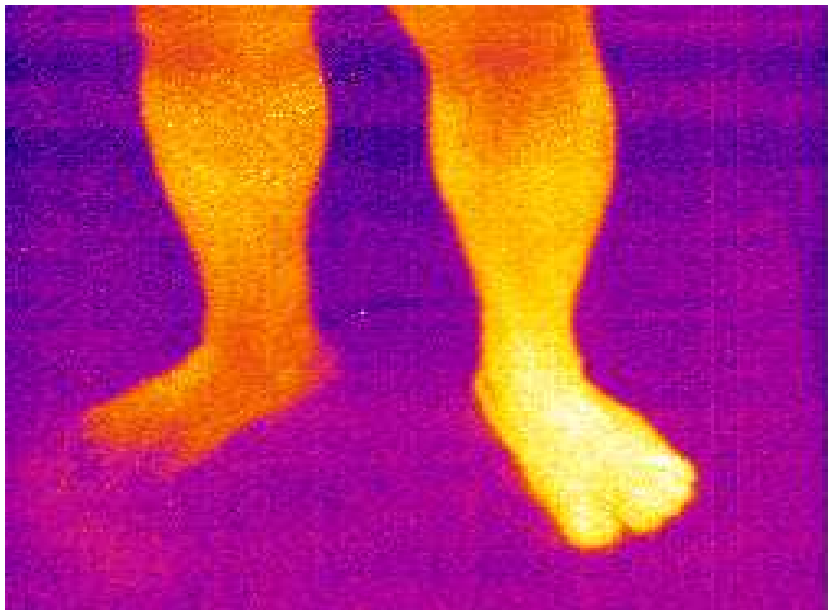


Abbildung H.9: Patient Nr. 22, postoperative Thermographie



Abbildung H.10: Patient Nr. 25, präoperative Thermographie



Abbildung H.11: Patient Nr. 25, postoperative Thermographie



Abbildung H.12: Patient Nr. 34, präoperative Thermographie



Abbildung H.13: Patient Nr. 34, postoperative Thermographie

## Anhang I

### Thermographisches Bildmaterial: Untersuchungsgruppe 2



Abbildung I.1: Patient Nr. 6 präoperative Thermographie

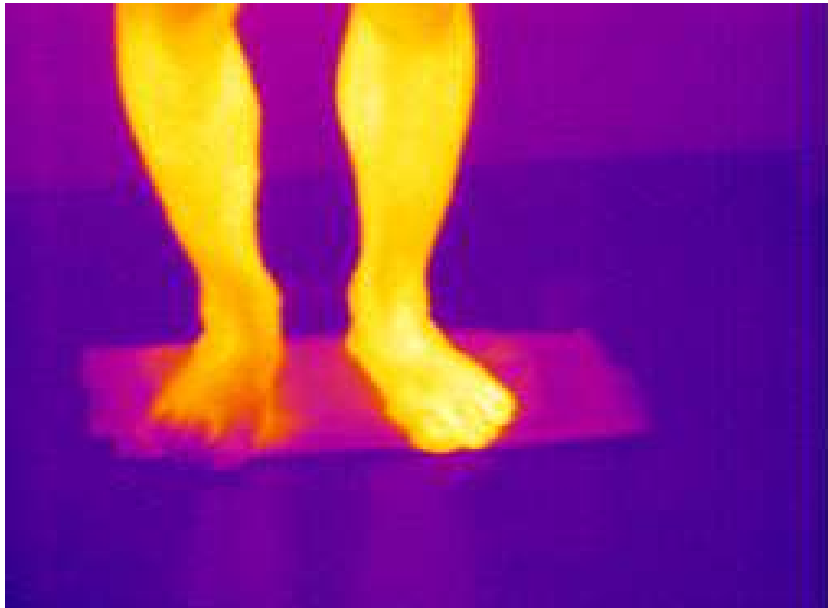


Abbildung I.2: Patient Nr. 6, postoperative Thermographie



Abbildung I.3: Patient Nr. 23, präoperative Thermographie



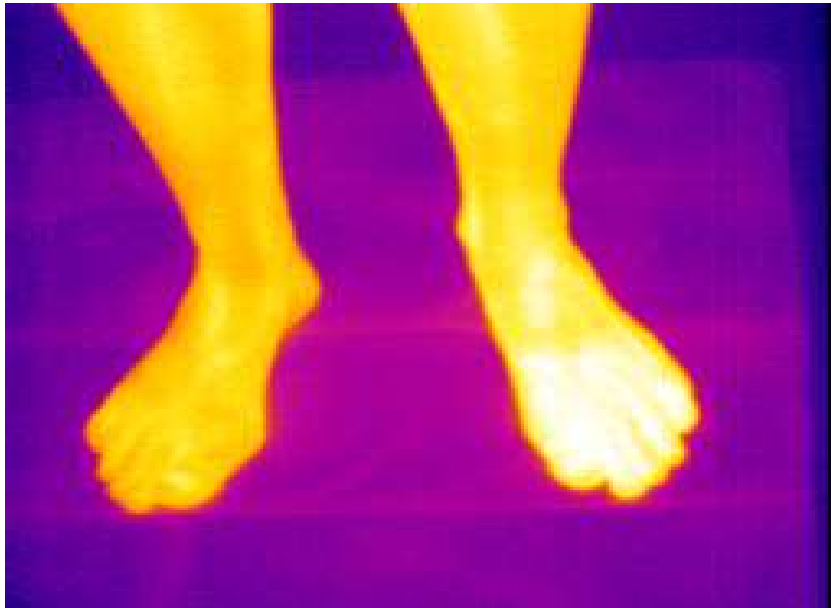


Abbildung I.4: Patient Nr. 23, postoperative Thermographie



Abbildung I.5: Patient Nr. 29, präoperative Thermographie



Abbildung I.6: Patient Nr. 29, postoperative Thermographie



Abbildung I.7: Patient Nr. 41, postoperative Thermographie

## Anhang J

### Thermographisches Bildmaterial: Untersuchungsgruppe 3

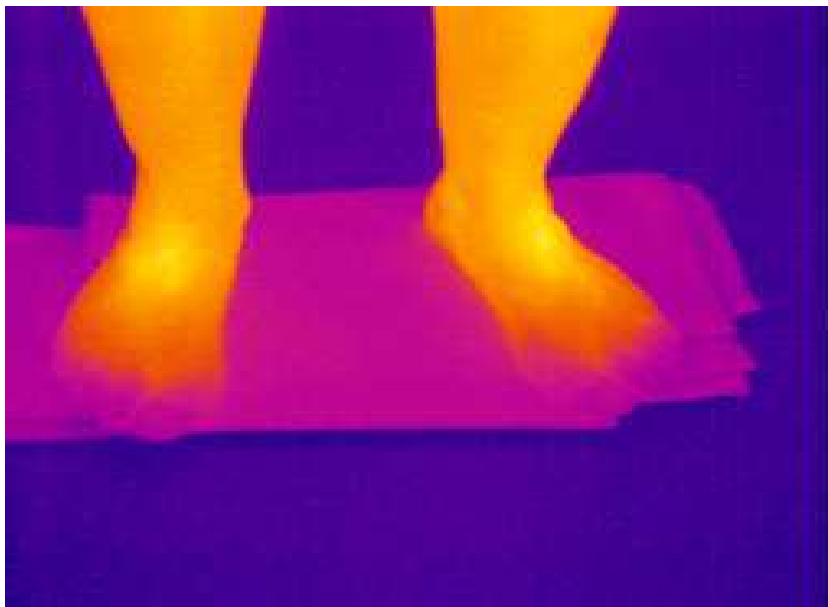


Abbildung J.1: Patient Nr. 8, präoperative Thermographie

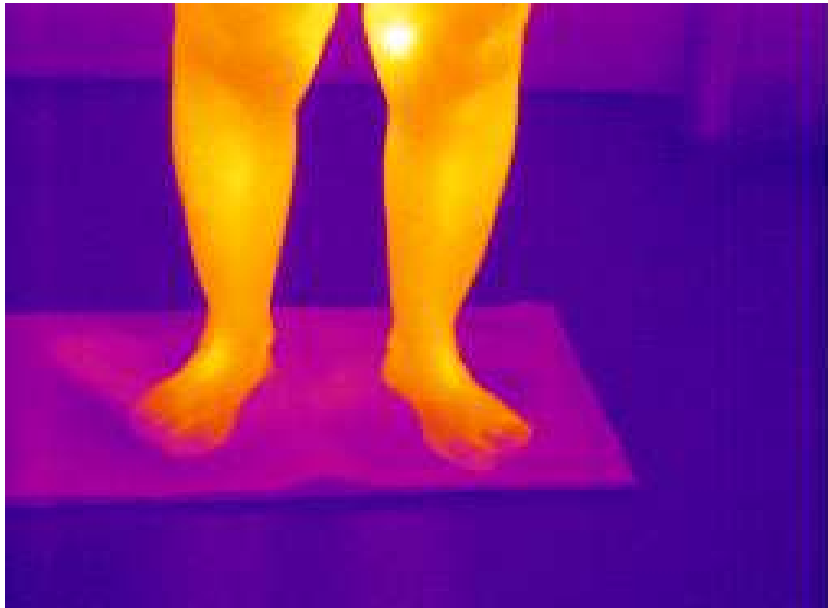


Abbildung J.2: Patient Nr. 8, postoperative Thermographie

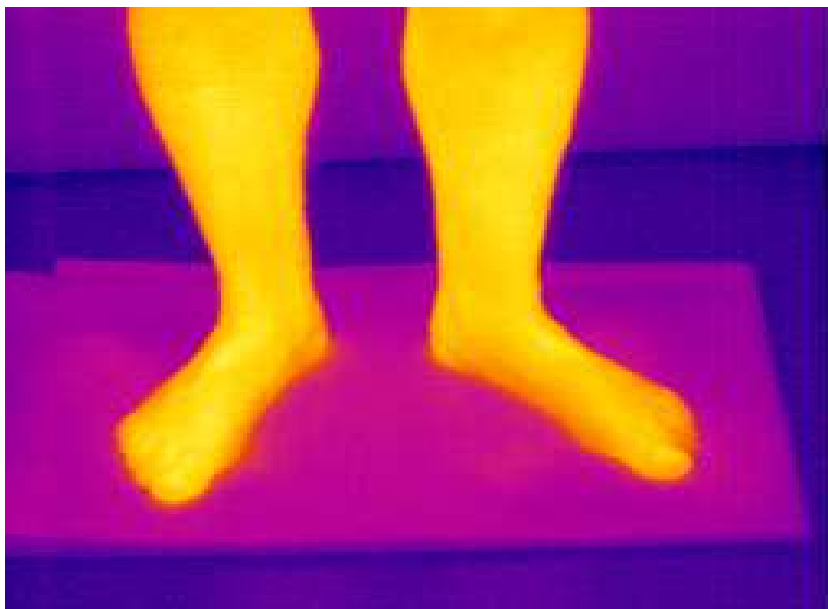


Abbildung J.3: Patient Nr. 15, präoperative Thermographie

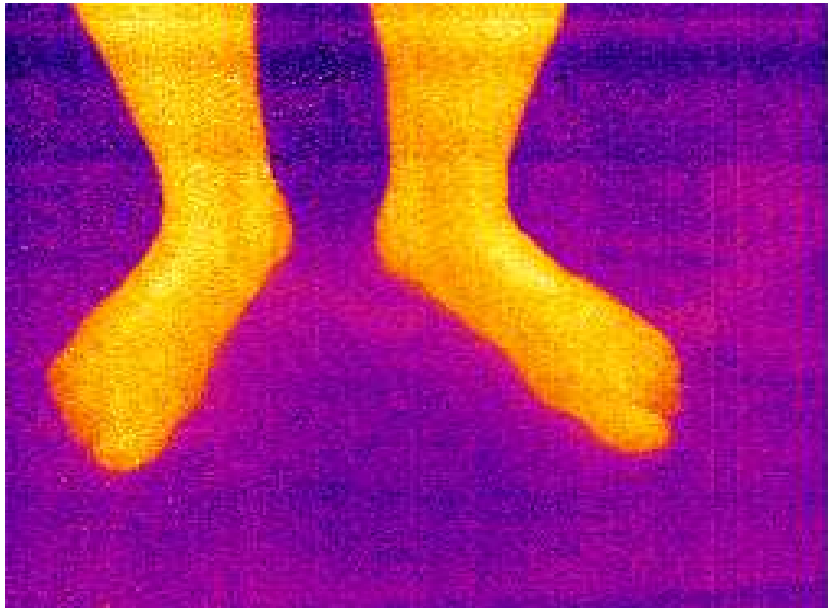


Abbildung J.4: Patient Nr. 15, postoperative Thermographie



Abbildung J.5: Patient Nr. 16, präoperative Thermographie

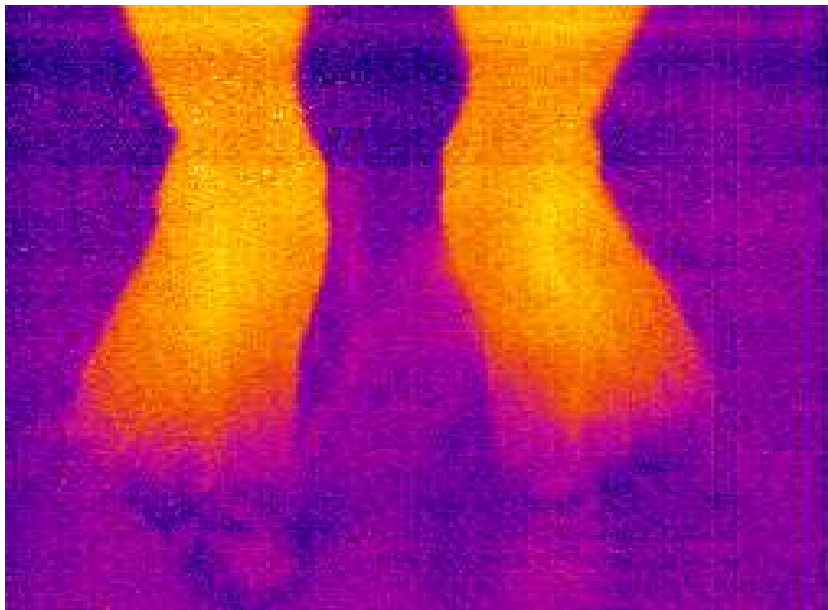


Abbildung J.6: Patient Nr. 16, postoperative Thermographie

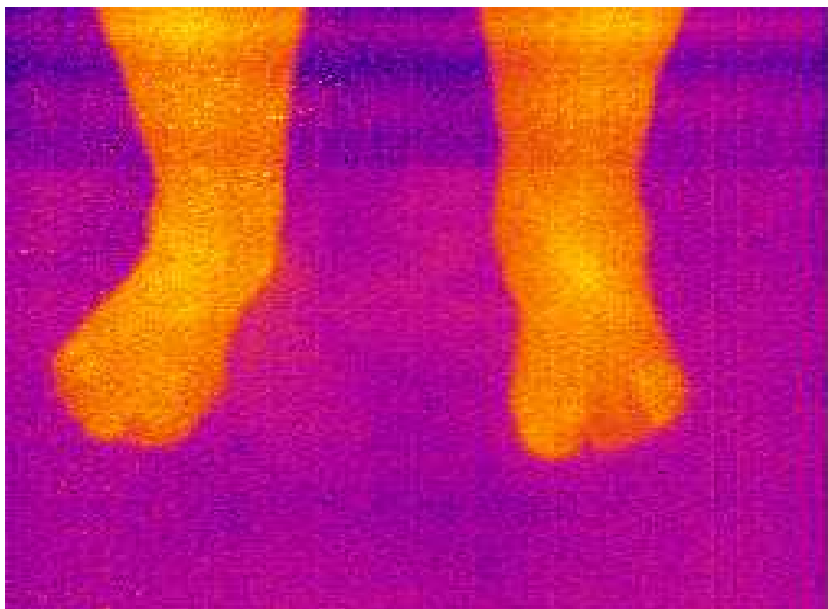


Abbildung J.7: Patient Nr. 17, präoperative Thermographie



Abbildung J.8: Patient Nr. 17, postoperative Thermographie

## Anhang K

### Thermographisches Bildmaterial: Untersuchungsgruppe 4



Abbildung K.1: Patient Nr. 2, präoperative Thermographie





Abbildung K.2: Patient Nr. 2, postoperative Thermographie



Abbildung K.3: Patient Nr. 3, postoperative Thermographie

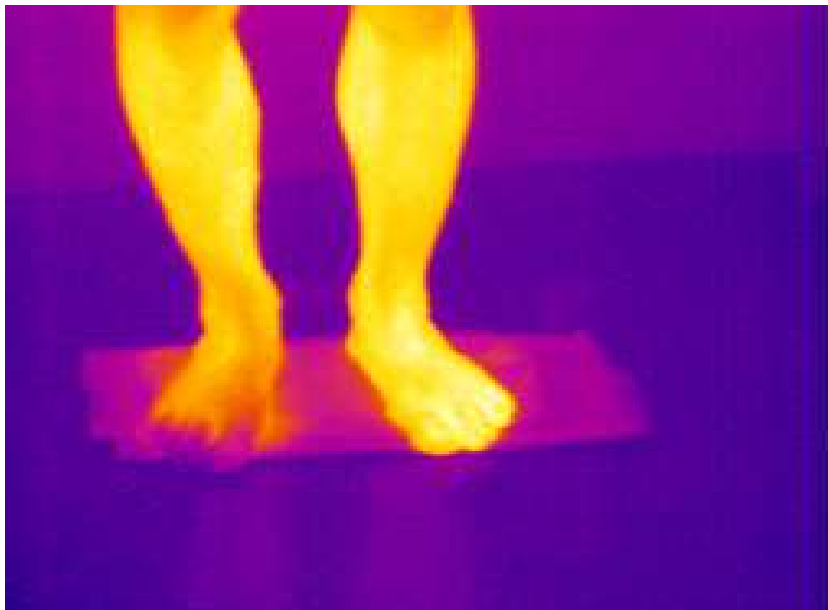


Abbildung K.4: Patient Nr. 4, postoperative Thermographie

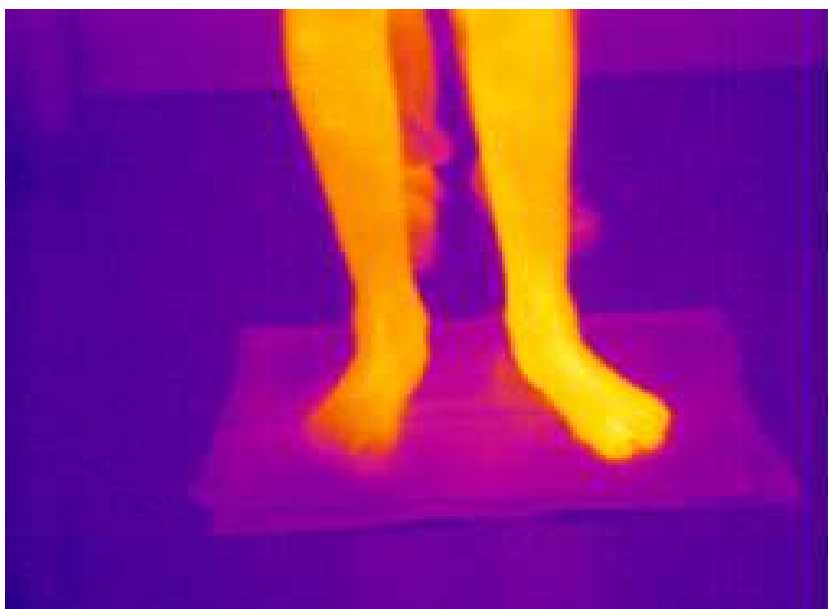


Abbildung K.5: Patient Nr. 5, postoperative Thermographie

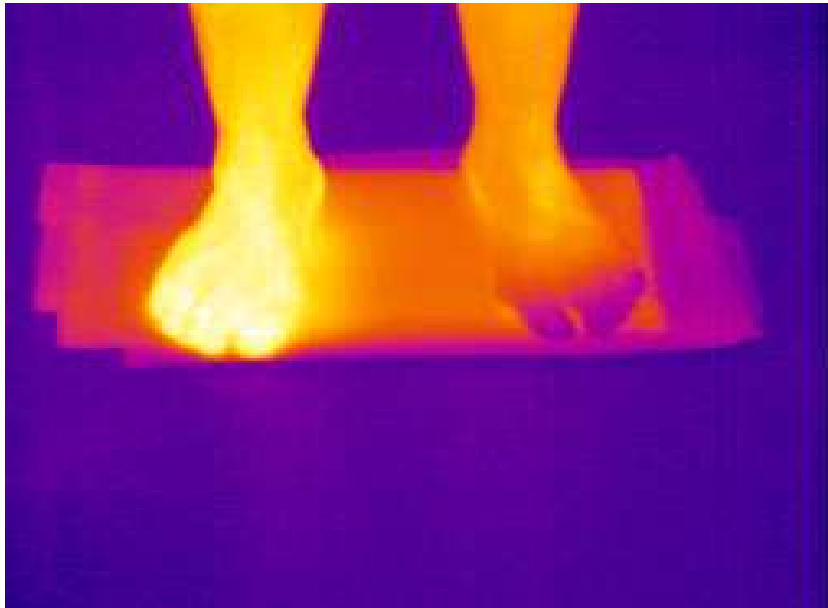


Abbildung K.6: Patient Nr. 7, postoperative Thermographie

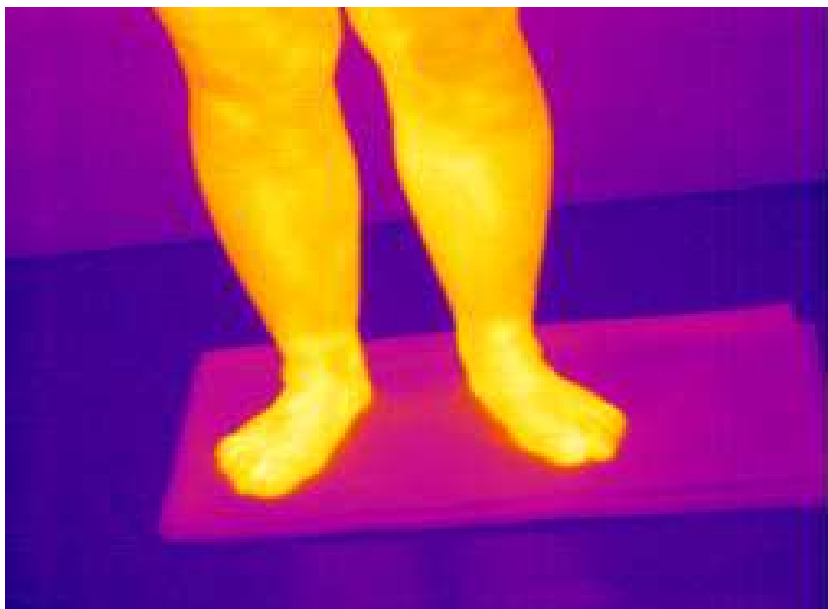


Abbildung K.7: Patient Nr. 11, präoperative Thermographie



Abbildung K.8: Patient Nr. 11, postoperative Thermographie



Abbildung K.9: Patient Nr. 24, praeoperative Thermographie

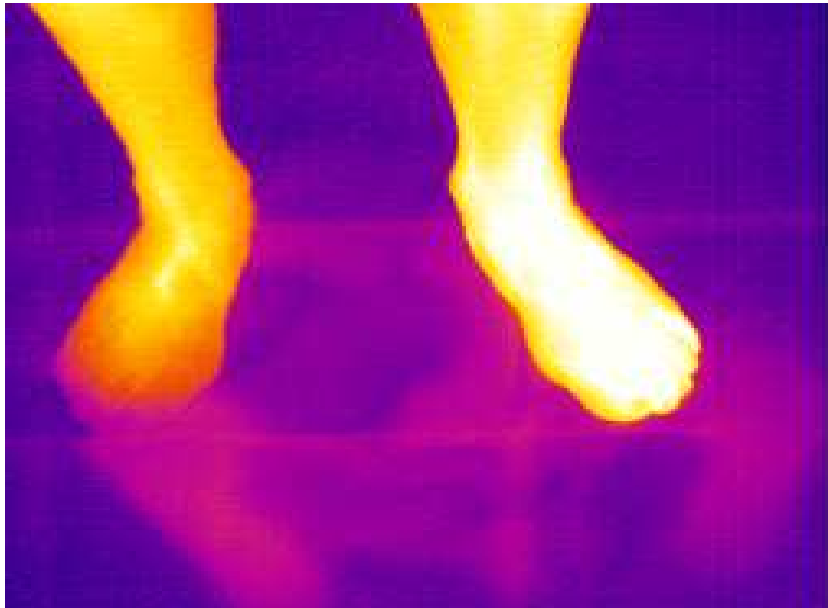


Abbildung K.10: Patient Nr. 24, postoperative Thermographie



Abbildung K.11: Patient Nr. 33, präoperative Thermographie

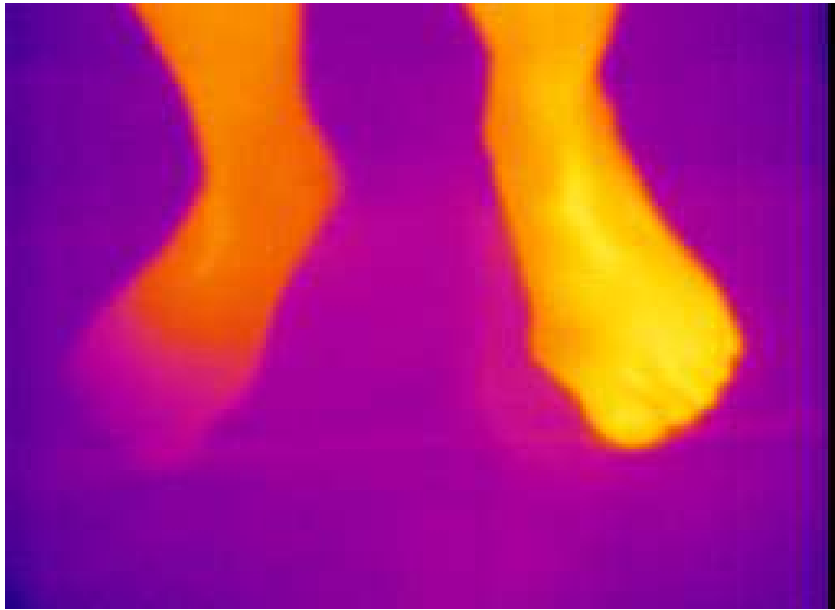


Abbildung K.12: Patient Nr. 33, postoperative Thermographie

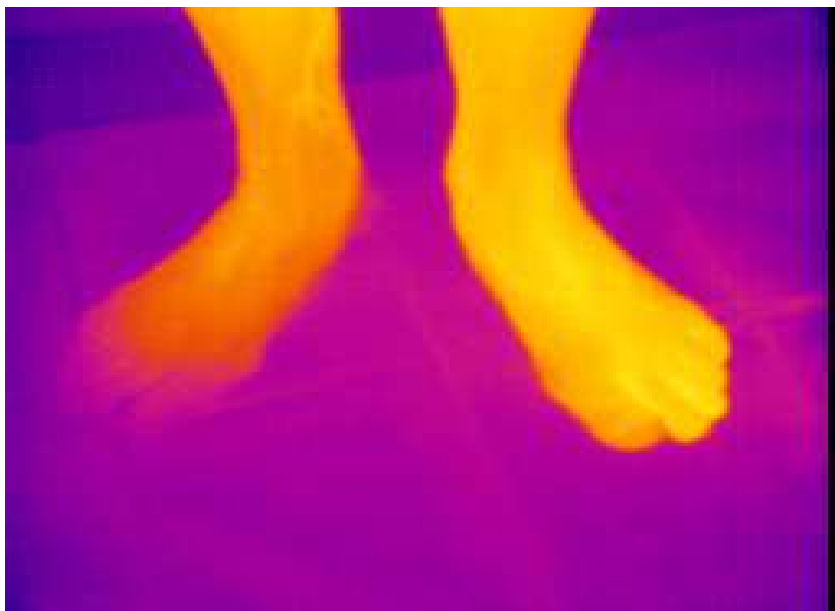


Abbildung K.13: Patient Nr. 35, postoperative Thermographie

## Anhang L

### Thermographisches Bildmaterial: Untersuchungsgruppe 5

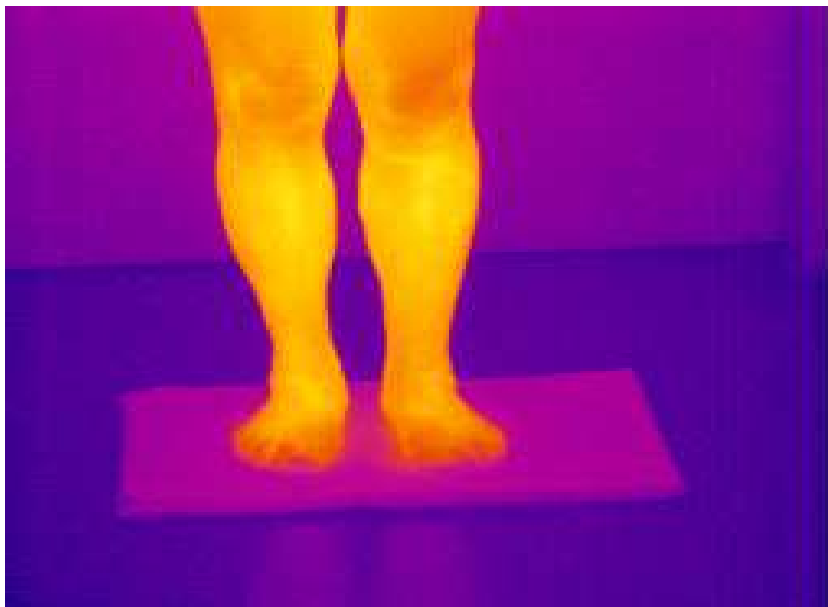


Abbildung L.1: Patient Nr. 9, präoperative Thermographie



Abbildung L.2: Patient Nr. 9, postoperative Thermographie



Abbildung L.3: Patient Nr. 10, postoperative Thermographie



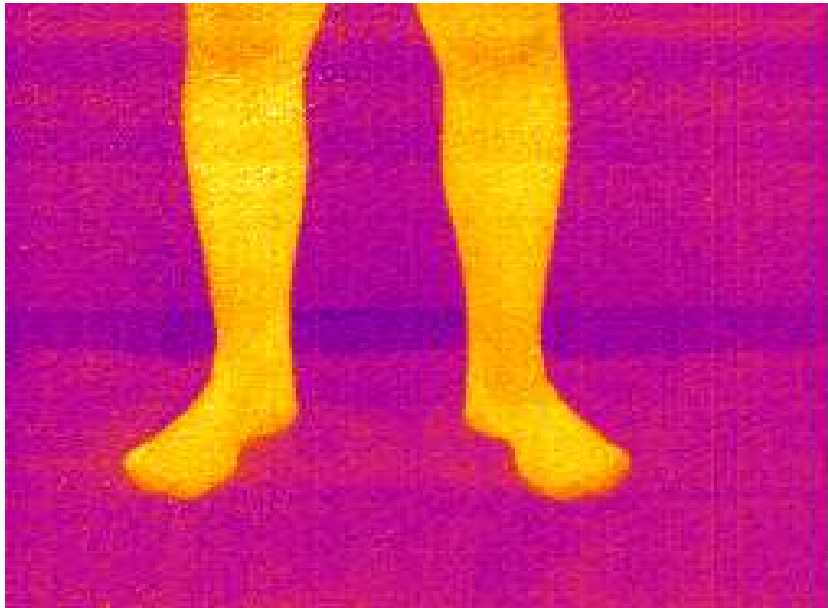


Abbildung L.4: Patient Nr. 19, postoperative Thermographie



Abbildung L.5: Patient Nr. 26, präoperative Thermographie



Abbildung L.6: Patient Nr. 26, postoperative Thermographie



Abbildung L.7: Patient Nr. 27, präoperative Thermographie



Abbildung L.8: Patient Nr. 27, postoperative Thermographie



Abbildung L.9: Patient Nr. 30, präoperative Thermographie



Abbildung L.10: Patient Nr. 30, postoperative Thermographie



Abbildung L.11: Patient Nr. 37, präoperative Thermographie



Abbildung L.12: Patient Nr. 37, postoperative Thermographie

# Anhang M

## Übersicht: Ergebnisse Wilcoxon-Test

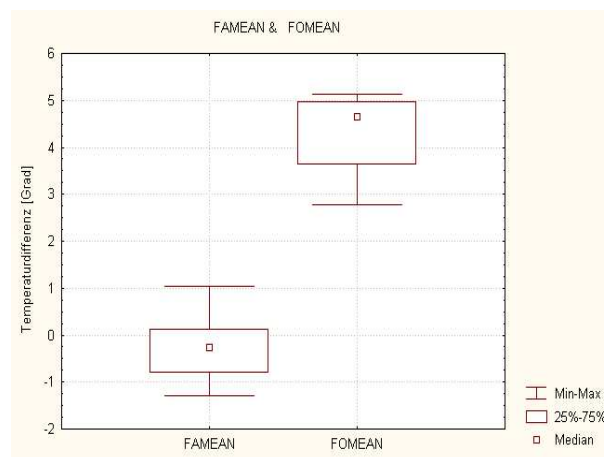


Abbildung M.1: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Temperaturdifferenz (gemittelte Flächentemperatur der Fußrückeninnenfläche, MW aus drei manuellen Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

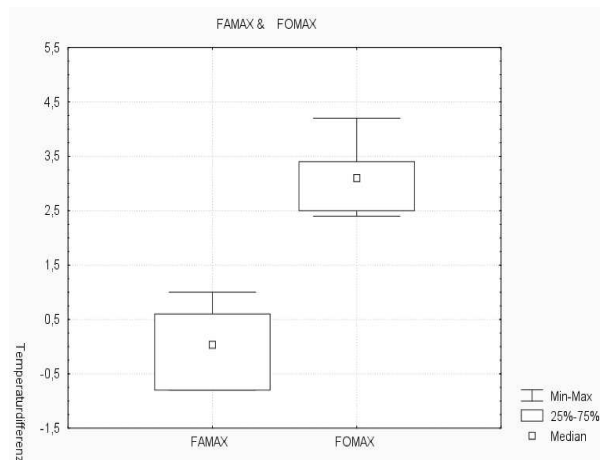


Abbildung M.2: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Temperaturdifferenz (Maximaltemperatur der Fußrückeninnenfläche, MW aus drei Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

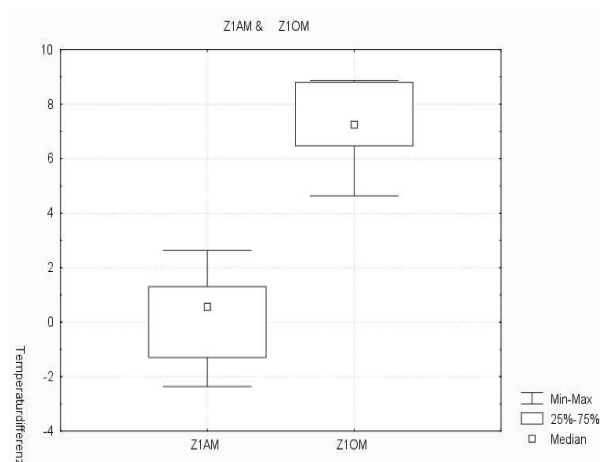


Abbildung M.3: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 1 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus drei Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

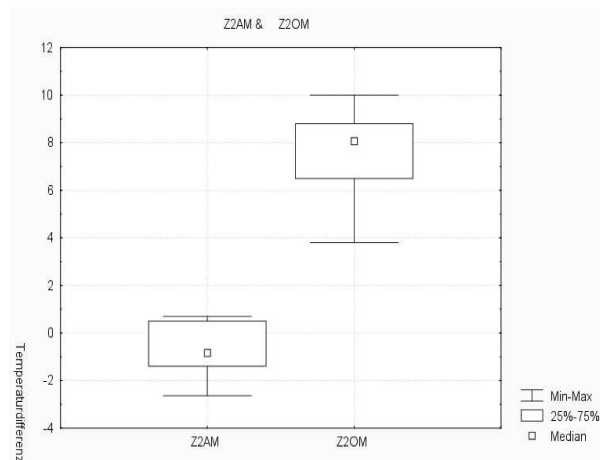


Abbildung M.4: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 2 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus drei Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

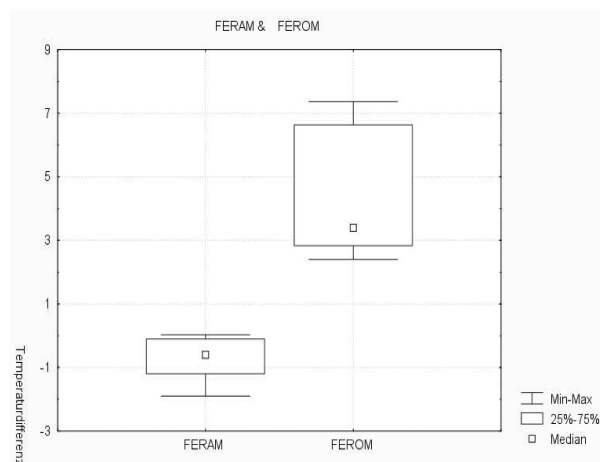


Abbildung M.5: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Temperaturdifferenz (Punktmessung Ferse zentral-posterior, MW aus drei Messungen) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028



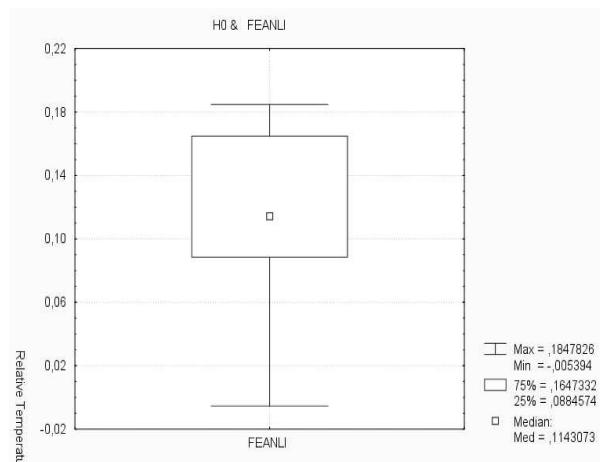


Abbildung M.6: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus drei manuellen Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_O$  (hier: Median bei 12% z.B.von  $20^{\circ}C=2,4^{\circ}C$  absolute Temperaturdifferenz). N=6, T=1, Z=1,992, p=0,046

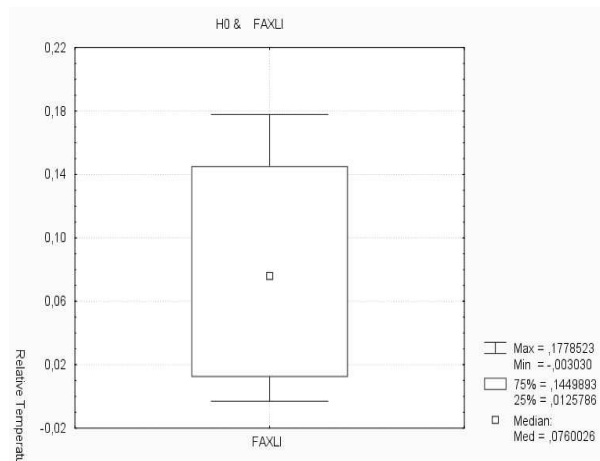


Abbildung M.7: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_O$  (hier: Median bei 7,5% z.B.von  $20^{\circ}C=2,4^{\circ}C$  absolute Temperaturdifferenz). N=6, T=1, Z=1,992, p=0,046

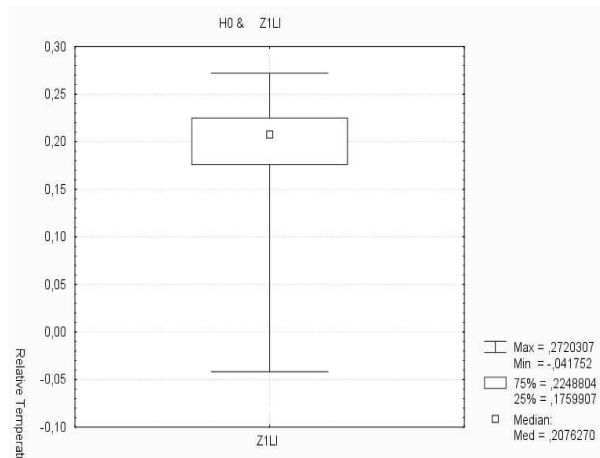


Abbildung M.8: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 1, links, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ des linken Zeh 1 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=1, Z=1,992, p=0,046



Abbildung M.9: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 2, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ des linken Zeh 2 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

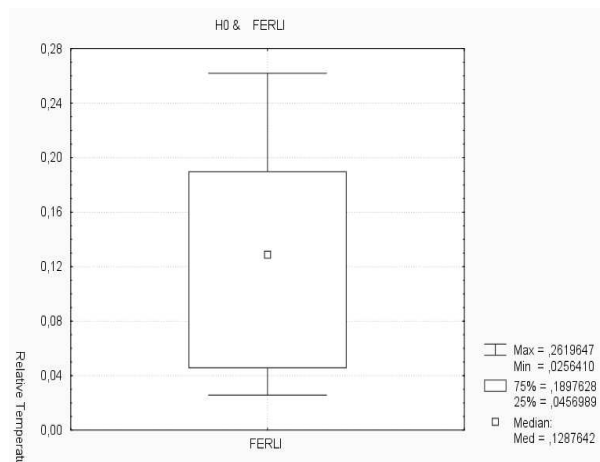


Abbildung M.10: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Ferse, links, zentral-dorsal, MW aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ der linken Ferse gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=0, Z=2,201, p=0,028

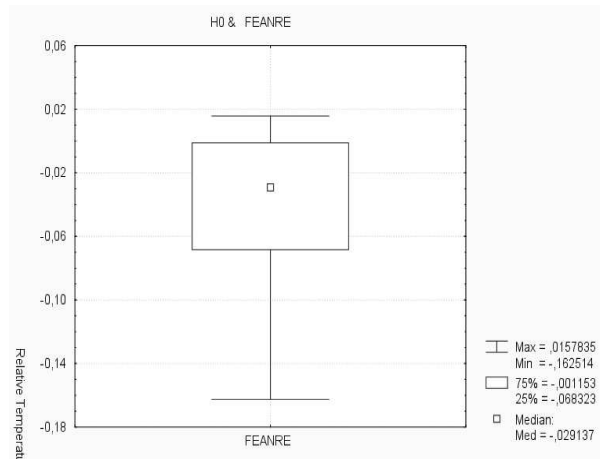


Abbildung M.11: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus drei manuellen Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der rechten Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  (Median: Summenabkühlung! Repräsentiert Abkühlung der kontralateralen Seite, vgl. 'Borrow-Lending'). N=6, T=2, Z=1,782, p=0,075

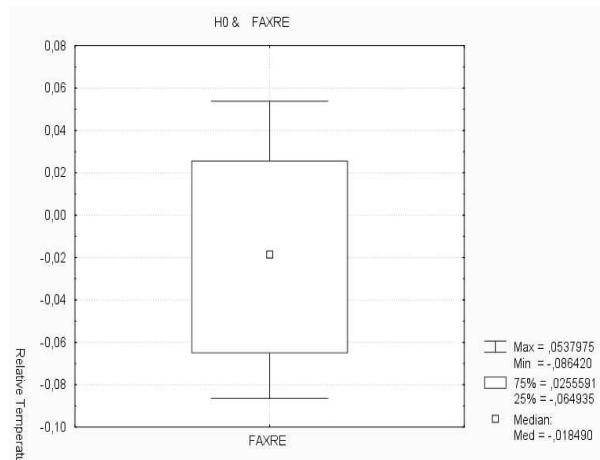


Abbildung M.12: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus drei manuellen Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der rechten Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  (Median: Summenabkühlung! Repräsentiert Abkühlung der kontralateralen Seite, vgl. 'Borrow-Lending'). N=6, T=7, Z=0,734, p=0,463

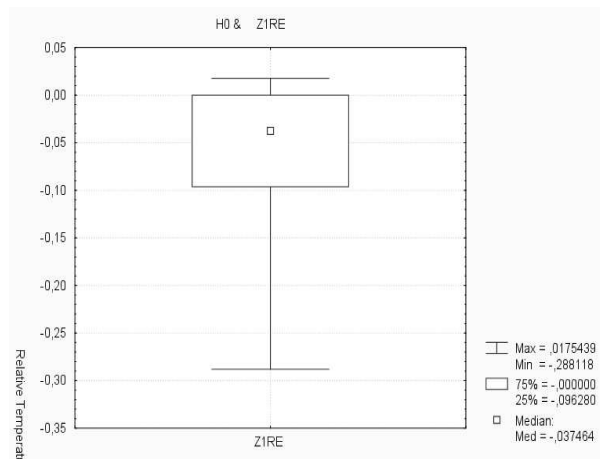


Abbildung M.13: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 1, rechts, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ des rechten Zeh 1 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten (Median: Summenabkühlung! Repräsentiert Abkühlung der kontralateralen Seite, vgl. 'Borrow-Lending'). N=6, T=2, Z=1,782, p=0,075

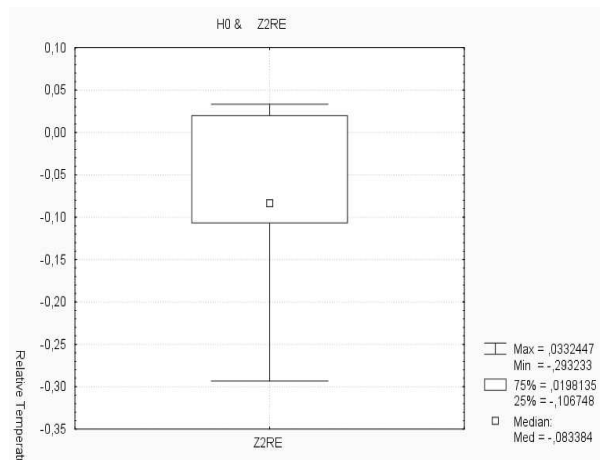


Abbildung M.14: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 2, rechts, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ des rechten Zeh 2 gegen  $H_O$  in relativen Einheiten (Median: Summenabkühlung! Repräsentiert Abkühlung der kontralateralen Seite, vgl. 'Borrow-Lending'). N=6, T=3, Z=1,527, p=0,116

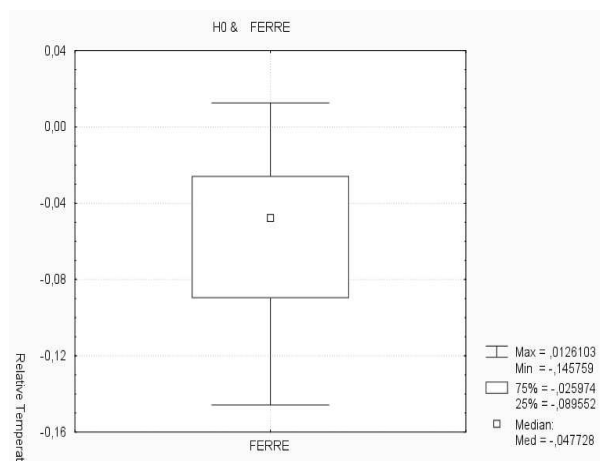


Abbildung M.15: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Ferse, rechts, zentral-dorsal, MW aus drei Messungen am Individuum) prä- vs. postoperativ der rechten Ferse gegen  $H_O$  in relativen Einheiten. (Median: Summenabkühlung! Repräsentiert Abkühlung der kontralateralen Seite, vgl. 'Borrow-Lending'). N=6, T=1, Z=1,992, p=0,046

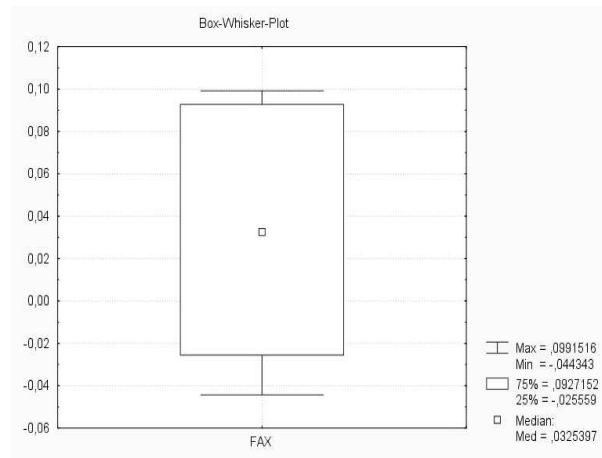


Abbildung M.16: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Fußrückeninnenfläche prä- vs. rechte und linke Fußrückeninnenfläche postoperativ (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus drei manuellen Messungen am Individuum) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=6, Z=0,943, p=0,345

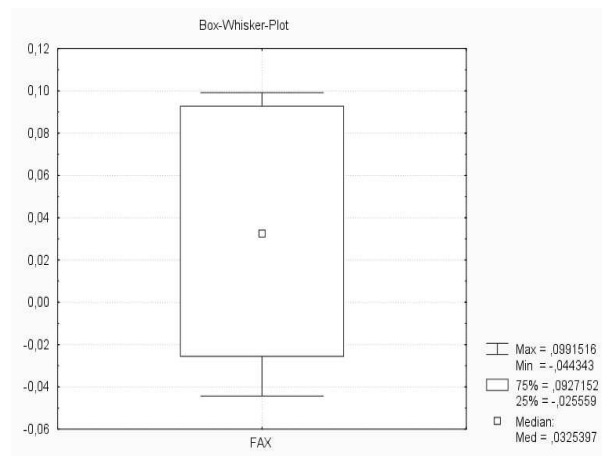


Abbildung M.17: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Fußrückeninnenfläche prä- vs. rechte und linke Fußrückeninnenfläche postoperativ (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=3, Z=1,214, p=0,225

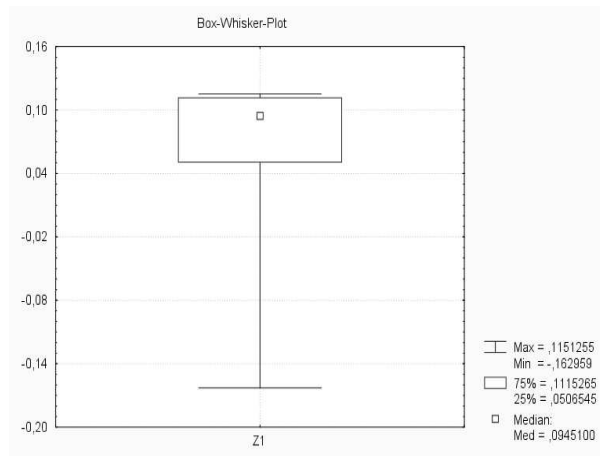


Abbildung M.18: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechter und linker Zeh 1 prä- vs. rechter und linker Zeh 1 postoperativ (Zeh 1, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=6, Z=0,943, p=0,345

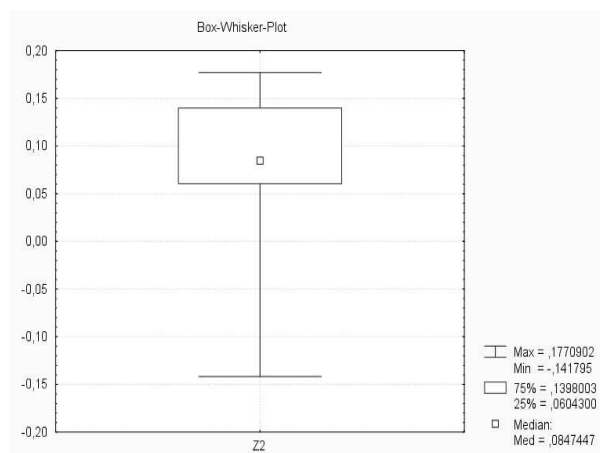


Abbildung M.19: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechter und linker Zeh 2 prä- vs. rechter und linker Zeh 2 postoperativ (Zeh 2, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=5, Z=1,153, p=0,249

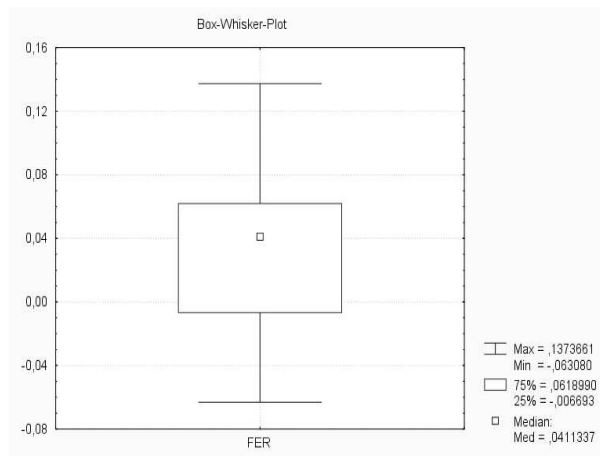


Abbildung M.20: Diagnose 1 (Etage L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Ferse prä- vs. rechte und linke Ferse postoperativ (Ferse, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=6, Z=0,943, p=0,345

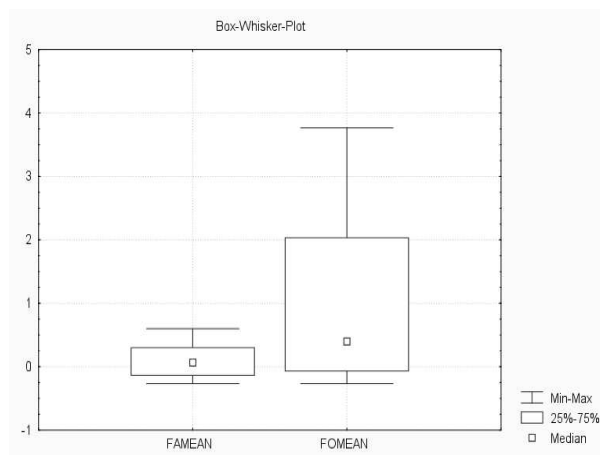


Abbildung M.21: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Temperaturdifferenz (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur der , MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=7, T=7, Z=1,183, p=0,237



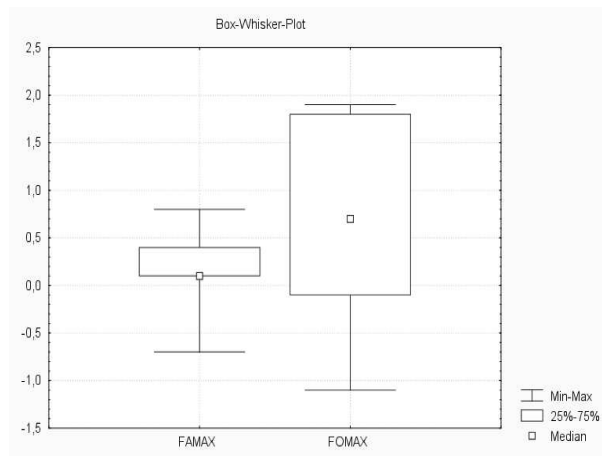


Abbildung M.22: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Temperaturdifferenz (Fußbrückeninnenfläche, Maximaltemperatur, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=7, T=8, Z=1,014, p=0,311

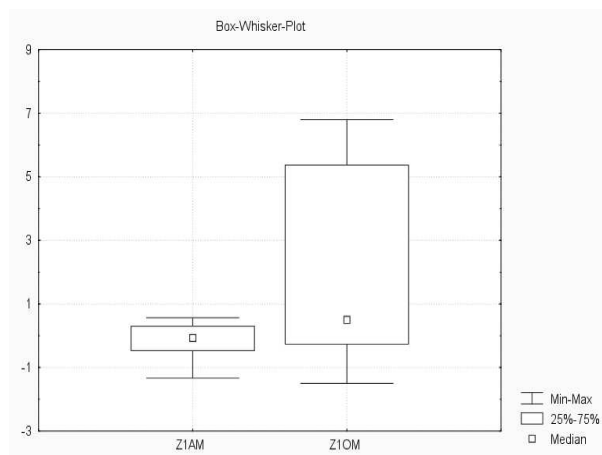


Abbildung M.23: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 1 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=7, T=6, Z=1,352, p=0,176

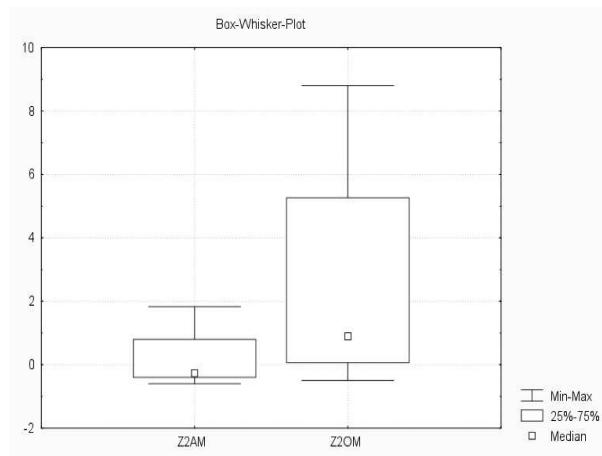


Abbildung M.24: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 2 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=7, T=7, Z=1,183, p=0,237

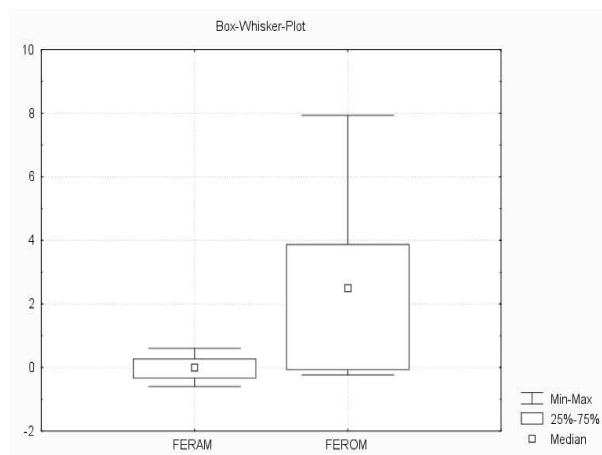


Abbildung M.25: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Temperaturdifferenz (Punktmessung Ferse zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=7, T=3, Z=1,859, p=0,063

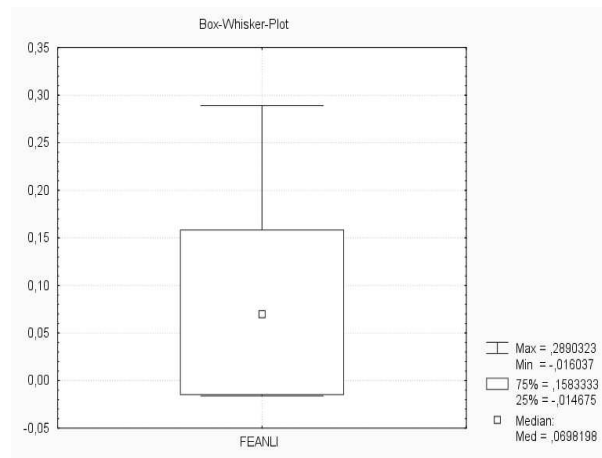


Abbildung M.26: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  in relativen Einheiten (hier: Median bei 7% z.B.von 20°C=1,4 °C absolute Temperaturdifferenz). N=7, T=3, Z=1,859, p=0,063

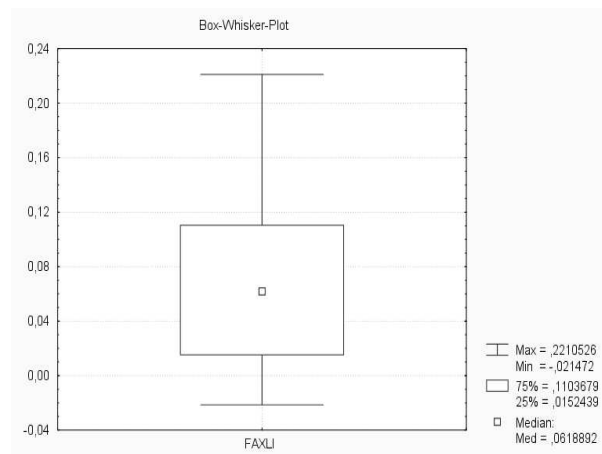


Abbildung M.27: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=2, Z=2,028, p=0,043

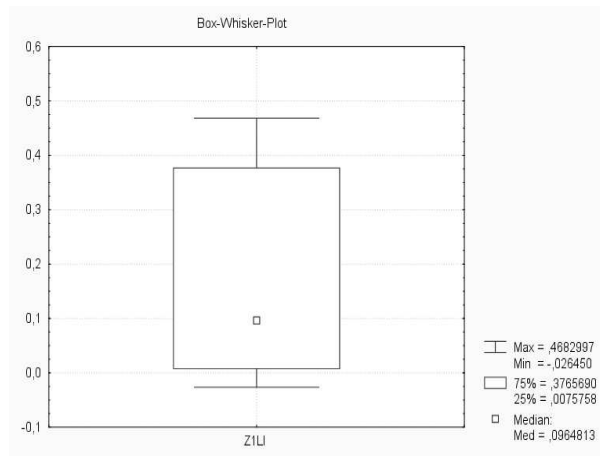


Abbildung M.28: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 1, links, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des linken Zeh 1 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=2, Z=2,028, p=0,043

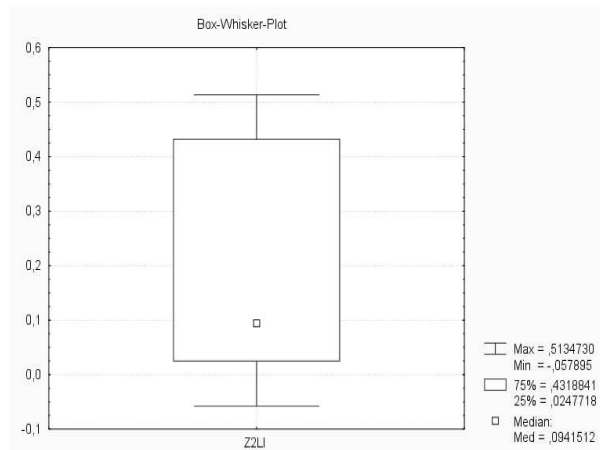


Abbildung M.29: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 2, links, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des linken Zeh 2 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=2, Z=2,028, p=0,043

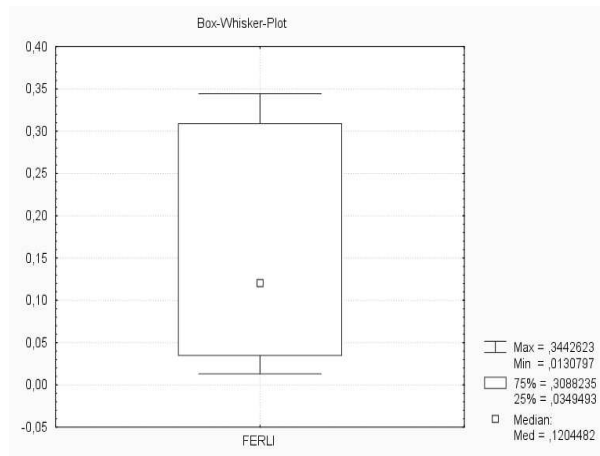


Abbildung M.30: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Ferse, links, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der linken Ferse gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=0, Z=2,366, p=0,018

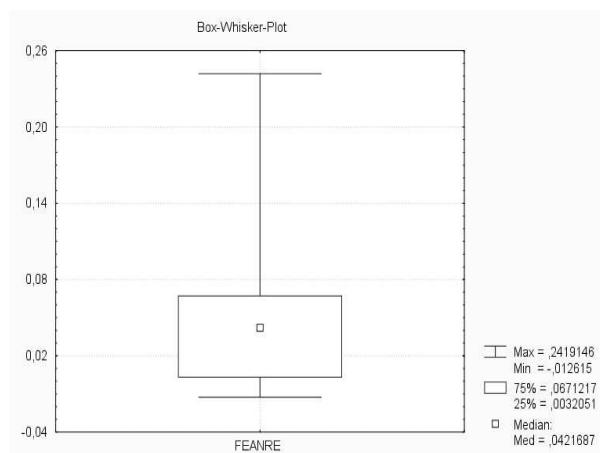


Abbildung M.31: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der rechten Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$ . N=7, T=2, Z=2,028, p=0,043

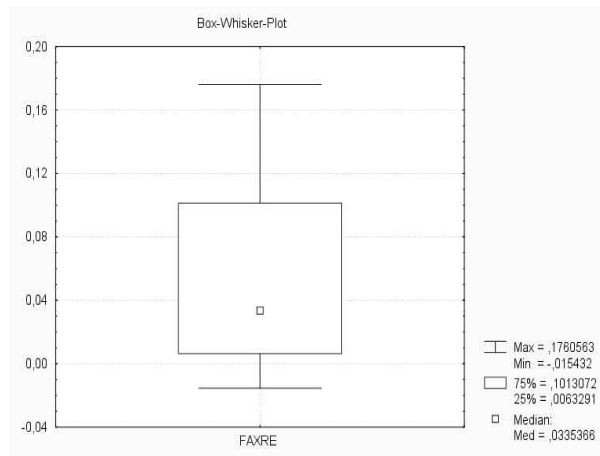


Abbildung M.32: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußbrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ in relativen Einheiten der rechten Fußbrückeninnenfläche gegen  $H_0$ . N=7, T=2, Z=2,028, p=0,043

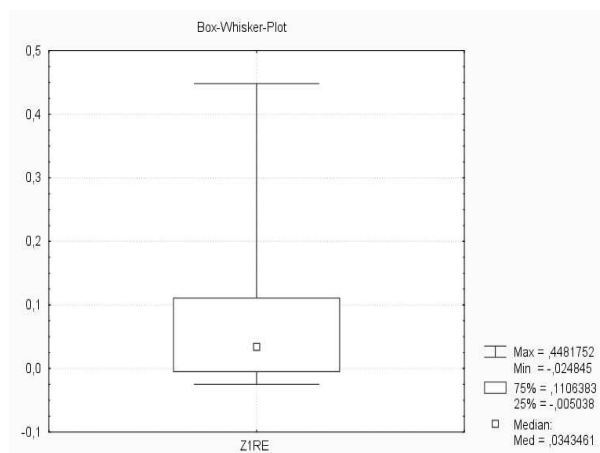


Abbildung M.33: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 1, rechts, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des rechten Zeh 1 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=4, Z=1,690, p=0,091

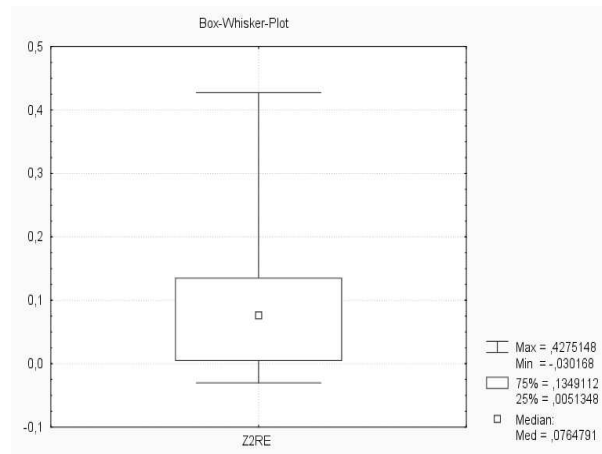


Abbildung M.34: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 2, rechts, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des rechten Zeh 2 gegen  $H_O$  in relativen Einheiten. N=7, T=3, Z=1,859, p=0,063

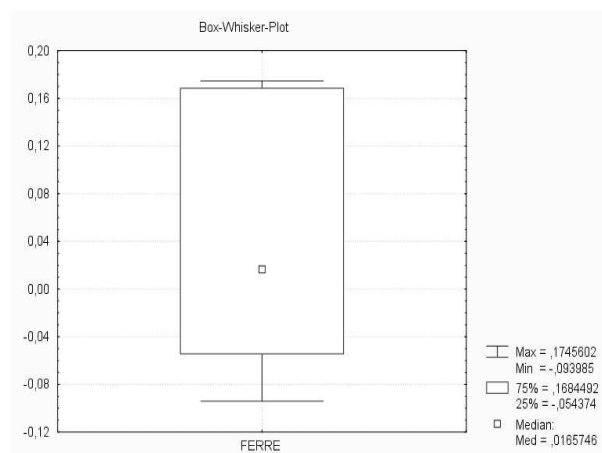


Abbildung M.35: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Ferse, rechts, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der rechten Ferse gegen  $H_O$  in relativen Einheiten. N=7, T=8, Z=1,014, p=0,311

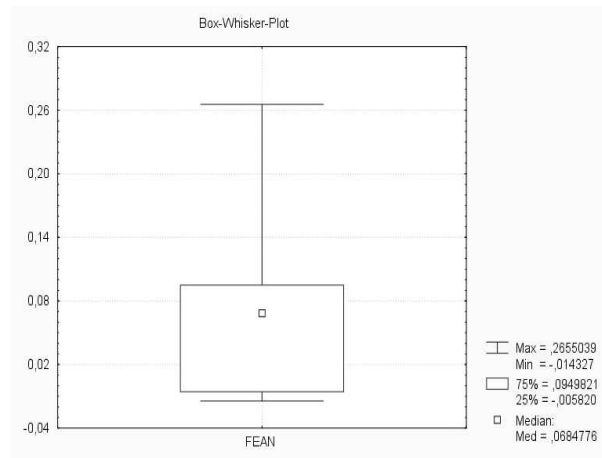


Abbildung M.36: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Fußrückeninnenfläche prä- vs. rechte und linke Fußrückeninnenfläche postoperativ (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=3, Z=1,859, p=0,063

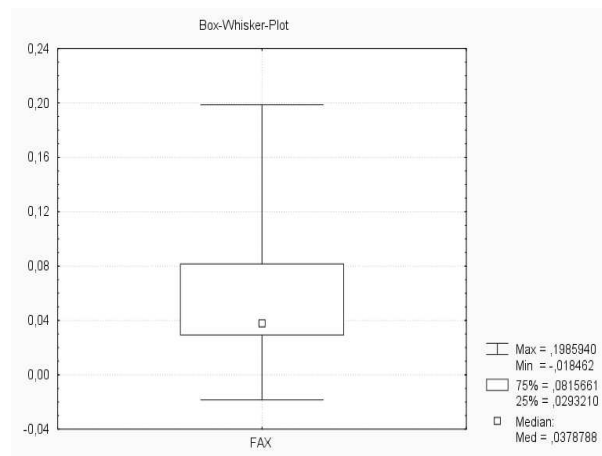


Abbildung M.37: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Fußrückeninnenfläche prä- vs. rechte und linke Fußrückeninnenfläche postoperativ (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=1, Z=2,197, p=0,028



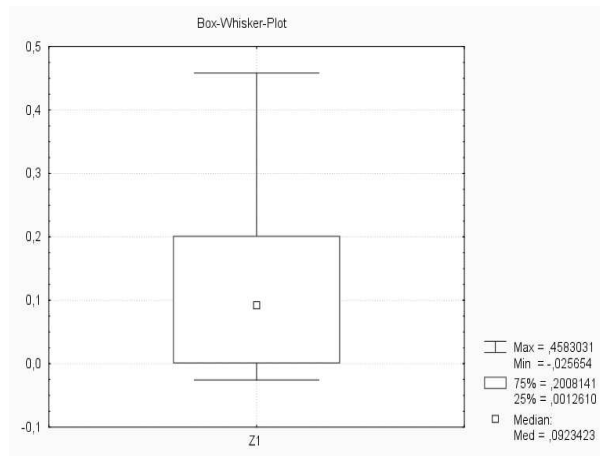


Abbildung M.38: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechter und linker Zeh 1 prä- vs. rechter und linker Zeh 1 postoperativ (Zeh 1, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=2, Z=2,028, p=0,043

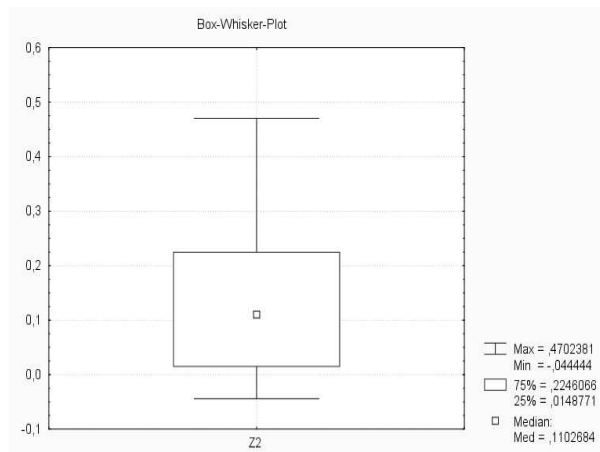


Abbildung M.39: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechter und linker Zeh 2 prä- vs. rechter und linker Zeh 2 postoperativ (Zeh 2, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=2, Z=2,028, p=0,043

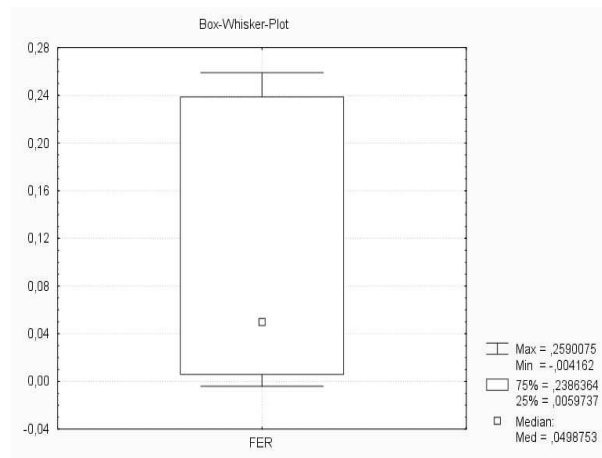


Abbildung M.40: Diagnose 2+3 (Etage L<sub>5</sub>-S<sub>1</sub>): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Ferse prä- vs. rechte und linke Ferse postoperativ (Ferse, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=7, T=1, Z=2,197, p=0,028

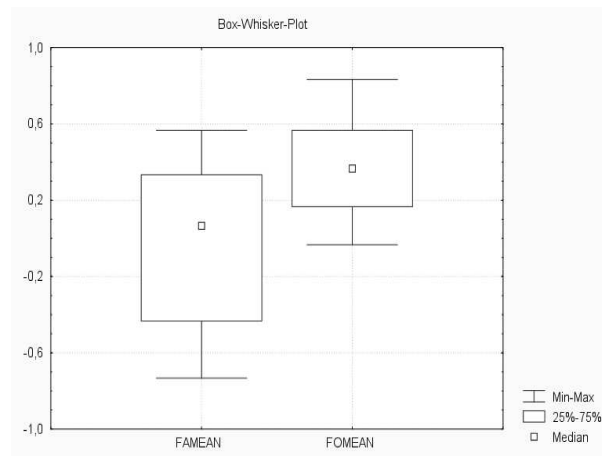


Abbildung M.41: Diagnose 5 (Fusionen mit perivertebralem [beidseitigem] Geschehen): Temperaturdifferenz (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=3, Z=1,572, p=0,116

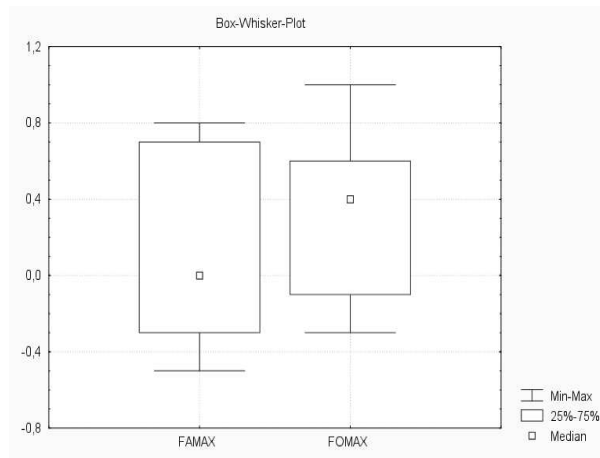


Abbildung M.42: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Temperaturdifferenz (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=6, Z=0,943, p=0,345

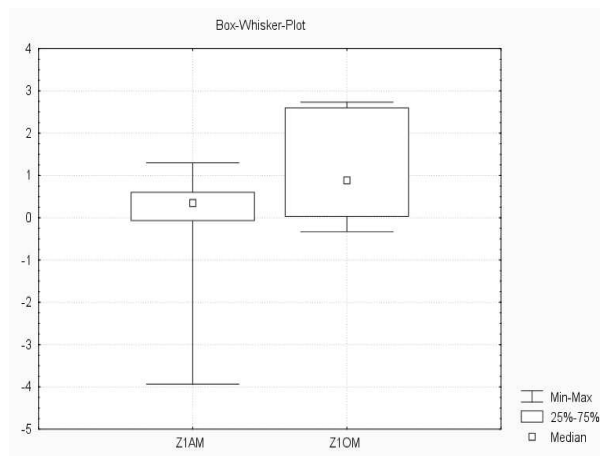


Abbildung M.43: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 1 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=6, Z=0,943, p=0,345

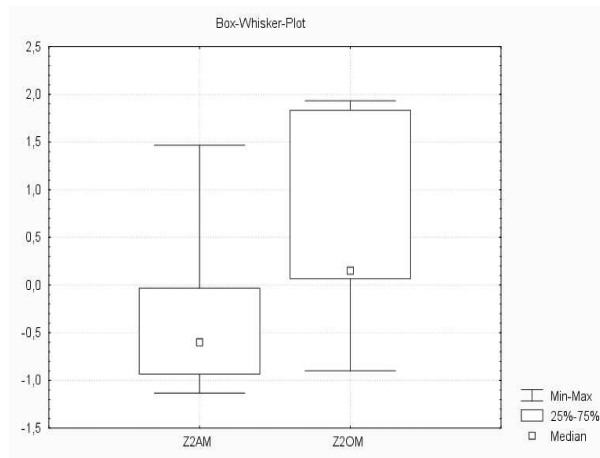


Abbildung M.44: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Temperaturdifferenz (Punktmessung Zeh 2 zentral-dorsal, distale Phalanx, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=4, Z=1,363, p=0,173

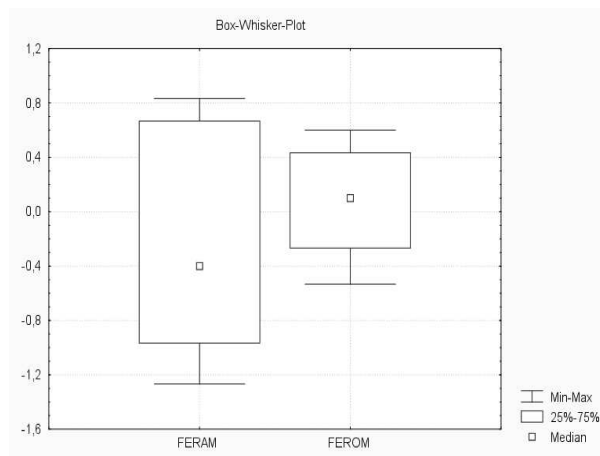


Abbildung M.45: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Temperaturdifferenz (Punktmessung Ferse zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) zwischen linker vs. rechter unterer Extremität, präoperativ (in Graphik links) und postoperativ (in Graphik rechts). N=6, T=8, Z=0,524, p=0,600

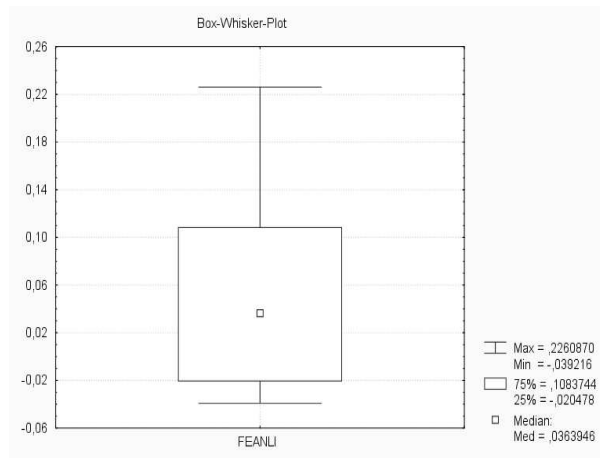


Abbildung M.46: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelte Flächentemperatur, links, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=5$ ,  $Z=1,153$ ,  $p=0,249$

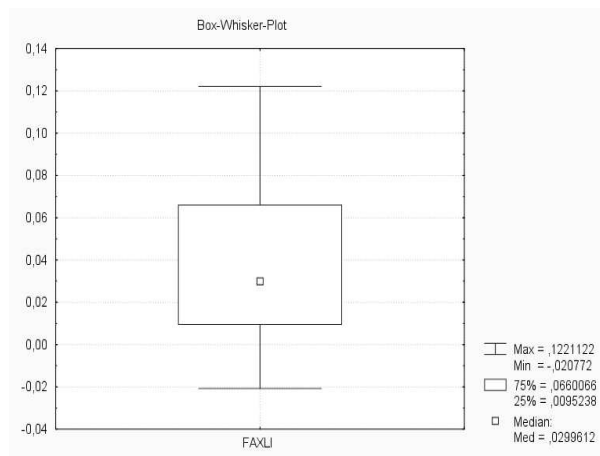


Abbildung M.47: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, Maximaltemperatur, links, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der linken Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=2$ ,  $Z=1,782$ ,  $p=0,075$

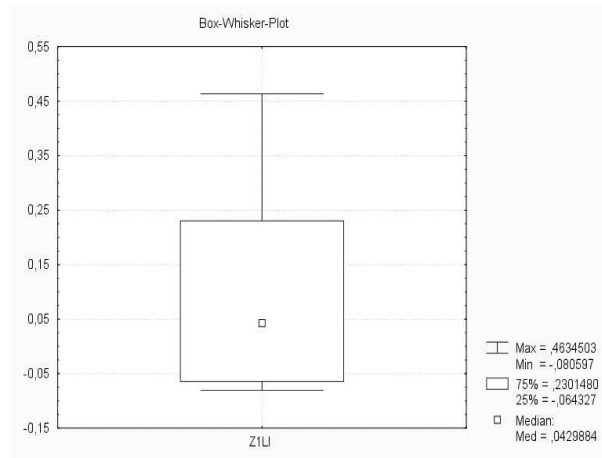


Abbildung M.48: Diagnose 5 (Fusionen mit perivertebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 1, links, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des linken Zeh 1 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=7$ ,  $Z=0,734$ ,  $p=0,463$

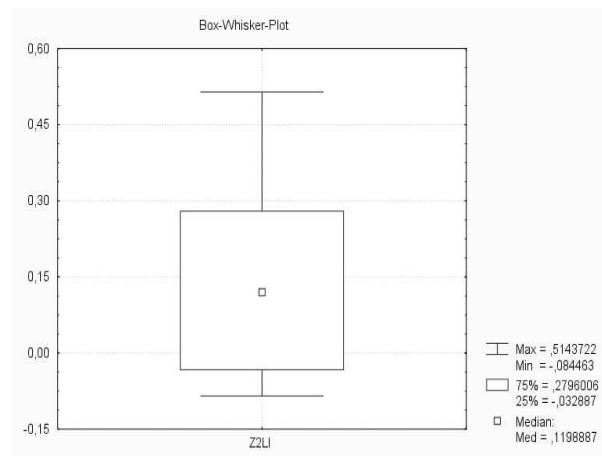


Abbildung M.49: Diagnose 5 (Fusionen mit perivertebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 2, links, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des linken Zeh 2 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=4$ ,  $Z=1,363$ ,  $p=0,173$

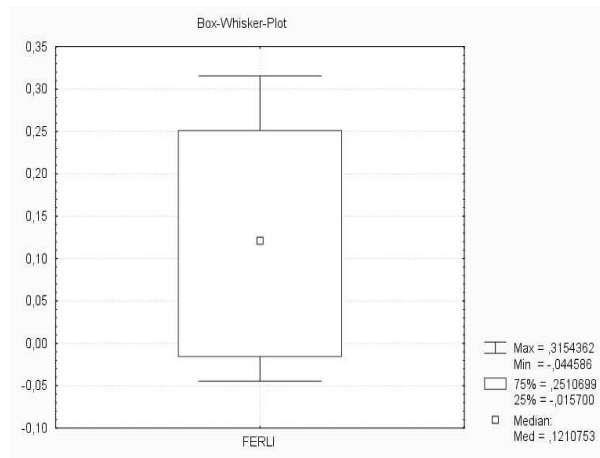


Abbildung M.50: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Ferse, links, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der linken Ferse gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=4, Z=1,363, p=0,173

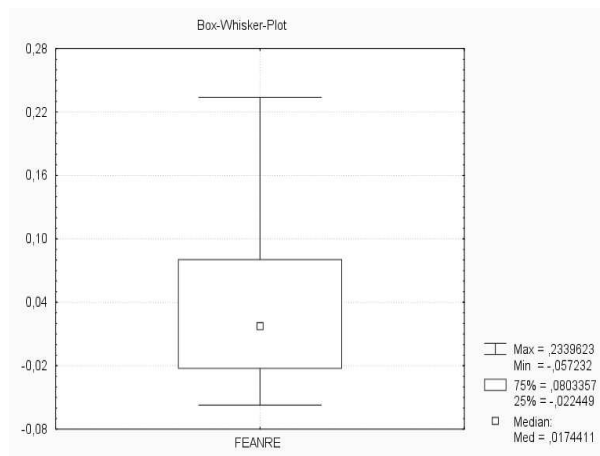


Abbildung M.51: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, gemittelter Flächenwert, rechts, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ, rechte Fußrückeninnenfläche gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=7, Z=0,734, p=0,463

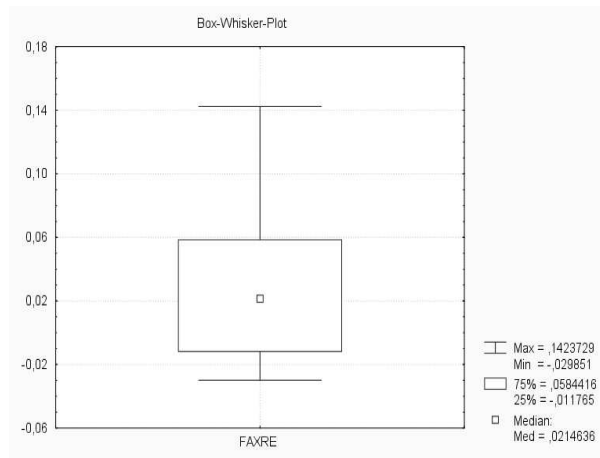


Abbildung M.52: Diagnose 5 (Fusionen mit perivertebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, rechts, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ, der rechten Ferse gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=4$ ,  $Z=1,363$ ,  $p=0,173$

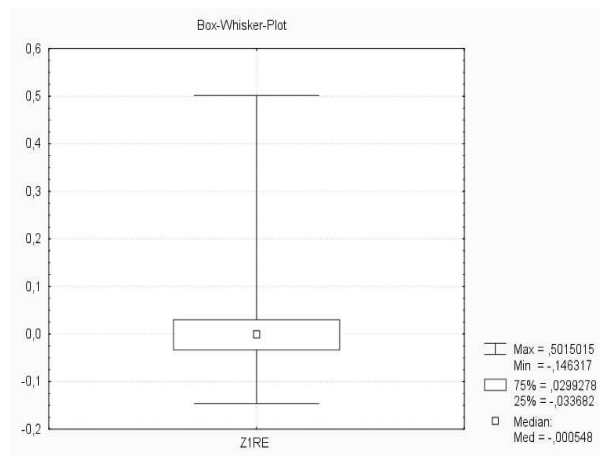


Abbildung M.53: Diagnose 5 (Fusionen mit perivertebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 1, rechts, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des rechten Zeh 1 gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=10$ ,  $Z=0,105$ ,  $p=0,197$



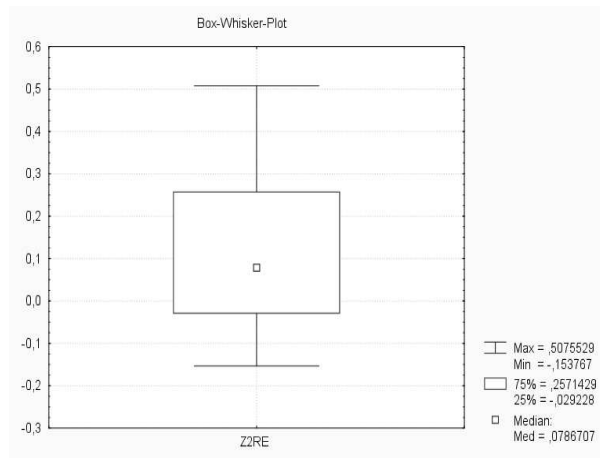


Abbildung M.54: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Zeh 2, rechts, distale Phalanx, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ des rechten Zeh 2 gegen  $H_O$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=6$ ,  $Z=0,943$ ,  $p=0,345$

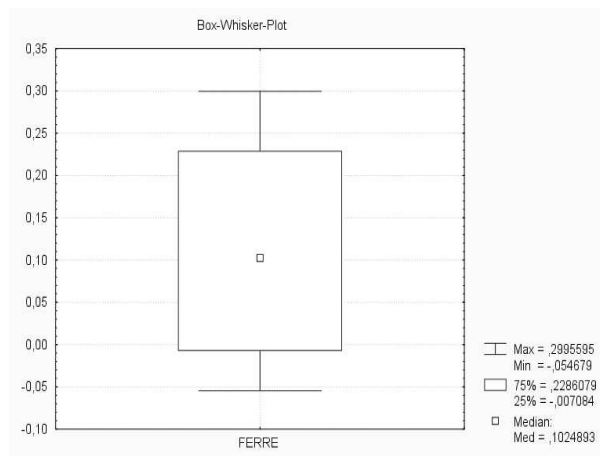


Abbildung M.55: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Temperaturänderung, gruppenbezogen, (Punktmessung Ferse, rechts, zentral-posterior, MW aus dreifach manueller Ausmessung) prä- vs. postoperativ der rechten Ferse gegen  $H_O$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=4$ ,  $Z=1,363$ ,  $p=0,173$

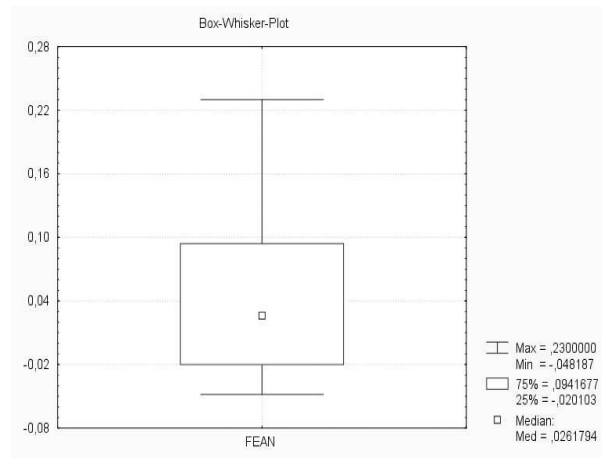


Abbildung M.56: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Fußrückeninnenfläche prä- vs. rechte und linke Fußrückeninnenfläche postoperativ (Fußrückeninnenfläche, gemittelter Flächenwert, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=6$ ,  $Z=0,943$ ,  $p=0,345$

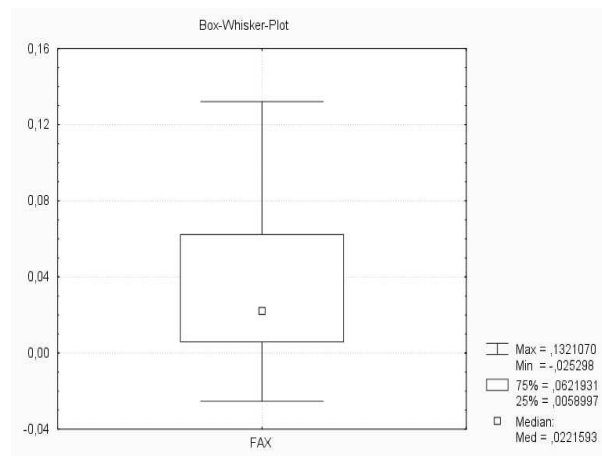


Abbildung M.57: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Fußrückeninnenfläche prä- vs. rechte und linke Fußrückeninnenfläche postoperativ (Fußrückeninnenfläche, Maximalwert, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=3$ ,  $Z=1,572$ ,  $p=0,116$

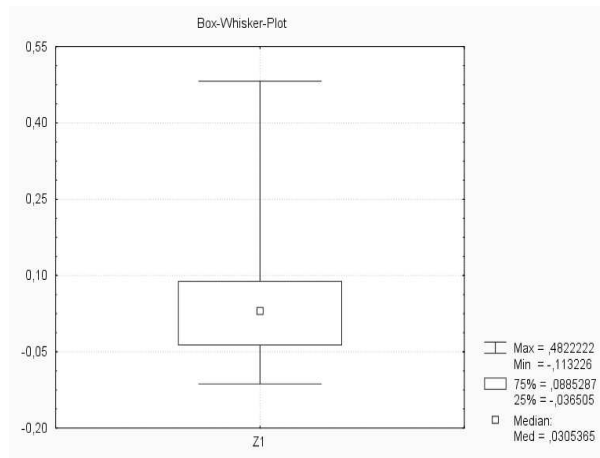


Abbildung M.58: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Summentemperaturänderung rechter und linker Zeh 1 prä- vs. rechter und linker Zeh 1 postoperativ (Zeh 1, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=8, Z=0,524, p=0,600

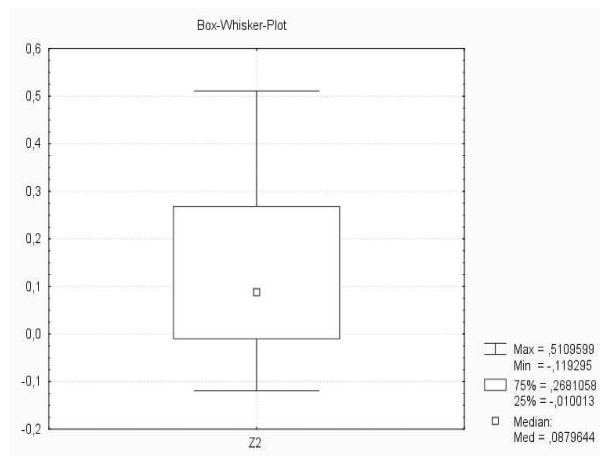


Abbildung M.59: Diagnose 5 (Fusionen mit perivetebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Summentemperaturänderung rechter und linker Zeh 2 prä- vs. rechter und linker Zeh 2 postoperativ (Zeh 2, distale Phalanx, zentral-dorsal, MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten. N=6, T=4, Z=1,363, p=0,173

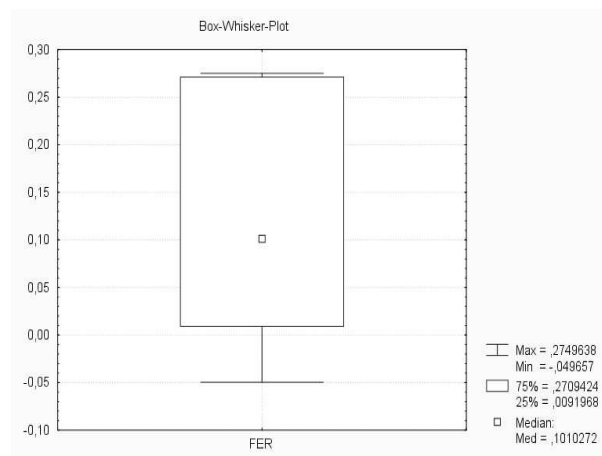


Abbildung M.60: Diagnose 5 (Fusionen mit perivertebralem [beidseitigem] Geschehen): Mittlere Summentemperaturänderung rechte und linke Ferse prä- vs. rechte und linke Ferse postoperativ (Ferse, zentral-dorsal, MW MW aus dreifach manueller Ausmessung) gegen  $H_0$  in relativen Einheiten.  $N=6$ ,  $T=3$ ,  $Z=1,572$ ,  $p=0,116$

# Anhang N

## Abkürzungen

ALIF	Anteriore lumbale interkorporelle Fusion
ASA	American Society of Anesthesiologists
AVK	Arterielle Verschlusskrankheit
CRPS	Complex regional pain syndrome
d/v-Fusion	dorso/ventrale Fusion
d/v/d-Fusion	dorso/ventro/dorsale Fusion
G-5	Glukoselösung 5%in Wasser
HES	Hydroxyethylstärke
L	links
MW	Molekulargewicht, Mittelwert
NaCl	Natriumchlorid
NPP	Nukleus-pulposus-Prolaps
OP	Operation
OS	Oberschenkel
pxl	Pixel
R	rechts
RSD	Reflex sympathetic dystrophy
SD	Standard deviation
SMP	Sympathetically maintained pain
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
TIFF	Tagged image file format
UKE	Universitätskrankenhaus Hamburg-Eppendorf
UKSH	Universitätskrankenhaus Schleswig-Holstein
US	Unterschenkel
VAS	Visuelle Analogskala
VDS	Ventrale Derotationsspondylodese
WS	Wirbelsäule
WK	Wirbelkörper

# Anhang O

## Danksagung

Der Verfasser möchte folgenden Personen danken:

- Herrn Dr. med. Lothar Wiesner, Oberarzt der Klinik und Poliklinik für Orthopädie (UKE), Leiter des Wirbelsäulentams, für die Überlassung des Themas und die konstruktive Zusammenarbeit über den gesamten Zeitraum der Arbeit
- Herrn Prof. Dr. med. Helge Beck, Oberarzt und Leiter der Schmerzklinik, Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie (UKE), für die kontinuierlich sehr gute Zusammenarbeit nebst inhaltlichen Anregungen und Überlassung der logistischen Infrastruktur
- Herrn Dipl.-phys. Dr. Georg Deuretzbacher, Klinik und Poliklinik für Orthopädie (UKE), für die Beratung und Hilfe bei der Durchführung statistischer Analysen
- Herrn Dipl.-phys. und Arzt Erk Pörksen, Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde, UKSH-Campus Lübeck, für seine Ratschläge und Hilfe bei physikalischen und statistischen Fragestellungen
- Frau Hanna Niemann (Dipl. Kultur-, Kommunikations-, Sprachwissenschaften), für ihr gewissenhaftes Lektorat
- Herrn Dr. med. Hermann Köhle, Facharzt für Anästhesie, Intensivmedizin und Schmerztherapie, medalp – Zentrum für ambulante Chirurgie, Imst/Österreich, sowie
- Herrn Dr. med. Richard Platzek, Facharzt für Orthopädie, Klinik und Poliklinik für Orthopädie (UKE), für die fachliche Beratung während der Startphase des Projektes
- Herrn Joachim Wagner, Informatiker der Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie (UKE), für seine Hilfe beim Management der Datenbank

- Frau Evelyne Schlegel, Sekretärin der Schmerzlinik, Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie (UKE), für ihre kompetente und verbindliche Organisation des Patiententransfers zwischen den Kliniken; ihr Engagement war außerordentlich hilfreich

## Anhang P

# Selbständigkeitserklärung (Eidesstattliche Versicherung)

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe, und daß ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Berlin, 20. Januar 2005 M. Petzold



# Anhang Q

## Lebenslauf

PERSÖNLICHE DATEN	
	Matthias Wolfram Petzold geboren am 08. August 1973 in Braunschweig aufgewachsen in Königslutter am Elm wohnhaft Goehrener Straße 5, D-10437 Berlin Ledig, deutsche Staatsangehörigkeit
SCHULAUSBILDUNG	
1980 -1993	Abitur am 12. Mai 1993 am Gymnasium am Bötschenberg in Helmstedt
UNIVERSITÄRE AUSBILDUNG	
1993-1994 1994-1995 1995-2003	Studium der Rechtswissenschaft Rheinische Universität zu Bonn Studium der Physik Technische Universität Braunschweig Studium der Medizin, Universität Hamburg Abschluss: Staatsexamen

FAMULATUREN		
1999	Innere Medizin	AK Barmbek
1999	Chirurgie	Palmerston North Hospital,
1999	Radiologie	North Island,
1999	Notfallmedizin	Neuseeland
1999	Anästhesie	
1999	Gynäkologie	UK Eppendorf
2000	Orthopädie	University of Hong Kong
PRAKTISCHES JAHR		
2002	Chirurgie	AK Eilbek
2002	Innere Medizin	UK Eppendorf
2002-2003	Orthopädie	UK Eppendorf
EXAMINA		
1997	Physikum	
2001	1. Staatsexamen	
2002	2. Staatsexamen	
2003	3. Staatsexamen	
ARBEITSVERHÄLTNIS		
seit 02/2004	Arzt an der Klinik für Kardiologie Deutsches Herzzentrum Berlin	

Berlin, 20. Januar 2005 M. Petzold

# Literaturverzeichnis

- [1] Abernathy, M., Uematsu, S. (editors): Medical Thermology. 1st edition. Published by the American Academy of Thermology, Georgetown University Medical Center, Washington D.C., 1986, S. 6-16
- [2] Altomare, D.F. et al.: Acetylcholine sweat test: An effective way to select patients for lumbar sympathectomy. *Lancet* 344: 976-978 (1994)
- [3] Ash, C.J. et al.: Thermography and the sensory dermatome. *Skeletal Radiol* 15: 40-46 (1986)
- [4] Atkinson, R.S. et al.: A synopsis of Anaesthesia. 10th edition. Published under the Wright imprint by IOP Publishing Ltd., Bristol, UK, 1987, S. 725
- [5] Awerbuch, M.S.: Thermography - its current diagnostic status in musculoskeletal medicine. *Med J Aust* 154 April 1: 441-444 (1991)
- [6] Awerbuch, M.S.: Thermography - whither the niche? *Med J Aust* 154: 444-447 (1991)
- [7] Barcroft, H., Walker, A.J.: Return of tone in blood vessels of the upper limb after sympathectomy. *Lancet* 18: 1035-1039 (1949)
- [8] Baron, R., Jänig, W.: Schmerzsyndrome mit kausaler Beteiligung des Sympathikus. *Anaesthesist* 47: 4-23 (1998)
- [9] Benninghoff, Alfred (Hrsg.: Drenckhahn, D., Zencker, W.): Makroskopische Anatomie, Embryologie und Histologie des Menschen. 15. Aufl., Band 2, Urban und Schwarzenberg, München – Wien – Baltimore, 1993, S. 325-404 (Bd.1), S. 285 u. S. 635-638 (Bd.2)
- [10] Bianchi, S.D. et al.: Circadian variations in the cutaneous thermal map in normal subjects. *Acta Thermographica* 4: 95-98 (1976)
- [11] Birklein, F. et al: Sudomotor function in sympathetic reflex dystrophy. *Pain* 69: 49-54 (1997)

- [12] Birklein, F., Riedl, B., Sieweke, N., Weber, M., Neundörfer, B.: Neurological findings in complex regional pain syndromes - Analysis of 145 cases. *Acta Neurol Scand* 101: 262-269 (2000)
- [13] Brelsford, K.L., Uematsu, S.: Thermographic presentation of cutaneous sensory and vasomotor activity in the injured peripheral nerve. *J Neurosurg* 62: 711-715 (1985)
- [14] Buchwald, W., Habighorst, L.V., Hülse, R.: Thermographie bei Durchblutungsstörungen der Extremitäten. *Radiologe* 13: 329-334 (1973)
- [15] Clark, R.P., Stothers, J.K.: Neonatal skin temperature distribution using infrared colour thermography. *J Physiol* 302: 323-333 (1980)
- [16] Clark, R.P., Mullan, B.J., Pugh, L.G.C.E.  
Skin temperature during running - A study using infrared colour thermography. *J Physiol* 267: 53-62 (1977)
- [17] Clark, R.P., Goff, M.R., MacDermot, K.D.: Identification of functioning sweat pores and visualization of skin temperature patterns in X-linked hypohidrotic ectodermal dysplasia by whole body thermology. *Hum Genet* 86: 7-13 (1990)
- [18] Clement, D.L.: Sympathetic nervous control of muscle and skin circulation. *J Cardiovas Surg* 20: 291-293 (1979)
- [19] Cowley, R.A. et al.: Anatomic observations on the lumbar sympathetic nervous system. *Surgery* 25(6): 880-890 (1949)
- [20] Crock, H.V.: Anterior lumbar interbody spine fusion. *Clin Orthop Rel Res* 165: 157-163 (1982)
- [21] Delius, W. et al.: General characteristics of sympathetic activity in human muscle nerves. *Acta Physiol Scand* 84: 65-81 (1972)
- [22] Delius, W. et al.: Manoeuvres affecting sympathetic outflow in human skin nerves. *Acta Physiol Scand* 84: 177-186 (1972)
- [23] Dielen, van, F.M.H., Kurvers, H.A.J.M., Dammers, R., oude Egbrink, M.G.A., Slaaf, D.W., Tordoir, J.H.M., Kitslaar, P.J.E.H.M.: Effects of surgical sympathectomy on skin blood flow in a rat model of chronic limb ischemia. *World J Surg* 22: 807-811 (1998)
- [24] Dertwinkel, R., Tryba, M., Zenz, M.: Sympathische Reflexdystrophie, Stumpf-und Phantomschmerz. *Dtsch Ärztebl* 91(24): 1275-1282 (1994)
- [25] Doenicke, A. et al.: *Anästhesiologie*, 7. Auflage, Springer, 1995, S. 10 f.

- [26] Dondysh, L.M.: Thermography as a diagnostic tool in post-traumatic radiculopathy & clinical laboratory assessment thereof. *J Neurol Orthop Med Surg* 9(2): 180 (1988)
- [27] Duensing, F., Becker, P., Rittmeyer, K.: Thermographische Befunde bei lumbalen Bandscheibenprolapsen. *Arch. Psychiat. Nervenkr.* 217: 53-70 (1973)
- [28] Duff, R.: Circulatory changes in the forearm following sympathectomy. *Clin Sci* 10: 529-539 (1951)
- [29] Edeiken, J., Wallace J.D., Curley, R.F., Lee, S.: Thermography and herniated lumbar disks. *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl* 102(4): 790-796 (1968)
- [30] Elie, B., Guiheneuc, P.: Sympathetic skin response: Normal results in different experimental conditions. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* 76: 258-267 (1990)
- [31] Frick, Leonhardt, Starck: *Allgemeine Anatomie, Spezielle Anatomie*, 4. überarb. Auflage, Thieme, Stuttgart – New York, 1992, S. 150 (Bd.1), S. 601-606 (Bd. 2)
- [32] Gandhavadi, B., Rosen, J.S., Addison, R.G.: Autonomic pain: Features and methods of assessment. *Postgrad Med* 71: 85-90 (1982)
- [33] Gibbons, J.J., Wilson, P.R.: RSD Score: Criteria for the diagnosis of Reflex Sympathetic Dystrophy and Causalgia. *Clin J Pain* 8: 260-263 (1992)
- [34] Gillström, P.: Thermography in low back pain and sciatica. *Arch Orthop Trauma Surg*, 104: 31-36 (1985)
- [35] Gürtler, B.: Ninhydrin test and sensible Nervenaktionspotential zur Abklärung peripherer Nervenläsionen. *Schweiz Arch Neurol Neurochir Psychiatr* 100(2): 399-410 (1967)
- [36] Guttmann, L.: Die Schweißsekretion des Menschen in ihren Beziehungen zum Nervensystem. *Z Ges Neurol Psychiatr* 135: 1-48 (1931)
- [37] Hagbarth, K.-E et al.: General characteristics of sympathetic activity in human skin nerves. *Acta Physiol Scand* 84: 164-176 (1972)
- [38] Hansler, L., Hendricks, O., Ranft, J., Blank, M.: Reaktive Hyperämie nach arterieller Okklusion: Vergleich der IR-Tele-Thermographie und der Laser-Doppler-Luxometrie. *Vasa*, 24(2): 148-54 (1995)

- [39] Harper, C.M. Jr., Low, P.A., Fealey, R.D., Chelimsky, T.C., Proper, C.J., Gillen, D.A.: Utility of thermography in the diagnosis of lumbosacral radiculopathy. *Neurology* 41 July: 1010-1014 (1991)
- [40] Hobbins, W.B.: Thermography and pain update 1983. Presented at: American Academy of thermology meeting; The John Hopkins University School of medicine. October, 19th - 21st, 1983
- [41] Hoffman, R.M., Kent, D.L., Deyo, R.A.: Diagnostic accuracy and clinical utility of thermography for lumbar radiculopathy. *Spine* 16(6): 623-628 (1991)
- [42] Hoover, N.W.: Methods of lumbar fusion. *The journal of bone and joint surgery* 50-A(1): 194-210 (1968)
- [43] Jänig, W., Stanton-Hicks, M. (editors): Reflex sympathetic dystrophy: A reappraisal. *Progress in pain research and management*, Vol. 6. IASP Press, Seattle, 1996, S. 1-250
- [44] Jänig, W.: Pain and the sympathetic nervous system. In: Bannister, R., Mathias, C.J. (editors): *Autonomic failure. A textbook of clinical disorders of the autonomic nervous system*, 3rd ed. Oxford University Press, Oxford, New York, Tokio, 1992, S. 231-251
- [45] Johnson, R.H., Prout, B.J.: Dissociation of some sympathetic nervous functions. *Bibliotheca Anatomica* 9: 349-354 (1967)
- [46] Kamischke, A., Nieschlag, E.: Treatment of retrograde ejaculation and anejaculation. Mini symposium: Non surgical sperm recovery: Part II. *Human Reproduction Update* 5(5): 448-474 (1999)
- [47] Kappey, F., Brach, K.D., Nicolescu, R.F.: Der Einfluß der lumbalen Grenzstrangresektion auf die Durchblutung der gegenseitigen Gliedmaße bei arterieller Verschußkrankheit vom peripheren Typ. *Verh Dtsch Ges Kreislauforschg* 40: 246-249 (1974)
- [48] Kirby, R.R., Gravenstein, N.: *Clinical Anesthesia Practice*. W.B. Saunders Company. Philadelphia, London, Tokio, 1994, S. 485-492
- [49] Kozak, J.A., Heilman, A.E., O'Brien, J.P.: Anterior lumbar fusion options. *Clin Orthop Rel Res* 300: 45-51 (1994)
- [50] Kozin, F., Ryan, L.M., Carerra, G.F., Soin, J.S.: The Reflex Sympathetic Dystrophy Syndrome (RSDS). *Am J Med* 70: 23-30 (1981)
- [51] Krasemann, P.H.: Untersuchungsmethoden bei peripheren arteriellen Durchblutungsstörungen. *Med Mschr* 27(12): 537-544 (1973)

- [52] Lai, H.-S. et al.: Role of thermography in the diagnosis of undescended testes. *Eur Urol* 33: 209-213 (1998)
- [53] Lefaucheur, J.-P. et al.: Assessment of sympathetic nerve activity in the practice of lumbar sympathectomy: Interest of sympathetic skin responses. *J Auton Nerv Syst* 60: 56-60 (1996)
- [54] Leroy, P.L., Christian, C.R., Filasky, R.: Diagnostic thermography in low back pain syndromes. *Clin J Pain* 1: 4-13 (1985)
- [55] Leroy P.L., Filasky, R.: Thermography as a diagnostic aid in the management of chronic pain: An update. In: Aronoff, G.M.: Evaluation and treatment of chronic pain, 2nd ed., Williams & Wilkins, Baltimore, Hong Kong, London, Munich, 1992, S. 202-212
- [56] Liddington, M.I., Shakespeare, P.G.: Timing of thermographic assessment of burns. *Burns* 22(1): 26-28 (1996)
- [57] Livingstone, S.D., Reed, L.D., Nolan, R.W., Cattroll, S.W.: Measurement of torso skin temperature under clothing. *Eur J Appl Physiol* 57: 225-229 (1988)
- [58] Masuhr, K.F., Neumann, M.: *Neurologie*, 4. Aufl. Stuttgart: Hippokrates, 1998, S. 84-87
- [59] May, A.G., De Weese, J.A., Rob, C.G.: Effect of sympathectomy on blood flow in arterial stenosis. *Annals of Surgery* 158(2): 182-188 (1963)
- [60] Mayer, H.M. (ed): *Minimally invasive spine surgery: A surgical manual; with tables*. Springer, Berlin – Heidelberg – New York, 2000
- [61] Mayer, H.M.: *SOCON Manual, Solid Connection Spinal System Aesculap*, Tuttlingen, Germany, 1997
- [62] Mayer, H.M.: A new microsurgical technique for minimally invasive anterior lumbar interbody fusion. *Spine* 22(6): 691-700 (1997)
- [63] Merskey, H., Bogduk, N. (editors): *Classification of chronic pain: Descriptions of chronic pain syndromes and definitions of pain terms*, 2nd Ed. IASP Press, Seattle 1984, S. 40-43
- [64] Miao, F.J.-P. et al.: Variation in the anatomy of the lumbar sympathetic chain in the rat. *J Auton Nerv System* 56: 115-118 (1995)
- [65] Minor, V.: Ein neues Verfahren zu der klinischen Untersuchung der Schweißabsonderung. *Dtsch Z Nerv Heilk* 101: 302-308 (1928)

- [66] Nimmo, W.S., Smith, G. (editors): *Anaesthesia*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, 1989, S. 1245
- [67] Nocks, B.N.: Erectile dysfunction and pain in the male genitalia. In: Aroff, G.M.: *Evaluation and treatment of chronic pain*, 2nd ed., Williams & Wilkins, Baltimore, Hong Kong, London, Munich, 1992, S. 303-312
- [68] Normell, L.A., Wallin, G.B.: Sympathetic skin nerve activity and skin temperature changes in man. *Acta Physiol Scand* 91: 417-426 (1974)
- [69] Obayashi, K. et al.: Effect of sildenafil citrate (Viagra) on erectile dysfunction in a patient with familial amyloidotic polyneuropathy ATTR Val30Met. *J Autom Nerv System* 80: 89-92 (2000)
- [70] Ochsenkühn, R., Kamischke, A., Nieschlag, E.: Imipramine for successful treatment of retrograde ejaculation caused by retroperitoneal surgery. *Int J Androl*, 22: 173-177 (1999)
- [71] Ohnesorge, H.: Thermographie. In: Beck, H., Martin, E., Motsch, J., Schulte am Esch, J.: *Schmerztherapie*, AINS (Bd. 4). 1. Aufl., Thieme, Stuttgart, New York, 2002, S.564-567
- [72] Ozaki, M. et al.: The threshold for thermoregulatory vasoconstriction during nitrous oxide/sevoflurane anesthesia is reduced in the elderly *Anesth Analg* 84: 1029-1033 (1997)
- [73] Pässler, H.W.: Chirurgie der Durchblutungsstörungen. *Zentralbl Chir* 83: 356-381 (1958)
- [74] Pfeiffer, M. et al.: Standardized evaluation of long-term results after anterior lumbar interbody fusion. *Eur Spine J* 5: 299-307 (1996)
- [75] Plancarte, R., Calvillo, O.: Complex Regional Pain Syndrome Type 2 (Causalgia) after laser discectomy: A case report. *Spine* 22: 459-462 (1997)
- [76] Pochaczewsky, R., Wexler, C.E., Meyers, P.H., Epstein, J.A., Marc, J.A.: Liquid cristal thermography of the spine and extremities. *J Neurosurg* 56: 386-395 (1982)
- [77] Pulst, S.-M., Haller, P.: Thermographic assessment of impaired sympathetic function in peripheral nerve injuries. *J Neurol* 226: 35-42 (1981)
- [78] Rens, van, T.J.G.: Erfahrungen mit der vorderen lumbalen Spondylodesis. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 102(4): 546-558 (1967)
- [79] Richter, C.P., Otenasek, F.J.: Thoracolumbar sympathectomies examined with the electrical skin resistance method. *J Neurosurg* 3: 120-134 (1946)



- [80] Richter, C.P., Woodruff, B.G.: Lumbar sympathetic dermatomes in man determined by electrical skin resistance method. *J Neurophysiol* 8: 323-338 (1945)
- [81] Robicsek, F., Daugherty, H.K., Cook, J.W., Selle J.G., Hess, P.J., Vajtai, P.: The value of thermography in the early diagnosis of postoperative sternal wound infection. *Thorac Cardiovasc Surg* 32: 260-265 (1984)
- [82] Rocco, A.G., Palombi, D., Raeke, D.: Anatomy of the lumbar sympathetic chain. *Regional Anesthesia* 20(1): 13-19 (1995)
- [83] Scadding, J.W.: Complex regional pain syndrome. In: Wall, P.D., Melzack, R. (editors): *Textbook of pain*, 4th ed., Churchill Livingstone, Edinburgh, London, New York, 1999, S. 835-840
- [84] Schäfer, M., Stein, C.: Sympathisches Nervensystem und Schmerz. *Anaesthesist* 47: 2-3 (1998)
- [85] Schliack, H., Schiffter, R.: Differentialdiagnostische Möglichkeiten in der peripheren Neurologie mit Hilfe des Ninhydrintests. *Acta Neurovegetativa* 30(1): 512-521 (1967)
- [86] Shiloh, R., Nutt, D., Weizman, A.: Ejaculation: Supposed mechanism and various agents that can affect retrograde ejaculation. In: *Atlas of Psychiatric Pharmacotherapy*. Martin Dunitz, London, 1999, S. 86-89
- [87] Schuhfried, O. et al.: Thermographic parameters in the diagnosis of secondary Renaud's phenomenon. *Arch Phys Med Rehabil* 81: 495-499 (2000)
- [88] Simeone, F.A.: The anatomy of the lumbar sympathetic trunks in man. *J Cardiovas Surg* 20: 283-285 (1979)
- [89] So, Y.T., Aminoff, M.J., Olney, R.K.: The role of thermography in the evaluation of lumbosacral radiculopathy. *Neurology* 39: 1154-1158 (1989)
- [90] Someren, van, E.J.W.: More than a marker: Interaction between the circadian regulation and sleep, age-related changes and treatment possibilities. *Chronobiol Int* 17(3): 313-354 (2000)
- [91] Stanton-Hicks, M., Jänig, W. et al.: Reflex sympathetic dystrophy: Changing concepts and taxonomy. *Pain* 63: 127-133 (1995)
- [92] Stauffer, R.N., Coventry, M.B.: Anterior interbody lumbar spine fusion. *The journal of bone and joint surgery* 54-A(4): 756-768 (1972)
- [93] Stöhr, M., Riffel, B.: Nerven- und Nervenwurzelläsionen (aus der Reihe: *Praktische Neurologie*, Hrsg. Neundörfer, B.), Thieme, Stuttgart, 1988, S. 404-406

- [94] Stricht, van der, J.P.: Effect of lumbar sympathectomy on the lower extremity. *J Cardiovas Surg* 20: 301-306 (1979)
- [95] Takahashi, Y., Takahashi, K., Moriya, H.: Thermal deficit in lumbar radiculopathy. *Spine* 19(21): 2443-2449 (1994)
- [96] Takahashi, K. et al.: Long-term results of anterior interbody fusion for treatment of degenerative spondylolisthesis. *Spine* 15(11): 1211-1215 (1990)
- [97] Takahashi, Y. et al.: Segmental regulation pattern of body surface temperature in the rat hindlimb (research report). *Brain Research* 947: 100-109 (2002)
- [98] Tran, K.M. et al.: Lumbar sympathetic block for sympathetically maintained pain: Changes in cutaneous temperatures and pain perception. *Anesth Analg* 90: 1396-1401 (2000)
- [99] Trepel, M.: *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*, 2. komplett überarb. Aufl., Urban und Fischer, München – Jena, 1999, S. 250-253
- [100] Tucker, A.T.: Infrared thermographic assessment of the human scrotum. *Fertility and Sterility* 74(4): 802-803 (2000)
- [101] Uematsu, S.: Thermographic imaging of cutaneous sensory segment in patients with peripheral nerve injury. *J Neurosurg* 62: 716-720 (1985)
- [102] Uematsu, S. et al.: Quantification of thermal asymmetry Part 1: Normal values and reproducibility. *J Neurosurg* 69: 552-555 (1988)
- [103] Uematsu, S. et al.: Quantification of thermal asymmetry Part 2: Application in low back pain and sciatica. *J Neurosurg* 69: 556-561 (1988)
- [104] Uematsu, S., Hendler, N., Hungerford, D., Long, D., Ono, N.: Thermography and electromyography in the differential diagnosis of chronic pain syndromes and reflex sympathetic dystrophy. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 21(2/3): 165-182 (1981)
- [105] Urban, B.J., McKain, C.W.: Local anesthetic effect of intrathecal normal saline. *Pain* 5: 43-52 (1978)
- [106] Watmough, D.J., Fowler, P.W., Oliver, R.: The thermal scanning of a curved isothermal surface: Implications for clinical thermography. *Phys Med Biol* 15(1): 1-8 (1970)
- [107] White, J.C., Okelberry, A.M., Whitelaw, G.P.: Vasomotor tonus of the denervated artery. *Archives of Neurology and Psychiatry* 36: 1251-1276 (1936)

- [108] Whitelaw, G.P., Smithwick, R.H.: Some secondary effects of sympathectomy; with particular reference to disturbance of sexual function. *New Eng J Med* 245(4): 121-130 (1951)
- [109] Wiegel, D., Herold, W.: Thermographie mit Flüssigkristallen. *Z Med Labortechnik* 17: 306-314 (1976)
- [110] Williams, G.P.L., Warwick, R., Dyson, M., Bannister, L.H.: *Gray's Anatomy, Thirty-Seventh Edition* (distributed in the United States of America), London, Churchill Livingstone (1989) S. 1156-1163
- [111] Zelle, B. et al.: Upper sympathetic trunc lesion after video-assisted fracture stabilisation of the thoracic spine: A case report. *J Spinal Disord Techniques* 15(6): 502-06 (2002)