

Aus dem  
Zentrum für spezielle Chirurgie des Bewegungsapparates  
Lehrstuhl für Orthopädie (Prof. Dr. med. U. Weber)  
Lehrstuhl für Unfallchirurgie (Prof. Dr. med. W. Ertel)  
Charité – Universitätsmedizin Berlin, Campus Benjamin Franklin,  
Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (Direktor: Prof. Dr. med. W. Ertel)

**Thema:** „Experimentelle Untersuchungen zur Instabilität der lumbalen Wirbelsäule – Entwicklung eines intraoperativ anwendbaren Messgerätes zur dreidimensionalen Aufzeichnung von Kraft-Weg-Kurven an menschlichen lumbalen Bewegungssegmenten“

Habilitationsschrift  
zur Erlangung der Lehrbefähigung  
für das Fach

### **Orthopädie**

vorgelegt der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Herrn Dr. Ralph Kayser

geboren am 18.11.1965 in Berlin

Dekan: Prof. Dr. med. Martin Paul

Datum der Habilitation: November 2006

Gutachter: 1. Prof. Dr. med. J. Krämer, Bochum  
2. Prof. Dr. med. J. Grifka, Regensburg

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und bisheriger Entwicklungsstand</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b><i>Theoretischer Forschungsstand</i></b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b><i>Klinischer Forschungsstand</i></b>	<b>11</b>
<b>1.3</b>	<b><i>Forschungsstand Messtechnik</i></b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b><i>Patentrecherche</i></b>	<b>21</b>
<b>1.5</b>	<b><i>Zusammenfassung</i></b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>Spezifische Ziele des Projektes</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>Realisierung des Projektes</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b><i>Radiologische prospektive Studie zur Erfassung lumbaler Instabilität</i></b>	<b>30</b>
4.1.1	Design und Auswahl der Messverfahren	30
4.1.1.1	<b>Angulation</b>	<b>32</b>
4.1.1.2	<b>Translation</b>	<b>34</b>
4.1.2	Statistische Analyse	35
<b>4.2</b>	<b><i>Entwicklung einer Kopplungsmöglichkeit zwischen Wirbelsäule und Messgerät</i></b>	<b>39</b>
<b>4.3</b>	<b><i>Entwicklung eines Messgerätes zur Erfassung und Analyse von Kraft-Weg-Kurven am menschlichen lumbalen Bewegungssegment</i></b>	<b>40</b>
4.3.1	Messbereiche	41
4.3.2	Segmentale Kraft-Weg-Analyse: Dummy-Versuche	41
4.3.3	Segmentale Kraft-Weg-Analyse: Anwendung am Präparat	42
4.3.4	Analyse etablierter Parameter	44

<b>4.3.4.1 Verfahren: Röntgen</b>	<b>44</b>
<b>4.3.4.2 Verfahren: Histologische Aufarbeitung</b>	<b>44</b>
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>46</b>
<b>5.1 Radiologische Studie</b>	<b>46</b>
5.1.1 Zusammenfassung	46
5.1.2 Korrelationsanalyse	47
5.1.3 Kennwerte und Übereinstimmungsberechnungen	48
5.1.4 Bewertung der Messmethoden hinsichtlich Beurteilerübereinstimmungen	51
<b>5.1.4.1 Unterschiede Dupius-Angulation und Stokes-Angulation</b>	<b>51</b>
<b>5.1.4.2 Unterschiede Dupius-Angulation und Panjabi-Angulation</b>	<b>51</b>
<b>5.1.4.3 Unterschiede Stokes-Angulation und Panjabi-Angulation</b>	<b>52</b>
<b>5.1.4.4 Unterschiede Dupius-Translation und Morgan-Translation</b>	<b>53</b>
<b>5.1.4.5 Unterschiede Dupius-Translation und Panjabi-Translation</b>	<b>53</b>
<b>5.1.4.6 Unterschiede Morgan-Translation und Panjabi-Translation</b>	<b>54</b>
5.1.5 Beispiele der Einzelergebnisse	55
5.1.6 Zusammenfassung hinsichtlich Übereinstimmungen der Messmethoden	60
5.1.7 Diskussion	61
<b>5.2 Entwicklung eines Kopplungsadapters</b>	<b>64</b>
5.2.1 Zusammenfassung	64
5.2.2 Kopplung über interspinöse Clamps	64
5.2.3 Kopplung über Drähte und Pins	65
5.2.4 Kopplung über Pedikelschrauben	67
<b>5.2.4.1 Kopplung über monoaxiale Schrauben</b>	<b>68</b>

<b>5.2.4.2 Kopplung über polyaxiale Schrauben</b>	<b>70</b>
<b>5.2.4.3 Realisierung eines anwendbaren Kopplungsadapters – Kopplung über polyaxiale Schrauben MOSS-MAX</b>	<b>71</b>
5.2.5 Diskussion	80
<b>5.3 Entwicklung eines Messgerätes</b>	<b>84</b>
5.3.1 Zusammenfassung	84
5.3.2 Hebelsystem	85
5.3.3 Sensorik	86
<b>5.3.3.1 Erfassen von Wegen und Winkeln</b>	<b>86</b>
5.3.3.1.1 Hexapodmesssystem	88
5.3.3.1.2 Neigungssensoren	88
<b>5.3.3.2 Erfassung von Kräften und Momenten</b>	<b>89</b>
<b>5.3.3.3 Signalverarbeitung</b>	<b>90</b>
5.3.4 Patentierung	91
5.3.5 Anwendung am Dummy	92
5.3.6 Anwendung am menschlichen Situs	95
<b>5.3.6.1 Messwerte im Einzelnen</b>	<b>99</b>
<b>5.3.6.2 Errechnung der Steifigkeiten</b>	<b>102</b>
<b>5.3.6.3 Errechnung der Flexibilitätskoeffizienten</b>	<b>105</b>
5.3.7 Radiologische Befunde der Segmente	111
5.3.8 Histologische Befunde der Segmente	112
5.3.9 Diskussion	114

## 8. Danksagung

Am Ende eines Forschungsprojektes ist es mir ein besonderes Bedürfnis, allen beteiligten Mitarbeitern gesondert zu danken. Nur in der Ballung der Kräfte aller Beteiligten war letztlich die erfolgreiche Realisierung des Projektes möglich. Aber auch Menschen, die mich in meiner beruflichen Entwicklung beeinflusst haben, sollen hier genannt werden.

Professor Henning Graßhoff, Magdeburg, weckte in mir frühzeitig das Interesse an der Wirbelsäulenchirurgie. Er war fachlich und menschlich jederzeit in einer Weise ansprechbar, die heute schon als Ausnahme zu bezeichnen ist. Dr. Heinrich Böhm, Bad Berka, nahm mich in seiner Klinik auf und brachte mir die ersten wirbelsäulenchirurgischen Schritte bei. Professor Wolfram Neumann, Magdeburg, unterstützte mich immer auf meinem Weg und gab mir während meiner außeruniversitären Zeit den notwendigen akademischen Background. Professor Engelbert Seeber, Dessau, lies mich gewähren und förderte meine wissenschaftlichen Ambitionen – durchaus keine Selbstverständlichkeit.

Interdisziplinäre Forschungsprojekte lassen sich nur durch interdisziplinäre Kontakte anbahnen. Aus früheren Tagen seien besonders Dipl. Ing. Norbert Brückner, Weimar, Dipl. Ing. Stefan von Dosky, Jena, und Professor Thomas Heiderich, Jena, genannt.

Meinen Forscherkollegen, die direkt an diesem Projekt beteiligt waren, kann ich nicht genug danken, da sie eine erfolgreiche Realisierung erst ermöglichten. In vorderster Reihe standen Dipl. Ing. Michael Möhwald, Dipl. Ing. Andreas Riess und Dipl. Ing. Wilhelm Erdt, alle Jena; allzeit unterstützt von Professor Dirk Heinze, Jena, bzw. Dipl. Ing. André Beutler und Dipl. Ing. Paul Kloninger, beide Fulda. Herr Kloninger führte auch die Modellrechnungen durch.

Durch sein Wirken wesentlich zum Positiven beeinflusst hat Herr Dr. Dietrich Werner, Berlin, den Fortgang des Projektes. Ohne ihn wäre eine finanzielle Förderung wohl nicht zu Stande gekommen.

Große Unterstützung erfuhr ich zunächst von Professor Wolfgang Schmidt, Leipzig. Zwischen die Räder der modernen Wissenschaftsmühle geraten, bedauerte er sein Ausscheiden aus der Arbeitsgruppe sehr. Ich verdanke ihm viel und ich weiß, wie sehr ihn der erfolgreiche Abschluss des Projektes freut. In großer Not nahm mich Professor Gottfried Bogusch, Berlin, unter seine anatomischen Fittiche und sicherte so den Fortgang des Projektes. Seine Hilfe war schnell und unkompliziert. In gleichem Atemzug ist Dipl. Phys. Ralf Juran, Berlin, zu nennen, der sich freundlich und engagiert um die Bereitstellung eines Bildwandlers kümmerte. PD Dr. Dr. Werner Hopfenmüller, Berlin, und Dipl. Psych. Christoph Droß, Berlin, hatten zahlreiche biometrische Ideen und übernahmen die statistische Aufarbeitung der Daten. Die histologischen Schnitte stellte Prosektor Dr. Harald Ebhardt, Berlin. Frau Marianne Peters, Berlin, erstellte die Graphiken. Vielen Dank allen. Tobias Schaaf, Dessau, sei für die Hilfe in Bezug auf die radiologische Studie und für seine Assistenz bei den anatomischen Studien gedankt.

Professor Wolfgang Ertel, Berlin, unterstützte mich während der besonders sensiblen Endphase des Projektes und ermöglichte so einen zeitnahen Abschluss. Hierfür gebührt ihm besonderer Dank.

Gesondert gedankt seien weiterhin Professor Ulrich Weber, Berlin, und Dr. Antonius Rohlmann, Berlin. Sie gaben mir fachliche und moralische Unterstützung. Dr. Rohlmann war insbesondere wertvoller Ansprechpartner, da er über eine überaus reiche Erfahrung auf dem Gebiet der Biomechanik der Wirbelsäule verfügt und mich damit sehr unterstützte. Dr. Rohlmann las auch das Manuskript und gab wertvolle fachliche und gestalterische Hinweise. Arnold Sender las akribisch Korrektur. Gespräche mit Professor Jürgen Krämer, Bochum, Professor Joachim Buchmann, Rostock, und Dr. Gabriele Harke, Berlin, gaben Antrieb zum Fortfahren. Danke auch an PD Dr. Philip Stahel der mich von seiner akademischen Erfahrung profitieren ließ.

Unkompliziert half Andreas Brauns von der Firma DePuy. Er stellte selbstlos Schrauben und Instrumente zur Verfügung, ohne die eine solche Studie nicht machbar ist. Ihre Uneigennützigkeit kann in der heutigen Zeit nicht genug betont werden.

Ohne private Unterstützung ist eine derartig lange Zeit des angespannten Forschens nicht realisierbar. Danke an Ursula Sender. Ich danke ganz besonders meinem Bruder, Professor Manfred Kayser, Rotterdam, für seine ständige Bereitschaft zu fachlicher und menschlicher Hilfe. Er ermunterte mich stets, den nächsten Schritt zu gehen und war mir auch akademisches Vorbild. Mein Freund Dr. Christoph Heyde, Berlin, gab mir ein wirbelsäulenchirurgisches Umfeld, in dem die Notwendigkeit der Realisierung des Projektes in der täglichen Arbeit immer wieder untermauert wurde. Seine Freundschaft hat mir stets geholfen und hilft mir weiterhin.

Lieselotte Kayser hat mit ihrem bahnenden Einfluss die wesentliche Grundlage zur erfolgreichen Beschreitung meines Weges gelegt. Ein Gutteil dieser Arbeit geht auf ihre selbstlos verwandte Lebenszeit und Mühe zurück.

## Abkürzungsverzeichnis

HWS	Halswirbelsäule
BWS	Brustwirbelsäule
LWS	Lendenwirbelsäule
NZ	Neutrale Zone
EZ	Elastische Zone
ROM	Range of motion
FC	Flexibilitätskoeffizient
IF	Instabilitätsfaktor
Flex.	Flexion
Ext.	Extension
Rot.	Rotation
Trans.	Translation
RAM	Rotationsachsenmoment
CT	Computertomographie
MRT	Magnetresonanztomographie
RK1	Untersucher 1 zum Zeitpunkt 1
RK2	Untersucher 1 zum Zeitpunkt 2
TS1	Untersucher 2 zum Zeitpunkt 1
TS2	Untersucher 2 zum Zeitpunkt 2
CH1	Untersucher 3 zum Zeitpunkt 1
CH2	Untersucher 3 zum Zeitpunkt 2
Dup	Verfahren nach Dupius et al.
Sto	Verfahren nach Stokes et al.
Panj	Verfahren nach Panjabi et al.
Morg	Verfahren nach Morgan et al.
MW	Mittelwert
Lig.	Ligament
Ligg.	Ligamenta
M.	Musculus
Mm.	Musculi
PLIF	Posterolumbale intersomatische Fusion
AR	Untersucher A
MM	Untersucher B
RK	Untersucher C

## 7. Zusammenfassung

Die degenerative Segmentinstabilität der Lendenwirbelsäule wird sowohl in ihrer klinischen und radiologischen Objektivierbarkeit als auch in ihrer klinischen Relevanz sehr kontrovers diskutiert wird. Andererseits haben degenerative Erkrankungen der Lendenwirbelsäule eine erhebliche volkswirtschaftliche Relevanz. Oftmals ist die Diagnose „lumbale Segmentinstabilität“ Grund für aufwendige Fusionsoperationen. Das klinische Resultat dieser Operationen ist wesentlich von der korrekten Indikationsstellung abhängig. Hierzu sind vor allem objektive Daten unerlässlich. Im vorliegenden Projekt ist zunächst die Genauigkeit der heute als Goldstandard etablierten radiologischen Untersuchung untersucht worden. Anschließend wurde ein neues Messverfahren für die Aufnahme von Kraft-Weg-Kurven in vivo entwickelt.

Die spezifischen Ziele der vorliegenden Studie waren:

### 1. Radiologische Studie:

Anhand von seitlichen Funktionsaufnahmen der Lendenwirbelsäule wurden von drei Untersuchern mit je drei angulatorischen und drei translatorischen Messverfahren lokale Winkel bzw. Gleitstrecken bestimmt. Anschließend erfolgte die Bestimmung der interindividuellen und intraindividuellen Messfehler in Bezug auf alle sechs angewendeten Verfahren. Neben der Korrelation wurden prozentuale Übereinstimmungen und prozentuale Nichtübereinstimmungen (Toleranz +/- 1 mm bzw. +/- 1°) bestimmt.

### 2. Experimentelle Studie I – Kopplungsversuche:

Um perspektivisch ein Messgerät sicher und schnell am Bewegungssegment fixieren zu können, wurde ein Kopplungsmechanismus entwickelt, der diese Bedingungen erfüllt und für die Anwendung in vivo geeignet ist.

### 3. Experimentelle Studie II – Entwicklung und Erprobung eines speziellen Messgerätes zur simultanen Kraft-Wegmessung:

Ziel dieses Teiles der Studie war die Entwicklung eines Messgerätes, das in der Lage sein sollte, dreidimensionale segmentale Kraft-Weg-Kurven am menschlichen Bewegungssegment aufzunehmen. Das Verfahren sollte Daten zur Verfügung stellen, die eine Aussage zur segmentalen Stabilität bzw. Instabilität erlauben. Es sollte gefahrlos intraoperativ am menschlichen Situs anwendbar sein. Nach Konstruktion und theoretischer Tauglichkeitsprüfung wurden segmentale Daten für Flexion, Rotation und Translation an menschlichen Ganzkörperpräparaten nativ (stabil) und nach Laminektomie (instabil) bestimmt. Aus den Messwerten wurden jeweils segmentale Steifigkeiten und segmentale Flexibilitätskoeffizienten errechnet.

Im ersten Teil der Studie konnte gezeigt werden, dass die erreichbare prozentuale Übereinstimmung bei der mehrfachen Beurteilung von seitlichen Funktionsaufnahmen unter klinischen Alltagsbedingungen geringer als erwartet ist. Die hohe Streuung der Messwerte führte bei einer erlaubten Abweichung von +/- 1 mm bzw. +/- 1 ° zu Übereinstimmungen bei Mehrfachuntersuchungen von 38,7 % für angulatorische Verfahren und 49 % für translatorische Verfahren. Die beste Übereinstimmung (54,4 %) erreichte das translatorische Verfahren nach PANJABI. Für die angulatorische Beurteilung waren das Verfahren nach PANJABI (41,1 % Übereinstimmung) und das Verfahren nach DUPIUS (41,7 % Übereinstimmung) am besten geeignet. Insgesamt erreichten alle Verfahren nicht die erwarteten Übereinstimmungen. Ihre zurückhaltende Bewertung im klinischen Alltag ist somit angezeigt.

Im zweiten Teil der Studie wurde ein Verfahren entwickelt, welches über die Nutzung von polyaxialen Pedikelschrauben direkt an das lumbale Bewegungssegment ankoppelt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt können die notwendigen Voraussetzungen der Positionierung des Messgerätes nur unter Benutzung einer polyaxialen kopfverriegelnden Kombinationsschraube (MOSS-MAX, Fa. DePuy) erreicht werden. Diese Art der Kopplung zeigte sowohl in Flexion als auch in Rotation und Translation eine ausreichende Rutschfestigkeit für die zu erwartende Belastung. Mittels

spezieller Montagewerkzeuge wurde eine schnelle und gefahrlose Kopplung des Messgerätes erreicht.

Das im dritten Teil der Studie entwickelte Messgerät realisiert die geforderte Messung von Kraft- und Wegdaten simultan über die Beanspruchung von Neigungssensoren (Flexion und Rotation) und über den Einsatz mehrerer Linearpotentiometer als Hexapod (Translation). Die Analyse der wirkenden Kräfte erfolgte über den Einsatz von triaxialen Kraftsensoren. Die Erprobung des entwickelten Messgerätes erfolgte an nativen menschlichen Ganzkörperpräparaten. Es wurden simultan in Flexion, Rotation links und rechts sowie und in dorsaler Translation des kranialen und kaudalen Wirbels Kraft-Weg-Kurven erstellt. Die Auswertung der Daten zeigte reproduzierbare Messdaten für Kräfte und Wege in allen untersuchten Freiheitsgraden. Die Berechnung von segmentalen Steifigkeiten und Flexibilitätskoeffizienten im stabilen und im instabilen Zustand des Segmentes zeigte die erwartete signifikante Reduktion der Steifigkeit nach Laminektomie bzw. eine signifikante Erhöhung des Flexibilitätskoeffizienten in der instabilen Situation. Auch diese Werte sind ausreichend genau reproduzierbar. Es ist somit gelungen, ein völlig neuartiges Messverfahren zur Beurteilung segmentaler Stabilität zu entwickeln. Das Verfahren erlaubt nicht nur den intraoperativen Einsatz, sondern ist auch erstmals in der Lage, simultan Daten für Belastungen = Loads (Kräfte bzw. Momente) und Wegänderungen = Displacements (Wege bzw. Winkel) in Flexions-, Rotations- und Translationsrichtung zu erheben. Das Verfahren wurde urheberrechtlich geschützt (DE 10 2004 021 446.8).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem entwickelten Kopplungs- und Messverfahren ein Weg gefunden wurde, weitere Daten zum Verständnis der biomechanischen Vorgänge bei degenerativen Prozessen der Lendenwirbelsäule zu erhalten. Perspektivisch sind hier insbesondere zusammen mit klinischen, bildgebenden und histologischen Parametern interessante Daten zu erwarten. Vielleicht ist es mit unserem Verfahren möglich, das Problem der segmentalen Instabilität weiter zu erhellen und nutzbringende Daten zum Wohle der zahlreichen betroffenen Patienten zu erhalten.

<b>6</b>	<b>Referenzen</b>	<b>122</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>135</b>
<b>8</b>	<b>Danksagung</b>	<b>138</b>
<b>9</b>	<b>Patentantrag</b>	<b>141</b>
<b>10</b>	<b>Anlagen</b>	<b>142</b>

## ERKLÄRUNG

4 § Abs: 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, daß

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde bzw.
- welchen Ausgang ein durchgeführtes Habilitationsverfahren hatte,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfaßt, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen wurden, sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlerinnen oder Wissenschaftlern und technischen Hilfskräften und die Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden.
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

16.11.2005

.....  
Datum

Dr. Ralph Kayser

.....  
Unterschrift