

Judith Bredemann

Bewertung der patienteninduzierten Unsicherheit medizinischer Computertomografie- messungen zur Abschätzung des Verletzungsrisikos



Bewertung der patienteninduzierten Unsicherheit
medizinischer Computertomografiemessungen zur
Abschätzung des Verletzungsrisikos

Evaluation of the Patient-Induced Uncertainty of
Medical Computed Tomography Measurements to
Estimate the Risk of Injury

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Judith Bredemann
(geb. Bevermann)

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt
Univ.-Prof. Dr. med. Dr. h. c. Jörg Schipper

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Dezember 2020

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Judith Bredemann

Bewertung der patienteninduzierten Unsicherheit
medizinischer Computertomografiemessungen
zur Abschätzung des Verletzungsrisikos

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 8/2021



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Judith Bredemann:

Bewertung der patienteninduzierten Unsicherheit medizinischer Computertomografie-messungen zur Abschätzung des Verletzungsrisikos

1. Auflage, 2021

Apprimus Verlag, Aachen, 2021

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-962-1

Foto S. 14: © Adobe Stock

Foto S. 25: © The Phantom Laboratory

Foto S. 26: © CIRS Tissue Simulation Phantom Technology

Alle anderen Abbildungen sind eigene Darstellung der Autorin.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Univ.- Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt für die Betreuung dieser Arbeit und seine Tätigkeit als Berichter in meinem Promotionsverfahren. Darüber hinaus bedanke ich mich für die vielen herausfordernden Aufgaben, die ich am Lehrstuhl bewältigen durfte und für das mir und meiner Arbeit entgegen gebrachte Vertrauen.

Die thematischen Inhalte meiner Arbeit sind Teil der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschergruppe 1589: Multi-Port-Knochenchirurgie am Beispiel der Otobasis (MUKNO). Ich bedanke mich bei allen involvierten Wissenschaftlern für die inhaltlichen Diskussionen und ihre Unterstützung. Mein Dank gilt insbesondere Univ.-Prof. Dr. med. Dr. h.c. Jörg Schipper, Priv.-Doz. Dr. med. Julia Kristin und Dr. med. Igor Stenin.

Ein weiterer großer Dank gebührt meinen studentischen Mitarbeitern und Abschlussarbeitern. Besonders hervorheben möchte ich Mayra Kerkhoff und Leon Huber, die besonders zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Kollegen der Abteilung Modellbasierte Systeme möchte ich für ihre Freundschaft und die damit verbundene wunderbare Zeit am Lehrstuhl danken. Besonders hervorheben möchte ich Dr.-Ing. Christoph Voigtmann, Dr.-Ing. Michael Wiederhold, Dr.-Ing. Tobias Fürtjes, Christoph Storm, Dr.-Ing. Felix Bertelsmeier, Dr.-Ing. Guido Hüttemann und Dr.-Ing. Sarah Ekanayake. Ich hoffe, dass wir uns nie ganz aus den Augen verlieren.

Ein besonders großer Dank gebührt meinen Eltern, die das Fundament für meinen Lebens- und Bildungsweg gelegt haben. Ihnen und meiner Schwester Laura danke ich für ihre bedingungslose Unterstützung. Der Rückhalt meiner Familie war und ist eine wichtige Stütze in meinem Leben.

Mein größter Dank gebührt meinem Mann Felix für seine Liebe, seine Geduld und seinen unerschütterlichen Glauben an mich und meine Fähigkeiten. Er und unsere Tochter Frieda haben mir den Rückhalt gegeben diese Arbeit fertigzustellen.

Bad Laer, im Dezember 2020

Zusammenfassung

Innovative, personalisierte Operationsverfahren können nur dann implementiert werden, wenn das einhergehende Verletzungsrisiko vertretbar ist. Zudem benötigen Chirurgen die Angabe des Risikos als valide Grundlage zur Auswahl eines geeigneten Operationsverfahrens. Die Messunsicherheit (MU) der medizinischen Bildgebung beeinflusst das Risiko unbeabsichtigter Verletzungen bei bildbasierten navigierten Eingriffen entscheidend. Da die individuellen anatomischen und radiometrischen Eigenschaften des Patienten einen signifikanten Einfluss auf die Bildqualität und damit die MU haben, muss der patienteninduzierte MU-Beitrag der Bildgebung zur Berechnung des Verletzungsrisikos individuell angegeben werden. Derzeit bestehen jedoch keine Methoden oder Verfahren zur Bewertung der patienteninduzierten MU medizinischer CT-Messungen.

Die vorliegende Arbeit adressiert dieses Defizit, indem eine Methode für die Bewertung der patienteninduzierten MU medizinischer CT-Messungen am Beispiel der minimalinvasiven Chirurgie der lateralen Schädelbasis entwickelt und validiert wird. Durch die Angabe der patienteninduzierten MU kann das Verletzungsrisiko für den einzelnen Patienten präziser abgeschätzt sowie die proxioperative Operationsplanung weiter personalisiert werden. Dies ist von besonderer Bedeutung, da der individuelle patienteninduzierte Einfluss die Durchführbarkeit bildbasierter navigierter Operationen maßgeblich limitieren kann.

Die Basis der Methodenentwicklung bildet die Modellierung des patienteninduzierten Einflusses auf die MU medizinischer CT-Messungen. Als relevante Eingangsgrößen werden die patientenindividuellen anatomischen und radiometrischen Eigenschaften der Makro- und Mikrostrukturen im durchstrahlten Querschnitt identifiziert. Da bestehende Methoden zur Bewertung der Bildqualität und der MU auf experimentellen Studien an Prüfkörpern basieren, sind zudem die anatomische und radiometrische Ähnlichkeit zum Prüfkörper entscheidend. Durch die Klassifizierung verschiedener Patienten mit Hinblick auf die genannten Modelleingangsgrößen wird die präklinische Abschätzung der repräsentativen MU für die einzelnen Patientenklassen ermöglicht. Die MU-Bestimmung des Messprozesses erfolgt an geeigneten Prüfkörpern. Für die Abschätzung der Unsicherheit zur Referenz (Prüfkörper) wird ein auf Leichenpräparaten basierendes, experimentelles Verfahren beschrieben. Zur proxioperativen Zuordnung eines Patienten zu einer der definierten Klassen, wird ein geeigneter Ähnlichkeitskennwert definiert. Die präklinisch für die Patientenklasse bestimmten MU-Beiträge werden dann zur Berechnung des Verletzungsrisikos herangezogen. Durch die Anwendung und Detaillierung der beschriebenen Methode am Beispiel der minimalinvasiven Chirurgie der lateralen Schädelbasis wird ihre Anwendbarkeit demonstriert. Basierend auf einer experimentellen Studie an einem Kopfpräparat können die definierten Patientenklassen sowie der Ähnlichkeitskennwert bestätigt werden. Auf Basis der Rückführung der Ergebnisse in das Operationsszenario wird die Bedeutung der patienteninduzierten MU für die MU-Bestimmung medizinischer CT-Messungen unterstrichen.

Summary

Innovative, personalized surgical procedures can only be implemented if the associated risk of injury is acceptable. In addition, the surgeon needs the indication of the risk as a basis for the selection of a suitable surgical procedure. The measurement uncertainty (MU) of medical imaging influences the risk of unintentional injuries in image-based navigated procedures. Since the individual anatomical and radiometric characteristics of the patient have a significant influence on the image quality and thus the MU, the patient induced MU contribution of imaging must be specified for each individual patient to calculate the risk of injury. However, there are currently no methods or procedures for the evaluation of the patient-induced MU of medical CT measurements.

The thesis at hand addresses this deficit by developing and validating a method for the evaluation of the patient induced uncertainty for medical CT measurements using minimally invasive surgery of the lateral skull base as an example. The patient-individual indication of the MU allows a more precise estimation of the risk of injury for the individual patient as well as further personalization of the preoperative surgery planning. This is of particular importance, since the patient-induced influence can significantly limit the feasibility of image-based navigated surgery.

The basis of the method development is the modeling of the patient-induced influence on the MU of medical CT measurements. The patient-specific anatomical and radiometric properties of the macro- and microstructures in the radiographed cross-section are identified as relevant input parameters. Since existing methods for the evaluation of image quality and of MU are based on experimental studies on specimens, the anatomic and radiometric similarity to the specimen is also decisive. By classifying different patients with regard to the model input parameters mentioned above, the preclinical estimation of the representative MU for the individual patient classes becomes possible. The MU determination of the measurement process is performed on suitable test specimens. An experimental procedure based on cadaveric specimens is described for the estimation of the uncertainty of the reference (test specimen). For the preoperative assignment of a patient to one of the defined classes, a suitable similarity index is defined. The MU-contributions determined preoperatively for the chosen patient class are then used to calculate the risk of injury. The application and detailing of the described method using the example of minimally invasive surgery of the lateral skull base demonstrates its applicability. Based on an experimental study on a cadaveric head specimen, the defined patient classes and the defined similarity index can be confirmed. By feedbacking the results into the surgical scenario, the importance of the patient-induced influence on the MU of medical CT measurements is underlined.

I. Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----------------------|
| I. Inhaltsverzeichnis | i |
| II. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis | iii |
| III. Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis | vii |
| 1 Herausforderungen der bildbasierten navigierten Chirurgie | 1 |
| 1.1 Problembeschreibung und -relevanz..... | 1 |
| 1.2 Zielsetzung..... | 4 |
| 1.3 Forschungsmethodik und Struktur | 5 |
| 2 Verletzungsrisiko bei bildbasierten navigierten Eingriffen | 7 |
| 2.1 Minimalinvasive Chirurgie der lateralen Schädelbasis | 8 |
| 2.2 Abschätzung des Verletzungsrisikos..... | 9 |
| 3 Medizinische Computertomografie als dimensionelles Messverfahren | 13 |
| 3.1 Physikalische Grundlagen..... | 15 |
| 3.2 CT-basierte navigierte Eingriffe..... | 18 |
| 3.3 Unsicherheitsbestimmung | 20 |
| 3.3.1 Experimentelle Unsicherheitsbestimmung industrieller | CT-Messungen..... 21 |
| 3.3.2 Prüfkörperbasierte Unsicherheitsbestimmung medizinischer | CT-Messungen..... 24 |
| 3.4 Identifizierter Forschungsbedarf und weiteres Vorgehen | 29 |
| 4 Einfluss des Patienten auf die Unsicherheit medizinischer CT-Messungen | 33 |
| 4.1 Analyse der Ähnlichkeit zwischen Patient und Prüfkörper | 34 |
| 4.1.1 Anatomische Ähnlichkeit | 34 |
| 4.1.2 Radiometrische Ähnlichkeit | 42 |
| 4.1.3 Ähnlichkeit der Bildqualität | 52 |
| 4.2 Identifizierung relevanter Einflussfaktoren..... | 55 |
| 4.3 Modellierung des patienteninduzierten Einflusses | 59 |
| 4.4 Zwischenfazit | 60 |
| 5 Methode zur Bewertung des patienteninduzierten Einflusses | 61 |
| 5.1 Ermittlung der Anforderungen | 61 |
| 5.2 Entwicklung der Methode | 64 |
| 5.3 Repräsentative Messunsicherheitsbestimmung | 67 |
| 5.4 Integration in die virtuelle OP-Planung | 70 |
| 5.5 Zwischenfazit | 72 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6 | Bewertung der patienteninduzierten Unsicherheit medizinischer CT-Messungen | 75 |
| 6.1 | Definition von Patientenklassen anhand von Ähnlichkeitsparametern | 76 |
| 6.2 | Quantifizierung der Unsicherheitsbeiträge | 78 |
| 6.3 | Spezifizierung der Patientenklassen anhand von Ähnlichkeitsparametern | 87 |
| 6.4 | Definition eines Ähnlichkeitskennwertes | 88 |
| 6.5 | Bewertung der Anwendbarkeit der entwickelten Methode | 90 |
| 6.6 | Zwischenfazit | 93 |
| 7 | Validierung der entwickelten Methode | 95 |
| 7.1 | Experimentelle Validierung der Patientenklassen | 95 |
| 7.1.1 | Ähnlichkeitskennwert und Klassengrenzen | 95 |
| 7.1.2 | Aufweitung der repräsentativen Unsicherheitsbestimmung | 98 |
| 7.2 | Prüfung der Validität der Unsicherheitsbestimmung | 99 |
| 8 | Diskussion der Ergebnisse | 103 |
| 8.1 | Kritische Reflektion der Ergebnisse | 103 |
| 8.2 | Übertragbarkeit der Ergebnisse | 106 |
| 8.3 | Rückführung der Ergebnisse in das Operationsszenario | 106 |
| 8.4 | Fazit | 108 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 109 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 111 |
| 11 | Anhang | 123 |
| 11.1 | Danksagung DFG | 123 |
| 11.2 | Studentische Arbeiten | 123 |
| 11.3 | Ergebnisse der Messunsicherheitsbestimmung | 124 |

II. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1.1: Vorgehensweise zur angewandten Forschung nach ULRICH mit Zuordnung zu den Kapiteln und Inhalten der vorliegenden Arbeit | 6 |
| Abbildung 2.1: Konzept der minimalinvasiven Chirurgie der lateralen Schädelbasis (Multi-Port-Ansatz). Drei geplante Bohrkänäle, die in einem Zielpunkt zusammentreffen sowie umliegende Risikostrukturen. [modifiziert nach NAUH14c] | 9 |
| Abbildung 3.1: Frontend eines aktuellen medizinischen Spiral-CTs [Bildquelle: Siemens Healthcare]..... | 14 |
| Abbildung 3.2: Röntgenbrems- und Linienspektrum (schematisch) [eigene Darstellung]..... | 16 |
| Abbildung 3.3: Planungsszenario für minimalinvasive Eingriffe an der lateralen Schädelbasis mit drei geplanten Kanälen mit gemeinsamen Zielgebiet „innerer Gehörgang“. Die Bogengänge sind in Türkis und der Gesichtsnerv in Gelb dargestellt. [modifiziert nach [POLL14]] | 19 |
| Abbildung 3.4: Geometrischer Prüfkörper für die Bewertung der Qualität von CT-Bildern und CT-Geräten. Links: CATPHAN® Phantom [Bildquelle: The Phantom Laboratory] | 25 |
| Abbildung 3.5: Anthropomorphes Phantom zur Bewertung der Qualität von CT-Bildern und CT-Geräten [Bildquelle: CIRS Tissue Simulation Phantom Technology] | 26 |
| Abbildung 3.6: Zylinderförmiger Prüfkörper mit integrierten anatomischen Strukturen für die MU-Bestimmung medizinischer CT-Messungen [eigene Darstellung]..... | 28 |
| Abbildung 3.7: Heuristischer Bezugsrahmen zur Beschreibung des Anwendungszusammenhangs der vorliegenden Arbeit | 31 |
| Abbildung 4.1: Vorgehensweise zur Durchführung von Eignungsnachweisen für komplexe Prüfprozesse nach VDI/VDE 2600 Blatt 2 | 33 |
| Abbildung 4.2: Knöcherner Weite und Lumen am Beispiel des seitlichen Bogengangs [eigene Darstellung] | 36 |
| Abbildung 4.3: ROI zur Bestimmung der mittleren CT-Werte der Patienten | 46 |
| Abbildung 4.4: ROI zur Bestimmung der mittleren CT-Werte des Prüfkörpers | 46 |
| Abbildung 4.5: Linie, entlang derer das Intensitätsprofil für das humane Vorbild (links) und den Prüfkörper (rechts) ausgegeben wird. | 49 |
| Abbildung 4.6: Intensitätsprofil für das humane Vorbild..... | 50 |
| Abbildung 4.7: Intensitätsprofil für den Prüfkörper | 51 |
| Abbildung 4.8: Vergleich der relativen Häufigkeiten der Grauwerte der | |

| | |
|---|-----|
| Intensitätsprofile für das humane Vorbild..... | 51 |
| Abbildung 4.9: CT-Bilder der drei Patienten, in denen die Linienprofile erstellt wurden | 52 |
| Abbildung 4.10: Ishikawa-Diagramm zur Kategorisierung und Visualisierung der Einflussfaktoren auf die Unsicherheit medizinischer CT-Messungen im Bereich der lateralen Schädelbasis. Kategorien, die für die Untersuchung des Patienteneinflusses relevant sind, wurden hervorgehoben. | 55 |
| Abbildung 4.11: Relevante Einflussfaktoren der Kategorie „Patient“ | 56 |
| Abbildung 4.12: Relevante Einflussfaktoren der Kategorie „Ähnlichkeit Prüfkörper“ | 58 |
| Abbildung 5.1: Operationsprozess für minimalinvasive Eingriffe im Bereich der lateralen Schädelbasis nach NAU-HERMES [NAUH14C, S. 18] | 62 |
| Abbildung 5.2: Methode zur Bewertung des patienteninduzierten Einflusses | 65 |
| Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der für zwei verschiedene Patientenklassen definierten Parameterräume | 67 |
| Abbildung 5.4: Angepasster chirurgischer Prozess zur Berücksichtigung des Patienteneinflusses bei der Abschätzung des mechanischen Verletzungsrisikos | 72 |
| Abbildung 6.1: Für die MU-Bestimmung definierte Messaufgaben im Bereich der Bogengänge | 75 |
| Abbildung 6.2: Analysemarker zur Auswertung der Punktabweichungen der seitlichen Oberfläche des hinteren Bogengangs | 80 |
| Abbildung 6.3: Links: Aus einem Kopfpräparat gesägtes Felsenbein nach ca. 7 Monaten Mazeration. Rechts: Prüfkörper und zugehörige Einsätze | 81 |
| Abbildung 6.4: Fehlerbalkendiagramm zum Vergleich der Mittelwerte zwischen Kopfpräparat und Prüfkörper..... | 83 |
| Abbildung 7.1: Fehlerbalkendiagramm zur Analyse der Differenz der Mittelwerte zwischen Kopfpräparat und Prüfkörper..... | 96 |
| Abbildung 7.2: Darstellung der Anpassungslinien für SNR-Werte und Standardunsicherheit des Messprozesses der Kopfpräparate (n=3) und Prüfkörper (n=3)..... | 97 |
| Abbildung 7.3: Haupteffekttdiagramm für den Faktor "Patient"..... | 98 |
| Abbildung 7.4: Fehlerbalkendiagramme (Vertrauensniveau von 95 %) für die an Kopfpräparaten und Prüfkörpern bestimmten Standardunsicherheiten des Messprozesses | 101 |
| Tabelle 3.1: Ähnlichkeitsforderungen nach DIN EN ISO 15530-3 [DIN 12, S. 8]..... | 22 |
| Tabelle 4.1: Kriterien zur Bewertung der anatomischen Ähnlichkeit..... | 37 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 4.2: Kopflänge und -breite in Abhängigkeit von Altersgruppe und Geschlecht für die deutsche Bevölkerung nach DIN 33402-2 [DIN 05b, S. 71–73]..... | 38 |
| Tabelle 4.3: Kopflänge und -breite für den Europamenschen [modifiziert nach JÜRIG98, S. 9] im Vergleich zum Prüfkörper..... | 39 |
| Tabelle 4.4: Charakteristische Größen zur Bewertung der Kopfform für Patienten und Prüfkörper | 39 |
| Tabelle 4.5: Übersicht über die Ergebnisse der Bestimmung der Dimensionen der Bogengänge nach [PURC03] und [PAKD11] | 40 |
| Tabelle 4.6: Varianzkoeffizienten für das Lumen der Bogengänge | 41 |
| Tabelle 4.7: Vergleich radiometrischer Kennwerte von Äquivalenzwerkstoffen und Geweben [ICRU88]..... | 43 |
| Tabelle 4.8: Dichte des oberen Schädels für Sportler und nicht Sportler nach KARLSSON et al. [KARL96]..... | 44 |
| Tabelle 4.9: Ergebnisse für die Bestimmung der mittleren CT-Werte und Standardabweichungen für unterschiedliche Gewebe | 48 |
| Tabelle 4.10: Ergebnisse der Kennwertbestimmung zur Beurteilung der Bildqualität | 54 |
| Tabelle 4.11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Ähnlichkeitsanalyse für unterschiedliche Patienten | 56 |
| Tabelle 4.12: Zusammenfassung der Ergebnisse der Ähnlichkeitsanalyse für den Prüfkörper | 57 |
| Tabelle 4.13: Auflistung der Eingangsgrößen des Modells und den zugehörigen Einflussfaktoren für den untersuchten semi-anthropometrischen Prüfkörper.... | 60 |
| Tabelle 5.1: Anforderungen an die Methode zur Bewertung des patienteninduzierten Einflusses | 64 |
| Tabelle 6.1: Übersicht über relevante Parameter und deren Parameterbereich zur Aufspannung des Parameterraumes | 77 |
| Tabelle 6.2: Auf Basis der Kopflänge definierte Patientenklassen..... | 78 |
| Tabelle 6.3: Scanprotokoll und Rekonstruktionsparameter | 79 |
| Tabelle 6.4: Ergebnisse der Unsicherheitsbestimmung an den Kopfpräparaten | 81 |
| Tabelle 6.5: Ergebnisse der Unsicherheitsbestimmung an den Prüfkörpern | 82 |
| Tabelle 6.6: Ergebnisse für die statistische Analyse der an den verschiedenen Messobjekten durchgeführten Unsicherheitsbestimmungen | 84 |
| Tabelle 6.7: Ergebnisse des statistischen Vergleichs der ermittelten CT-Werte für Mensch (Felsenbeine, n=6) und Kopfpräparat (Felsenbeine, n=4)..... | 85 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 6.8: Ergebnisse des statistischen Vergleichs für die Bestimmung der Kennwerte zur Beurteilung des Einflusses der Fixierung auf die Bildqualität.... | 86 |
| Tabelle 6.9: Für Kopfpräparat 1 und 2 bestimmte Parameter..... | 88 |
| Tabelle 6.10: Zuordnung der ermittelten repräsentativen Standardunsicherheiten zu den definierten Patientenklassen | 88 |
| Tabelle 6.11: Ableitung des Grenzwertes für den definierten Ähnlichkeitskennwert | 90 |
| Tabelle 6.12: Prüfung der Anforderungen an die Methode zur individuellen Bewertung des Patienteneinflusses auf die Unsicherheitsbestimmung | 90 |
| Tabelle 7.1: Ergebnisse für Kopfpräparat 3 im Vergleich zu den Patientenklassen..... | 96 |
| Tabelle 7.2: Ergebnisse der Parameterbestimmung für Kopfpräparat 3 im Vergleich zu den definierten Grenzparametern von Patientenklasse 2..... | 97 |
| Tabelle 7.3: Zusammenfassung der Gruppierungsergebnisse sowie der kombinierten Standardunsicherheiten für Patientenklasse 2 | 99 |
| Tabelle 8.1: Mechanisches Verletzungsrisiko für minimalinvasive Eingriffe an der lateralen Schädelbasis für verschiedene Abstände zur Risikostruktur..... | 107 |
| Tabelle 8.2: Zulässiger Sicherheitsabstand für minimalinvasive Eingriffe an der lateralen Schädelbasis in Abhängigkeit der zulässigen Verletzungswahrscheinlichkeit | 107 |

III. Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---------------------|--|
| $\ddot{A}W$ | | Äquivalenzwerkstoff |
| b | [mm] | Systematische Messabweichung |
| b_d | [mm] | Systematische Abweichung des chirurgischen Prozesses |
| b_{drill} | [mm] | Systematische Abweichung des Bohrprozesses |
| b_{img} | [mm] | Systematische Abweichung der Bildgebung |
| b_{nav} | [mm] | Systematische Abweichung der Instrumentennavigation |
| b_ϑ | [K] | Systematische Abweichung der Temperaturbestimmung |
| CNR | | Kontrast-Rausch-Verhältnis |
| c_{pk} | | Tatsächliche Prozessfähigkeit |
| CT | | Computertomographie |
| CT_{WBG} | [HU] | CT-Zahl Weichteilgewebe Bogengänge |
| d | [mm] | Durchstrahllänge |
| d_{min} | [mm] | Senkrechter Abstand zwischen geplantem Bohrkanaal und nächstgelegener Risikostruktur |
| $D_{HB,i}$ | [mm] | Innendurchmesser hinterer Bogengang |
| DIN | | Deutsches Institut für Normung |
| D_{LK} | [mm] | Kombinierte Durchstrahllänge |
| $D_{OB,i}$ | [mm] | Innendurchmesser oberer Bogengang |
| $D_{OB,a}$ | [mm] | Durchmesser Außenseite hinterer Bogengang |
| e_{drill} | | Fehler des Bohrprozesses |
| e_{img} | | Fehler der Bildgebung |
| e_{nav} | | Fehler der Navigation |
| EN | | Europäische Norm |
| F_Φ | | Verteilungsfunktion der Temperatur |
| HU | | Hounsfield-Unit |
| I | [W/m ²] | Geschwächte Strahlintensität des Röntgenstrahls |
| I_0 | [W/m ²] | Primäre Strahlintensität des Röntgenstrahls |
| ISO | | Internationale Organisation für Standardisierung |
| k | | Erweiterungsfaktor |