

Interaktives 3D-basiertes Training der Planung von Eingriffen an der Wirbelsäule

K. Kellermann¹, J. Mönch¹, B. Preim¹, J. Franke², C. Bochwitz²

¹ Otto-von-Guericke-Universität, Institut für Simulation und Graphik, Magdeburg, Germany

² Otto-von-Guericke-Universität, Orthopädische Universitätsklinik (KORT), Magdeburg, Germany

Kontakt: kerstin@isg.cs.uni-magdeburg.de

Abstract:

Wir präsentieren ein fallbasiertes chirurgisches Trainingssystem zur Vermittlung anatomischer Kenntnisse, kognitiver Strategien der Therapiefindung und Interaktionstechniken für die computergestützte Therapieplanung von Wirbelsäulenerkrankungen. Dem SpineSurgeryTrainer liegen Patientendaten, Bilddaten, Bildanalyseergebnisse und 3D-Modelle sowie kommentierte OP-Videos und Diagnoseinformationen zugrunde. Neurochirurgen oder Orthopäden, die sich auf die Wirbelsäulenchirurgie spezialisieren wollen, können innerhalb eines praxisnahen Workflows Therapieentscheidung und Operationsplanungen trainieren, wobei auf Expertenmeinungen und ihr fallspezifisches Vorgehen zurückgegriffen werden kann. Der Fokus liegt auf der interaktiven 3D-Darstellung der Anatomie und der virtuellen Therapieplanung.

Schlüsselworte: Trainingssystem, Applikationsentwicklung

1 Problem

Anatomische Variationen und die Vielfalt an Indikationen für verschiedene Behandlungsstrategien stellen den Chirurgen bei der Therapieentscheidung und -planung vor eine komplexe Aufgabe. Um für eine Erkrankung die optimale Therapievariante zu ermitteln, sind im Bereich der Wirbelsäulenchirurgie der radiologische Befund, die neurologischen Ausfallerscheinungen, die Beschwerden, evtl. Vorbehandlungen und das soziale Umfeld des Patienten zu berücksichtigen. Für eine komplikationslose Realisierung der Zugangswege zur Wirbelsäule muss die räumliche Beziehung zwischen nervalen und spinalen Strukturen und die Lage der Wirbelsäule zu den umliegenden Muskeln, Gefäßen und weiteren Strukturen bekannt sein. Die Aus- und Weiterbildung in der orthopädischen Wirbelsäulenchirurgie hängt entsprechend stark von den zur Verfügung stehenden Experten und dem vorhandenen Fallspektrum ab. Zur effektiven Schulung muss das Fallspektrum viele Varianten an Behandlungsmethoden und ihrer unterschiedlichen Indikationen umfassen. Kleine Veränderungen, z.B. in Bezug auf die anatomischen Gegebenheiten, können eine ganz andere Therapiemaßnahme indizieren. In der medizinischen Ausbildung werden den Studierenden zunächst die theoretischen Grundlagen gelehrt. Zur Unterstützung dieses Lernprozesses werden multimediale medizinische Lernsysteme entwickelt. Casus [1] beispielsweise stellt für unterschiedliche Lehrstufen Fälle zu ausgewählten medizinischen Fachrichtungen zur Verfügung, an denen die Therapiefindung trainiert werden kann. Während der praktischen Ausbildung trainieren die Studenten ihre Fähigkeiten u.a. an künstlichen, äußerst kostspieligen Modellen von Organen oder Knochen. Für diesen Abschnitt der Ausbildung werden für das Training manueller Fertigkeiten Chirurgesimulatoren entwickelt. Sie bestehen aus deformierbaren Modellen der unterschiedlichen Gewebsarten, Blutungs- und Handhabungssimulation (z.B. Kismet [2] und TempoSurg [3]). Sie basieren in der Mehrheit nicht auf speziellen Falldaten und können daher nicht die Variationen anatomischer Beziehungen vermitteln. Speziell für das Training im orthopädischen Bereich haben Sourina und Sourin [4] ein System für das Training der Knochenbruchbehandlung entwickelt. Die Teltra GmbH [5] entwickelt Lehroperationen für Traumatologie und Chirurgie. Es werden detailgetreue Abläufe verschiedener Operationstechniken vermittelt. Trainingsprogramme, bei denen der Workflow von der Diagnose bis zur Therapieplanung für die Wirbelsäulenchirurgie trainiert werden kann, sind nicht bekannt.

Um Ärzten in der Ausbildung, insbesondere Orthopäden und Neurochirurgen, ein individuelles und fallbasiertes Training der notwendigen Kompetenzen zur Behandlung von Wirbelsäulenerkrankungen zu ermöglichen, wird der SpineSurgeryTrainer entwickelt. Der SpineSurgeryTrainer soll die anatomischen Kenntnisse und erforderlichen Entscheidungskriterien für verschiedene Erkrankungen (z.B. Bandscheibenvorfall oder Stenose des Wirbelkanals) und mögliche Therapiestrategien auf der Grundlage tatsächlicher Falldaten vermitteln. Wesentliches Ziel des Systems ist das Training von Therapieentscheidungen und der interaktiven Planung von minimalinvasiven Eingriffen, offenen chirurgischen Verfahren und Zugangswegen. Das System zielt nicht wie Chirurgesimulatoren auf das Trainieren chirurgischer Eingriffe mit haptischer Rückmeldung, Gewebedeformationen oder Blutungen ab.

2 Methoden

Für die Entwicklung eines erfolgreichen Trainingssystems ist die Integration der zukünftigen Nutzer in die Konzeption entscheidend. Damit eine Kommunikation mit den zukünftigen Anwendern aufgebaut werden kann und sie aktiv im Entwicklungsprozess mitwirken, wurde für die Konzeption des Trainingssystems die informelle Spezifikationsmethode der Szenarien gewählt [6]. Desweiteren orientiert sich das konzeptionelle Design des SpineSurgeryTrainers am Vier-Komponenten-Instruktionsdesign-Modell (Komponenten: 1. Lernaufgabe, 2. Unterstützende Information, 3. Prozedurale Information und 4. Übung von Teilaufgaben) [7], das speziell für das Trainieren komplexer kognitiver Fertigkeiten entwickelt wurde. Initial enthält der derzeitige Prototyp des SpineSurgeryTrainers einige Fälle unterschiedlicher degenerativer Wirbelsäulenerkrankungen der Hals- und Lendenwirbelsäule. Anhand dieser Fälle kann der Prozess der Therapieentscheidung und die jeweilige Planung für eine konventionelle Therapie (z.B. Physiotherapie), einer periduralen Injektion oder einer Zugangsplanung zum Operationsgebiet bei einem minimalinvasiven chirurgischen Eingriff trainiert werden.

Der **Trainingsablauf** des SpineSurgeryTrainers ist in Abbildung 1 dargestellt und basiert auf dem klinischen Workflow. Nach der Auswahl des Trainingsfalls folgt der Prozess der Diagnosestellung. Hierzu werden zuerst die relevanten Patientendaten bereitgestellt. Diese beinhalten neben dem Alter, Geschlecht und Gewicht die Familienanamnese und die Beurteilung des beruflichen Umfelds, die Fallchronik sowie vorangegangene Behandlungen. Daraufhin werden die Ergebnisse der klinischen und physischen Untersuchungen und die medizinischen Bilddaten präsentiert, die wie die Anamnese zu bewerten sind. Anschließend kann der Lernende die MRT-Schichtdaten und ein daraus extrahiertes 3D-Modell interaktiv explorieren, um anschließend eine Therapieentscheidung zu treffen. Die Daten und die zur Exploration zur Verfügung gestellten Interaktionen und Hilfestellungen für die Entscheidungsfindung werden in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

Nach der Therapieentscheidung kann der Lernende die Planung der gewählten Therapie trainieren. Der Schwerpunkt liegt hier auf der interaktiven Planung von Interventionen und chirurgischen Eingriffen anhand der Schichtdaten und des 3D-Modells. Dies wird in einem späteren Abschnitt genauer erläutert. Nach abgeschlossener Therapieplanung wird im Analyseschritt die vorgenommene Planung mit denen verschiedener Experten verglichen. Abschließend kann sich der Anwender über den Ablauf der realen Operation und über die Nachuntersuchungen informieren. Im Anschluss hat er die Option eine andere Variante dieses Falls zu trainieren.

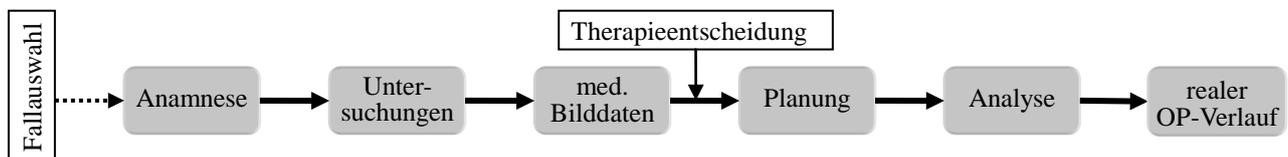


Abb. 1: Skizzierter Trainingsablauf des SpineSurgeryTrainers (orientiert am klinischen Workflow)

Die **Daten** zur Generierung des 3D-Modells aus den Schichtbilddaten (in der Mehrheit MRT) sollten idealerweise mit einer Standardauflösung von mindestens 1 mm und einer Schichtdicke von maximal 3 mm vorliegen. Aus diesen Daten werden die wesentlichen anatomischen Strukturen segmentiert: die Wirbelkörper, die Bandscheiben, die Dura mit Durasack und abzweigenden Nervenwurzeln sowie die umliegenden Strukturen, wie Blutgefäße, Muskeln, Luftröhre und Speiseröhre, und die für die Zugangsplanung relevante Haut.

Zur **Exploration der medizinischen Bilddaten** kann der Nutzer zwischen zwei Ansichten wechseln (siehe Abb. 2). Eine Ansicht zeigt die Schichtdaten, in der die Schichten einzeln durchlaufen und das Grauwertfenster angepasst werden können. Durch Vergrößern und Verschieben der Schichtbilddaten ist die genauere Betrachtung eines Ausschnitts möglich. Zudem sind farbige Overlays der in der zweiten Ansicht dargestellten segmentierten Strukturen ein- und ausblendbar. Damit soll die kognitive Verknüpfung zwischen den 2D-Schichten und der 3D-Anatomie bzw. die räumliche Vorstellung unterstützt werden. Zum selben Zweck besteht in der 3D-Ansicht die Möglichkeit die aktuelle axiale 2D-Schicht in das 3D-Modell zu integrieren (siehe Abb. 2). Beim axialen Verschieben dieser Schicht wird das korrespondierende axiale Schichtbild angezeigt.

Das freie Navigieren im 3D-Raum durch Rotation (mit je einem oder allen drei Freiheitsgraden), Translation und Zoomen ist für Ungeübte schwierig. Um die Lernenden bei der Navigation zu den interessanten Sichten zu unterstützen, werden neben den Standardsichten (koronar, axial und sagittal) auch vordefinierte (z.T. automatisch berechnete) günstige Ansichten auf die Pathologien angeboten. Störende anatomische Strukturen, die der Nutzer sonst manuell über einen Strukturbaum selbst aus- und einblendet, sind hier bereits ausgeblendet. Außerdem sollen demnächst automatisch berechnete Kamerafahrten den Nutzer durch die 3D-Szene führen und die Explorationsaufgabe erleichtern [8]. Die Kamerafahrten können durch den Nutzer beliebig unterbrochen werden, wenn dieser einen interessanten Bereich interaktiv erkunden möchte. Anschließend wird die Animation fortgeführt.

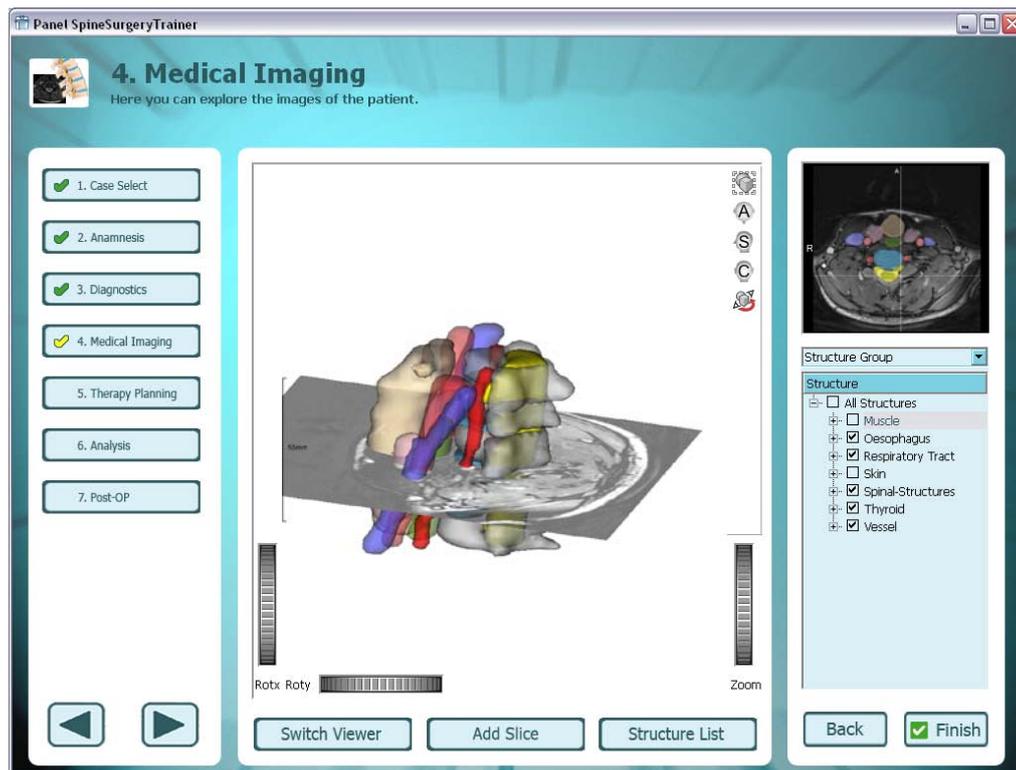


Abb. 1: Benutzerschnittstelle zur Exploration der Schichtbilddaten und des 3D-Modells der Patientenanatomie. Die aktuell sichtbare 2D-Schicht (Ansicht oben rechts) wird hier innerhalb der 3D-Szene des aktuellen Halswirbel Datensatzes dargestellt, während Overlays in der Schichtdarstellung die dargestellten segmentierten Strukturen innerhalb dieser Schicht widerspiegeln. Die einzelnen Strukturen und Strukturgruppen sind über den Strukturbaum rechts ein- und ausblendbar. Links ist der aktuelle Trainingsablauf dargestellt, der ein Springen zu den einzelnen Schritten ermöglicht.

Für die **interaktive virtuelle Therapieplanung** stehen wieder die zweidimensionalen medizinischen Schichtbilder und das 3D-Modell zur Verfügung. Eine einführende Animation zeigt auf Wunsch nur die Wirbelsäule mit der hervorgehobenen Pathologie und überführt die Ansicht von der koronaren Ausgangsposition in die der jeweiligen Operationsicht mit sämtlichen segmentierten Strukturen. Die minimalinvasive Zugangsplanung zum Operationsgebiet oder zum Zielgebiet der Injektion sowie die Planung der Schraubensetzung bei einer Versteifung sind markerbasiert. Dazu muss der Nutzer jeweils einen Marker für den Einstichpunkt und einen für den Zielpunkt der virtuellen Nadel, des tubularen Retraktors oder der Schraube setzen. Das erfolgt auf den Schichtdaten bzw. auf der „Schichtebene“ im 3D-Modell der Patientenanatomie. Während das Arbeiten auf den Schichten der klinischen Alltagssituation entspricht, bietet das 3D-Modell einen besseren räumlichen Bezug; auch zwischen den Markern.

Zur besseren Sicht auf das Zielgebiet können Strukturen über einen Strukturbaum (siehe Abb.2) ausgeblendet bzw. zum Prüfen eines Verletzungsrisikos wieder eingeblendet werden. Zur Kontrolle der eigenen Planung kann das 3D-Modell inklusive der virtuellen chirurgischen Instrumente exploriert werden. Eine optionale Animation visualisiert den geplanten Prozess, wobei bei der minimalen Zugangsplanung durch die Animation der gesamte Ablauf der Zugangsvergrößerung durch Dilatoren bis hin zum Setzen des tubularen Retraktors vermittelt wird. Ebenfalls zur Kontrolle aber auch als anfängliche Hilfestellung, besteht die Option automatisch vorberechnete Insertionszonen [9] farblich auf der Haut hervorzuheben. Das vermittelt zusätzlich ein Gefühl für das in der Wirbelsäulenchirurgie häufig sehr kleine Handlungsfenster. Diese Insertionszonen markieren jeweils Bereiche in denen Risikostrukturen, wie Gefäße, verletzt werden könnten, in denen harte knöcherne Strukturen den Zugang erschweren, der Weg des Instruments zu lang oder der Winkel ungünstig ist.

Nutzerführung und Unterstützung

Während der gesamten Planung wird der Nutzer geführt, indem er zu jedem Schritt Hinweise zum Training (Funktionen und Ausführung) textuell und teilweise auch in Videoform erhält. Zudem kann er sowohl für die Therapieentscheidung als auch für die Therapieplanung Expertenunterstützung anfordern. Dadurch erfährt er von verschiedenen Experten mögliche Therapieansätze und deren jeweilige Indikationen. Diese werden textuell und durch die Anzeige der relevanten Schichten in den 2D-Daten und statischen oder animierten 3D-Darstellungen der Patientenanatomie aufgezeigt. Während des Planungsprozesses der Therapie stehen verschiedene Expertenansätze in Form von Videos des Pla-

nungsprozesses des Experten und dessen explorierbares Planungsergebnis zur Verfügung. Im Analyse-Schritt ist der Vergleich mit der Planung der Experten fest integriert. Dabei werden die Zugangswege der Experten und die des Lernenden visuell sowie textuell parallel angezeigt. Geplant ist es, den Planungsprozess des Experten auch als interaktive Animation ablaufen zu lassen, um Lösungsstrategien und Herangehensweisen auch visuell zu vermitteln.

3 Ergebnisse

Der SpineSurgeryTrainer ist ein fallbasiertes interaktives Trainingssystem, das eine Lernhilfe für den gesamten klinischen Workflow im Bereich der Wirbelsäulenchirurgie darstellt. In Zusammenarbeit mit zwei Orthopäden wurde ein Prototyp entwickelt, der exemplarisch sechs Halswirbelfälle und acht Lendenwirbelfälle mit Induktionen zur periduralen Injektion und operativen Eingriffen beinhaltet. Die Modellierung eines Falls ist in der Akquisition der Materialien über die klinischen Partner und in ihrer Aufbereitung aufwendig. Damit alle Materialien, einschließlich eines OP-Videos vorliegen, muss oft schon während der realen Planung eines Falls entschieden werden, ob dieser für den SpineSurgeryTrainer interessant sein könnte. Die Anonymisierung, Segmentierung, Generierung von Fallvarianten, der Videoschnitt und die Aufnahme der Expertenvorschläge sind zeitaufwendig und setzen ebenfalls die Beteiligung der klinischen Partner voraus.

Mithilfe des aktuellen Prototyps sind angehende Operateure in der Lage ihr anatomisches Wissen in dieser Domäne und ihr mentales Modell der Anatomie auf Basis der Schichtbilddaten zu verbessern. Desweiteren werden die Indikationen einer Therapie vermittelt und die Entscheidungsfindung und Therapieplanung kann an verschiedenen realen Fällen und Fallvarianten trainiert werden. Die Präsentation mehrerer Expertenmeinungen verdeutlicht die vielfältige Vorgehensweise der Experten, die daraus resultiert, dass für die Wirbelsäulenchirurgie zum gegenwärtigen Zeitpunkt wenige eindeutige Standards existieren. Durch die interaktive und dynamische 3D-Darstellung der Patientenanatomie und –pathologie ist es einfacher den optimalen Zugangsweg zu erkennen und Verletzungen umliegender Strukturen zu vermeiden. Die Abbildung der Insertionszonen auf der Haut vermittelt das in der Wirbelsäulenchirurgie oft kleine Handlungsfenster und bietet damit eine Hilfestellung oder dient der Kontrolle der eigenen Planung. Der Schwierigkeitsgrad ist durch die optionale Bereitstellung dieser Hilfestellung und der Expertenmeinung entsprechend variabel. Bei der schwierigen Navigationsaufgabe wird der Nutzer durch automatische Kamerafahrten und aussagekräftige Voransichten unterstützt, so dass er nicht daran scheitert oder das Interesse verliert. Die Integration der Schichtdaten in das 3D-Modell verbindet die Vorteile der Vermittlung räumlicher Lagebeziehung zwischen den anatomischen Strukturen und die exakte Darstellung auch des Inneren der Strukturen. Mit dem Ausblenden einzelner Strukturen werden immer mehr Informationen der Schichtdaten sichtbar.

4 Diskussion

Der SpineSurgeryTrainer befindet sich mitten in der Entwicklungsphase und wird in Zusammenarbeit mit den späteren Nutzern und unter Berücksichtigung zwischenzeitlicher Evaluierungsergebnissen weiterentwickelt. In der weiteren Entwicklungsphase soll geprüft werden, inwieweit weitere Interaktionswerkzeuge, z.B. zur Vermessung von Abständen, die Therapieplanung oder Entscheidungsfindung unterstützen. Ferner soll die Interaktion im 3D-Modell verstärkt werden. So soll das virtuelle Instrument (z.B. Spritze oder Dilatator) demnächst auch direkt in der 3D-Darstellung am Einstichpunkt positioniert und mit Hilfe eines Widgets ausgerichtet werden. Die Einstichtiefe wird dann über eine Verschiebung entlang dieser Ausrichtung bestimmt. Basierend auf der klinischen Routine soll zur Kontrolle ein automatisch generiertes Röntgenbild der aktuellen Szene abgerufen werden können. Das Röntgenbild für die sagittale oder axiale Lage könnte durch das Aufsummieren der Voxelwerte einer Volumenpräsentation der Schichtdaten aus der jeweiligen Sicht entstehen. Die Schwierigkeit besteht hier in der Integration des aktuellen Zustandes des chirurgischen Instruments in den Volumendatensatz bzw. in das Röntgenbild. Eine Erweiterung der virtuellen Instrumentenbasis, insbesondere durch neu erschiene Instrumente, deren Handhabungen in den Lehrbüchern noch nicht beschrieben sind, ist vorgesehen. Bei der minimalinvasiven Zugangsplanung soll durch „CutAways“ der Blick durch den tubolaren Retraktor ermöglicht und die Möglichkeiten der virtuellen Entfernung knöcherner Strukturen erforscht werden. Weiterhin muss die offene Zugangsplanung, die die Schwierigkeiten der Gewebedeformation mit sich bringt, weiterentwickelt werden. Bisher sind lediglich das Einzeichnen einer Resektionsebene in den Schichtbildern und eine entsprechende Verschiebung der Strukturen konzipiert. In Zukunft sollen weitere Operationsmöglichkeiten (z.B.: Einsetzen künstlicher Bandscheiben oder Versteifung durch Implantate), neue Fälle (vor allem die Lendenwirbelsäule betreffend) sowie weitere Expertenvorschläge ergänzt werden. So entsteht eine repräsentative Menge an verschiedenen Planungsprozessen und die Lernenden erhalten einen Überblick über mögliche Krankheitsbilder und Therapien. Außerdem ist eine fortlaufende Evaluierung bzgl. der Usability und des Lernerfolges erforderlich.

5 Referenzen

- [1] Adler et al.: "CASUS - new implementations and challenges" In Slice of Life Conference, 2006
- [2] Kühnapfel et al.: "Endoscopic Surgery Training using Virtual Reality and deformable Tissue Simulation", In Computers & Graphics 24, 2000
- [3] Zirkle et al.: "Using a Virtual Reality Temporal Bone Simulator to Assess Otolaryngology Trainees", In Laryngoscope, 2007
- [4] Sourina, Sourin: "Virtual Orthopedic Surgery Training on personal computer", In International Journal of Information Technology, 2000
- [5] Seiffert et al.: „Strategieentwicklung für ein telemedizinisches Dienstleistungsunternehmen am Beispiel der TELTRA GmbH“, In Biomedizinische Technik, 2000
- [6] Cordes et al: „Szenariobasierte Entwicklung eines chirurgischen Trainingssystems“, In CBT, 2007.
- [7] van Merriënboer, J.J.G., Clark, R.E. & de Croock, M.B.M., "Blueprints for Complex Learning: The 4C/ID-Model". In Educational Technology Research & Development, number 50(2), pages 39–64, 2002.
- [8] Mühler, Preim, „Günstige Kamerapfade für medizinische Animationen“, In BVM, Springer, 2010
- [9] Engel et al.: „Schnelle Zugangsplanung für die perkutane Punktion der Leber“ In BVM, Springer, 2010