

Aus dem Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie  
des Zentrums für Radiologie und der Augenklinik  
der Universität Rostock

Direktoren:

Prof. Dr. med. K. Hauenstein (Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie)

und

Prof. Dr. med. R. Guthoff (ehemaliger Direktor der Universitätsaugenklinik)



**Stellenwert der bildgebenden Diagnostik bei intraorbitalen Fremdkörpern unter  
besonderer Berücksichtigung von Holz als Fremdkörpermaterial**

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Medizin  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität Rostock  
2015

vorgelegt von:  
Andreas Koltzau  
aus Rostock

Rostock, den 21.01. 2015

Dekan: Prof. Dr. med. Emil Christian Reisinger

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Karlheinz Hauenstein

Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, Universität Rostock

2. Gutachter: Prof. Dr. med. Rudolf Guthoff

ehemaliger Direktor der Universitätsaugenklinik, Rostock

3. Gutachter: Prof. Dr. med. Karl Heinz Emmerich,

Augenklinik Darmstadt

Datum der Einreichung: 21.01.2015

Datum der Verteidigung: 12.01.2016

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel:

Stellenwert der bildgebenden Diagnostik bei intraorbitalen Fremdkörpern unter besonderer  
Berücksichtigung von Holz als Fremdkörpermaterial

aus dem Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie des Zentrums für  
Radiologie und der Augenklinik der Universität Rostock unter der Anleitung von  
Herrn Dr. V. Hingst

- 1.) selbstständig angefertigt,
- 2.) keine unerlaubte fremde Hilfe in Anspruch genommen,
3. ) nur unter der Benutzung der im Literaturverzeichnis angegebenen Arbeiten  
angefertigt und sonst kein anderes gedrucktes oder ungedrucktes Material  
verwendet habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in  
ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades  
eingereicht wurde.

meiner Mutter und meinem Vater  
aus Dankbarkeit gewidmet

# **1. Inhaltsverzeichnis**

1. Inhaltsverzeichnis	
2. Abkürzungsverzeichnis	
3. Einleitung .....	1
3.1 Einführung.....	1
3.2 Fragestellung der Arbeit.....	6
4. Eigene Untersuchungen.....	8
4.1. Retrospektive Untersuchungen .....	8
4.1.2 Voraussetzungen für die Aufnahme in die Studie.....	8
4.1.3 Datenerfassung .....	9
4.1.4 Analyse.....	14
4.2 Experimentelle Studien .....	16
4.2.1 Holzfremdkörper .....	16
4.2.2 Untersuchungsmodell.....	17
4.2.3 CT und MRT: Geräte und Einstellungen .....	18
4.2.4 Bildanalyse .....	20
4.2.5 Auswertung .....	21
5. Ergebnisse der retrospektiven Untersuchungen .....	22
5.1 Patientenkollektiv.....	22
5.2 Verletzungsentstehung und Fremdkörpermaterial .....	22
5.3 Einsatz bildgebender Verfahren .....	24
5.4 Mehrfachuntersuchungen .....	24
5.5 Einsatz der bildgebenden Verfahren bei klinisch nachgewiesenen Fremdkörpern .....	26
5.6 Bildgebung in Abhängigkeit von der Tension bei Aufnahme.....	28
5.7 Einsatz bildgebender Verfahren bei Begleitverletzungen .....	30
5.8 bildgebende Diagnostik in Abhängigkeit von der Fremdkörperlokalisation .....	33
5.8.1 Fremdkörper im vorderen Augenabschnitt .....	34
5.8.2 Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt.....	34
5.8.3 extrabulbäre Fremdkörper .....	35
5.9 Extraktionsweg und Operationstechnik .....	36
5.10 Sensitivität und Spezifität der einzelnen Verfahren .....	39
5.10.1 Sonografie .....	39
5.10.2 Orbita Röntgen in einer Ebene .....	40

5.10.3 Orbita Röntgen in zwei Ebenen .....	41
5.10.4 Comberg-Aufnahme .....	42
5.10.5 Computertomografie .....	43
6. Ergebnisse der experimentellen Studie .....	46
6.1 Nachweis der Fremdkörper in Abhängigkeit von der Holzart .....	46
6.2 Nachweisrate der Fremdkörper in Abhängigkeit vom Umgebungsmedium.....	48
6.3 Nachweis der Fremdkörper in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt.....	49
6.4 Nachweisrate der Fremdkörper in Abhängigkeit von der Größe .....	50
6.5 Sensitivität der einzelnen Verfahren .....	51
6.6 Falsch positive Ergebnisse .....	53
6.7. Bewertungssicherheit .....	54
7. Diskussion .....	56
7.1. Methodendiskussion retrospektive Studie.....	56
7.2. Ergebnisdiskussion retrospektive Studie.....	58
7.3. Methodendiskussion experimentelle Studie.....	76
7.4. Ergebnisdiskussion experimentelle Studie.....	78
8. Zusammenfassung .....	86
9. Thesen .....	89
10. Literaturverzeichnis.....	91
11. Anhang .....	97
11.1 Danksagung .....	97
11.2 Lebenslauf .....	98

## **2. Abkürzungsverzeichnis**

BETTs	Birmingham Eye Trauma Terminology system
BOSU	British Ophthalmological Surveillance Unit
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CT	Computertomografie
d. h.	das heißt
Fk	Fremdkörper
FOV	Field of View
g	Gramm
KI	Konfidenzintervall
kV	Kilovolt
mA	Milliampere
mAs	Milliamperesekunde
mGycm <sup>2</sup>	Milli-Gray-Quadratzentimeter (Dosisflächenprodukt)
min	Minuten
mm	Millimeter
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
mm <sup>3</sup>	Kubikmillimeter
MRT	Magnetresonanztomografie
ms	Millisekunden
T	Tesla
TE	Echozeit
TR	Repetitionszeit
V. a.	Verdacht auf
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

### **3. Einleitung**

#### **3.1 Einführung**

Fremdkörperverletzungen der Orbita sind auch heute noch schwerwiegende traumatische Ereignisse, die mit einer monokulären Erblindung oder Visuseinschränkung einhergehen können. Eine Analyse von Augenverletzungen am Arbeitsplatz ergab eine Lebenszeit-Prävalenz von Augenverletzungen während der Arbeit von 4,4 % [19]. Die Inzidenz von sämtlichen offenen Bulbusverletzungen beträgt 2,32 pro 100.000 Einwohnern [20], so dass traumatische Ereignisse mit einer Perforation, Penetration oder einer Fremdkörperverletzung auch heute noch von relevanter Bedeutung sind. Dabei machen intraorbitale Fremdkörper nur einen kleinen Teil der Verletzungen aus. Bei einem von sechs Patienten mit einer Verletzung der Orbita ist ein Fremdkörper zu finden [5], für intraokulare Fremdkörper beträgt die Inzidenz sogar nur 0,16 pro 100.000 Einwohner [31]. Doch gerade durch diese geringe Inzidenz und die vielfältigen Arten von Komplikationen stellen intraorbitale Fremdkörper eine besondere Herausforderung in der ophthalmologischen Diagnostik und Therapie dar.

Von Relevanz ist bei solchen traumatischen Ereignissen vor allem die Gewebeverletzung der empfindlichen anatomischen Strukturen des Auges. Durch Verletzungen der Linse oder der Netzhaut ist eine erhebliche Einschränkung des Visus möglich. Aber auch schon kleinere Läsionen der Hornhaut können durch entstehende Narben zur Visusminderung beitragen. Die Entwicklung eines Sekundärglaukoms oder einer Ablatio retinae im Verlauf hat ebenfalls weitreichende Konsequenzen.

Als problematisch erweisen sich unentdeckte eisen- und kupferhaltige Fremdkörper, welche bei einem intraokularen Verbleib schwerwiegende Schäden durch toxische Effekte auslösen. Eisenhaltige Fremdkörper können zu einer Siderosis führen, bei der die Eisenionen in den Epithelien des Auges akkumulieren und so eine Katarakt, eine Uveitis, einen Glaukom oder eine Netzhautdegeneration verursachen. Auch in der aktuellen Literatur sind Fälle beschrieben worden, bei denen kleine eisenhaltige Fremdkörper der Diagnostik entgingen und somit eine Siderosis auslösten [63, 69].

Ebenso gefährlich sind Fremdkörper aus Kupfer, die eine Chalkose zur Folge haben. Diese manifestiert sich in der Bildung eines Kayser-Fleischer-Ringes oder einer Sonnenblumen-Katarakt. Gefürchtet ist auch die Entwicklung einer aseptischen Endophthalmitis, welche ebenfalls durch verbliebene kupferhaltige Fremdkörper ausgelöst werden kann.

Andere Materialien wie Aluminium, Porzellan und Glas sind dagegen inert, d. h. sie lösen keine toxischen Reaktionen aus, und können bei extraokulärer Lokalisation und komplikationslosem Verlauf belassen werden [1].

Eine infektiöse Endophthalmitis ist prinzipiell bei jeder Fremdkörperverletzung durch die Implantation von Mikroorganismen in das Auge oder die Orbita möglich. Gerade verbliebene organische Fremdkörper wie beispielsweise Holz sind imstande, eitrige Entzündungen, Abszesse, Osteomyelitiden, Fisteln und granulomatöse Entzündungsreaktionen auszulösen [5, 50]. Grund hierfür sind die zahlreichen Poren, die ein natürliches Reservoir für Mikroorganismen darstellen, weshalb organische Materialien im Vergleich zu Metall oder Glas häufiger Entzündungen induzieren [28].

Treten Verletzungen der Augenlider, der Hornhaut oder der Sklera auf, muss deshalb unbedingt an einen Fremdkörper gedacht werden. Grundlage der Diagnose einer Fremdkörperverletzung ist zum einen eine ausführliche Anamnese, z. B. ob eine Verletzung bei der Arbeit mit dem Hammer aufgetreten ist. Zum anderen ist die klinische Untersuchung von entscheidender Bedeutung, da schon kleinste Verletzungen als Hinweis auf eine Eintrittspforte eines Fremdkörpers dienen können.

Der direkte Nachweis eines intraokularen Fremdkörpers ist trotz gründlicher klinischer Untersuchung an der Spaltlampe oftmals nicht möglich. Häufig entgeht der Fremdkörper dem Untersucher durch eine eingeschränkte Einsicht in das Auge im Rahmen einer Trübung der optischen Medien, wie z. B. der Glaskörperblutung und der Cataracta traumatica, oder bei mangelnder Mitarbeit des Patienten. Für den Ausschluss oder die Bestätigung eines Fremdkörpers kann deshalb bei diesen Patienten eine bildgebende Diagnostik notwendig werden. Die zur Verfügung stehenden bildgebenden Verfahren sind die Sonografie, das Röntgen der Orbita in einer oder zwei Ebenen, das Lokalisationsverfahren nach Comberg sowie die CT und die MRT. Dabei sind verschiedene Anforderungen an diese Verfahren zu stellen. Zum einen sollen sie eine hohe Sensitivität und Spezifität für die Fremdkörper aufweisen, zum anderen ist die Lokalisation des Fremdkörpers im oder außerhalb des Auges zu klären. Dabei soll die Strahlenbelastung so gering wie möglich sein.

Der Vorteil der Sonografie liegt in der Verwendung von Schallwellen, während die radiologisch bildgebenden Methoden ionisierende Strahlen verwenden. Im Rahmen der sonografischen Untersuchung entsteht damit keine Strahlenbelastung für den Patienten. Gleichzeitig sollte theoretisch jeder Fremdkörper in der Sonografie gleich gut abgebildet werden, da die Änderung des Schallwiderstandes eine Änderung der reflektierten Schallwellen verursacht [26]. Von großem Nutzen hat sich die gute Darstellbarkeit von intraokularen Strukturen und Verletzungsfolgen erwiesen. Bei stark traumatisierten Bulbus ist die sonografische Untersuchung aufgrund des notwendigen Kontaktes zwischen Bulbus und dem Ultraschallkopf allerdings deutlich eingeschränkt oder unmöglich, da die Gefahr einer

Infektion oder einer zusätzlichen Verletzung bzw. die Gefahr eines Prolapses von intraokularen Strukturen besteht [32]. Als weiterer Nachteil ist die alleinige Darstellbarkeit der vorderen zwei Drittel der Orbita in ausreichender Auflösung zu nennen [65]. Damit können hinter dem Bulbus gelegene Fremdkörper der sonografischen Untersuchung entgehen. Der Einsatz der konventionellen Röntgenmethoden wird unterschiedlich bewertet. Häufig werden diese als Screeningmethode bei Patienten eingesetzt, bei denen anamnestisch der V. a. einen Fremdkörper besteht, da die Untersuchungsmethode schnell und einfach durchführbar ist. Zusätzlich ist das konventionelle Röntgen untersucherunabhängig. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass ein Nachweis nur bei röntgenpositiven Materialien wie Metall oder z. T. auch Glas gelingt. Hinsichtlich der Lokalisation sind die konventionellen Röntgenverfahren deutlich eingeschränkt. Zum einen ist der Bulbus nicht bildgebend, zum anderen ergeben sich aufgrund der Strahlengeometrie Abweichungen, wodurch die exakte Lagebestimmung eines Fremdkörpers nicht möglich ist.

Das erste brauchbare Lokalisationsverfahren von röntgenpositiven Fremdkörpern ist das 1927 eingeführte Verfahren nach Comberg. Dabei trägt der Patient eine Kontaktlinse mit vier Bleimarken. In einem frontalen und einem seitlichen Strahlengang dienen diese Bleimarken als Bezugspunkt zur Lokalisation. Anschließend werden die gemessenen Werte in das Taboschema übertragen. Da das Schema für emmetrope Augen mit einer Bulbuslänge von 24 Millimetern (mm) ausgelegt ist, kann das Verfahren bei verlängertem oder verkürztem Augapfel ungenau sein. Dies lässt sich durch eine sonografische Bestimmung der Bulbuslänge vermeiden [4]. Da für die Lokalisation des Fremdkörpers eine Kontaktlinse auf das Auge aufgebracht werden muss, besteht eine weitere Verletzungsgefahr. Gleichzeitig ist durch die Manipulation am offenen Bulbus die Implantation von infektiösen Erregern möglich, weshalb dieses Verfahren bei einer starken Verletzung des Auges mit klaffender Wunde nicht durchgeführt werden sollte.

Im Gegensatz zu den konventionellen Verfahren wird in der CT kein Summationsbild erstellt, sondern hintereinander gelegene Strukturen werden überlagerungsfrei abgebildet. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Lagebeziehung eines Fremdkörpers in Bezug auf die Strukturen innerhalb oder außerhalb des Auges zu beschreiben. Ein weiterer Vorteil der CT gegenüber den konventionellen Röntgenverfahren ist der mögliche Nachweis von nicht metallischen Fremdkörpern durch die Erfassung von Strukturen geringer Dichteunterschiede.

Die CT gilt allgemein als Mittel der Wahl in der bildgebenden Darstellung von Fremdkörpern, weshalb diese laut einigen Autoren als erste Bildgebung bei jeder Fremdkörperverletzung durchgeführt werden sollte [21, 71]. Grund hierfür ist die hohe

Sensitivität und Spezifität sowie die Fähigkeit einen Fremdkörper genau zu lokalisieren. Trotzdem sind in der Literatur einige Fälle beschrieben worden, in denen ein computertomografischer Nachweis von metallischen Fremdkörpern nicht gelang [46, 69].

Die MRT ist ein weiteres Schnittbildverfahren, das zum Nachweis intraorbitaler Fremdkörper angewendet werden kann. Allerdings ist die Ortsauflösung im Vergleich zur CT reduziert und damit die Möglichkeit der Lokalisation vermindert. Für die Darstellung von nichtmetallischen Fremdkörpern ist es im Vergleich zu den anderen bildgebenden Methoden besser geeignet. Problematisch ist bei der MRT allerdings die lange Untersuchungszeit, da durch Bewegungen des Auges während des Untersuchungsvorgangs ein möglicher Fremdkörper im untersuchten Abschnitt nicht korrekt zugeordnet wird. Die Verwendung des notwendigen starken Magnetsfeldes kann eine Lageveränderung eines möglichen ferromagnetischen Fremdkörpers bewirken und somit weitere Verletzungen verursachen.

Die Einschränkungen der verschiedenen apparativen Untersuchungsmethoden sind in der Diagnostik von intraorbitalen Fremdkörpern für die klinische Tätigkeit von wesentlicher Bedeutung und machen die Auswahl des richtigen bildgebenden Verfahrens oftmals sehr schwierig, da nicht jedes bildgebendes Verfahren jeglichen Fremdkörper mit Sicherheit darstellen oder differenzieren kann.

Um das richtige bildgebende Verfahren auszuwählen, ist eine ausführliche Anamnese wichtig, da diese einen Hinweis auf das Material eines möglichen Fremdkörpers liefert. Studien belegen, dass es sich in bis zu 90 % der Fälle um metallische Fremdkörper handelt [24, 31]. Damit ist ein Großteil der Fremdkörper in den konventionellen Röntgenmethoden darstellbar, während sich die MRT bei diesen Patienten verbietet.

Der Nachweis von organischen Materialien wie Holz ist in der bildgebenden Diagnostik weiterhin extrem schwierig. Zwar ist die Sonografie prinzipiell in der Lage, hölzerne Fremdkörper korrekt darzustellen, sie ist aber nicht verlässlich [58], da Holz weniger reflektiv als andere Materialien ist [32]. In den konventionellen Röntgenaufnahmen sind organische Materialien nicht bildgebend. Deshalb spielt das konventionelle Röntgen in der Diagnostik von hölzernen Fremdkörpern keine Rolle [36]. Somit wird in der Diagnostik von Holzfremdkörpern der CT und der MRT die größte Bedeutung beigemessen. Ob die organischen Fremdkörper sich in den genannten bildgebenden Verfahren darstellen lassen, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Einfluss auf die Darstellung von Holz hat die Größe, die Dichte, die Lage des Fremdkörpers im Vergleich zur untersuchten Schicht und die Beziehung der Dichte des Holzfremdkörpers zur Dichte des umliegenden Gewebes [51]. Jede Holzart besitzt jeweils eine andere Zellgröße, chemische Zusammensetzung, einen

unterschiedlichen Gehalt an Mineralien, Lignin, Zellulose und Harzen [55], wodurch sich Holzfremdkörper in der CT mit unterschiedlicher Dichte darstellen. Durch die uneinheitliche Zusammensetzung werden sowohl in der CT als auch in der MRT diagnostische Unsicherheiten beschrieben [51].

Die operative Entfernung als ein Bestandteil der Therapie eines intraorbitalen Fremdkörpers wird aufgrund der zahlreichen möglichen Komplikationen in der Regel angestrebt. Abhängig von der Lokalisation eines Fremdkörpers existieren unterschiedliche operative Zugangswege zur Extraktion. Bei einer Lokalisation im vorderen Augenabschnitt können diese über die Vorderkammer extrahiert werden. Die Entfernung von Fremdkörpern aus dem hinteren Augenabschnitt gestaltet sich häufig schwieriger und hat sich in der Vergangenheit grundlegend gewandelt.

Marie Colinet-Fabry entfernte bereits im Jahr 1624 mit einem extraokulären Magneten einen Fremdkörper aus der Hornhaut. Bis zur Entwicklung der Vitrektomie in den siebziger Jahren galt dieses Prinzip als Therapiestandard zur Entfernung eines metallischen Fremdkörpers aus dem hinteren Augenabschnitt. Eine Extraktion mittels einem extraokulären Magneten birgt aber auch die Gefahr schwerer Begleitverletzungen, da sich der Fremdkörper durch das Auge auf den Magneten zu bewegt. Die an die präoperative Diagnostik gestellte Anforderung diente somit hauptsächlich der exakten Lagebestimmung, damit ein operativer Zugangsweg gewählt werden kann, der möglichst nah am Fremdkörper liegt.

Die Vitrektomie gilt heute als Standardverfahren in der Therapie von im hinteren Augenabschnitt lokalisierten Fremdkörpern, da der Fremdkörper über einen Zugang in der Pars Plana mit einer Pinzette oder einem Endomagneten, der zum Fremdkörper hingeführt wird, kontrolliert entfernt werden kann. Gleichzeitig können auch wesentliche Komplikationen der Verletzung wie eine Glaskörperblutung oder eine Ablatio retinae therapiert werden. Die Notwendigkeit einer exakten Lokalisation des Fremdkörpers in der präoperativen Diagnostik hat sich mit Einführung dieser Methode laut einigen Autoren deutlich verringert [33]. Andere Autoren hingegen sehen die exakte Detektion und Lokalisation eines intraokularen Fremdkörpers trotz der Pars Plana Vitrektomie als zwingend erforderlich an [37, 53].

### **3.2 Fragestellung der Arbeit**

In der folgenden Arbeit sollen die bildgebenden Verfahren, die in der Diagnostik eines intraorbitalen Fremdkörpers zum Einsatz kommen, kritisch betrachtet werden. Ziel ist es, den Stellenwert der bildgebenden Verfahren in der Diagnostik von Fremdkörperverletzungen zu bestimmen. Schließlich soll für den klinischen Alltag eine Empfehlung für den Einsatz der bildgebenden Verfahren erarbeitet werden, mit der ein zielgerichtetes und effizientes Vorgehen ermöglicht wird. Überlegungen zu Aufwand, Kosten, Strahlenbelastung und Beeinträchtigung des Patienten sind deshalb von besonderer Bedeutung.

Anhand retrospektiver Daten und einer kritischen Literaturrecherche werden Indikationskriterien erarbeitet. Es wird zu klären sein, ob jeder Patient mit einem Fremdkörperverdacht einer bildgebenden Untersuchung zugeführt werden muss bzw. wie mit Patienten verfahren werden soll, deren Fremdkörper schon an der Spaltlampe nachgewiesen werden kann.

Besteht schließlich die Notwendigkeit einer bildgebenden Untersuchung, muss das richtige Verfahren ausgewählt werden. Es stehen die Sonografie, das Röntgen in einer bzw. zwei Ebenen oder die Comberg-Methode, die CT und die MRT zur Verfügung. Jedes dieser Verfahren hat seine Einschränkungen und Unsicherheiten, weshalb es keine hundertprozentig sichere bzw. optimale Methode gibt. Können angesichts der besonderen Vorteile der Sonografie die konventionellen Röntgenverfahren, wie z.B. das Comberg-Verfahren, noch empfohlen werden? Können neben der CT auch andere Untersuchungsverfahren ihren Stellenwert behaupten?

In der retrospektiven Analyse werden aus diesem Grund verschiedene Berechnungen durchgeführt, um die jeweilige diagnostische Treffsicherheit zu bestimmen. Anhand dieser Berechnungen und der aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse werden die einzelnen Verfahren bewertet.

Der Einsatz bildgebender Untersuchungen im Rahmen der operativen Extraktion (Pars Plana Vitrektomie) eines Fremdkörpers wird in der vorliegenden Arbeit besondere Beachtung finden. Die Notwendigkeit einer präoperativen und exakten Lokalisation wird kontrovers diskutiert.

Für die Auswahl des bildgebenden Verfahrens muss auch das Fremdkörpermaterial Berücksichtigung finden. Speziell in der Darstellung von hölzernen Fremdkörpern ergeben sich erhebliche diagnostische Schwierigkeiten, da Holz in den konventionellen Röntgenverfahren nicht bildgebend ist und auch die Sonografie beträchtliche Unsicherheiten aufweist. Studien zeigen bei der Untersuchung von Holzfremdkörpern in der CT und der MRT unterschiedliche Ergebnisse. Übereinstimmend ergibt sich für beide Verfahren eine

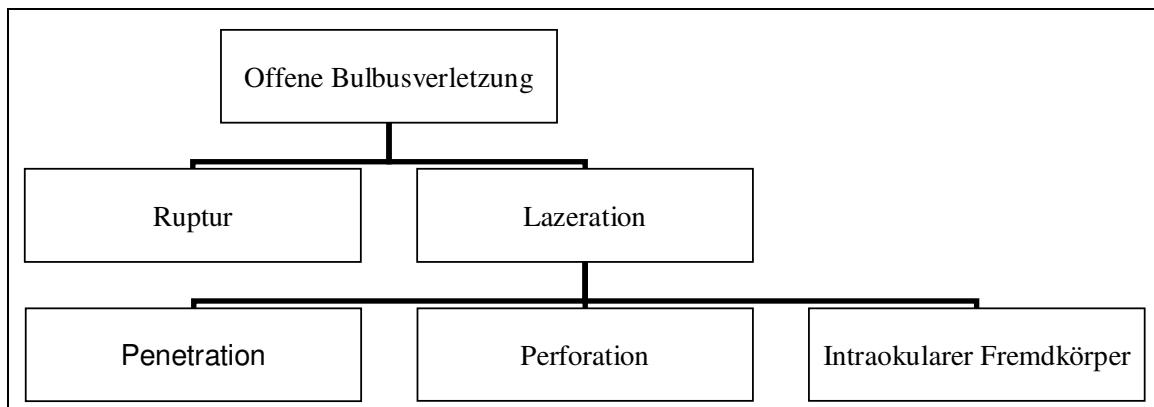
deutlich eingeschränkte Treffsicherheit. Zur Holzfremdkörperproblematik liegen bisher nur Untersuchungen mit Geräten bis zu einer Feldstärke von 1,5 T vor. Auf Grund des technischen Fortschritts stehen in den Kliniken heute aber zunehmend auch 3 T MRT-Einheiten zur Verfügung. Deshalb soll in einem in vitro Modell die Darstellbarkeit von Holzfremdkörpern mit der CT, der 1,5 T MRT und der 3 T MRT untersucht werden. Die bildgebenden Verfahren werden untereinander verglichen, um aufzuzeigen, ob die 3 T MRT Vorteile in der Diagnostik erbringt. Beachtung bei der Untersuchung zum Nachweis von Holzfremdkörpern muss dabei die Holzart und deren Feuchtigkeitsgehalt finden, ebenso wie der Einfluss des umgebenden Materials wie Glaskörper oder Fett. Weiterhin findet der Einfluss der Fremdkörpergröße auf die Darstellbarkeit besondere Berücksichtigung. In der vorliegenden Studie wird deshalb eine Nachweisgrenze von Holzfremdkörpern bestimmt.

## 4. Eigene Untersuchungen

### 4.1. Retrospektive Untersuchungen

#### 4.1.2 Voraussetzungen für die Aufnahme in die Studie

Voraussetzung für eine Aufnahme der Patienten in die Studie war eine Perforation bzw. Penetration der Hornhaut oder der Sklera. Laut dem Birmingham Eye Trauma Terminology system (BETTs) [35] sind bei offenen Bulbusverletzungen Rupturen von Lazerationen des Bulbus zu unterscheiden. Eine Ruptur oder Lazeration ist dabei eine Wunde, welche die Wand des Augapfels vollständig durchdringt. Zu unterscheiden sind beide Verletzungen durch den Entstehungsmechanismus. Eine Ruptur entsteht durch ein stumpfes Objekt, durch dessen großflächige Einwirkung auf den Bulbus der intraokulare Druck schlagartig ansteigt und die Wand des Bulbus dadurch am schwächsten Punkt nachgibt. Die dadurch hervorgerufene Wunde entsteht durch einen Mechanismus, dessen Kraft von Innen nach Außen gerichtet ist. Eine Ruptur ist somit eine Verletzung, die beispielsweise bei einem Sturz entsteht. Die Lazeration entsteht hingegen durch die Einwirkung eines scharfen Objektes. Die Wunde resultiert aus einem von Außen- nach Innen-Mechanismus. Die Lazeration muss weiterhin unterschieden werden in eine Penetration, Perforation sowie das Vorhandensein eines intraokularen Fremdkörpers. Eine Penetration ist laut des BETTs eine einzelne durchgreifende Läsion des Bulbus. Eine Perforation ist eine den Bulbus vollständig durchgreifende Wunde, wobei durch ein einzelnes scharfes Objekt eine Eintritts- und eine Austrittswunde entstand. Im Unterschied zur Penetration existieren im Rahmen einer Perforation zwei Wunden des Augapfels. Ein intraokularer Fremdkörper ist dem entsprechend eine Penetration, wird aber aufgrund der unterschiedlichen Therapie extra angeführt (Abbildung 1)[35].



**Abbildung 1:** Einteilung der offenen Augenverletzungen nach dem BETTs (Birmingham Eye Trauma Terminology system)

#### **4.1.3 Datenerfassung**

Retrospektiv wurden 213 Patientenakten ausgewertet, die in dem Zeitraum vom 01.01.1996 bis zum 31.10.2009 an der Universitäts-Augenklinik zu Rostock wegen perforierenden und penetrierenden Verletzungen des Auges mit und ohne Fremdkörper behandelt wurden.

Über die Suchfunktion der Datenbank-Software Filemaker Pro der Augenklinik konnten, nach Stichwörtern und dem ICD-10-Code, die Namen und Geburtsdaten der in Frage kommenden Patienten ermittelt werden. Mit diesen Daten war es möglich, die entsprechenden Akten der Patienten herauszusuchen. Kamen die Patienten für eine Aufnahme in die Studie in Frage, wurden die notwendigen Daten aus der Akte entnommen und gleichzeitig anonymisiert. Zur Dokumentation des Datenmaterials wurden ein Erfassungsbogen und Codierungsschlüssel erstellt, die im Folgenden dargestellt und erläutert werden (Abbildung 2 und 3).

### Erfassungsbogen

1. Patientennummer: \_\_\_\_\_ 2. Alter: \_\_\_\_\_ 3. Geschlecht: männlich  weiblich
4. Unfallart: Verkehrsunfall  berufsgenossenschaftlicher Unfall  private Arbeit   
Haushalt  Sport und Spiel  Sonstige
5. Unfallursache: \_\_\_\_\_ 6. Seite der Verletzung: Links  Rechts
7. Fremdkörper: Metall  Glas  Holz  Stein  Sonstige  kein Fremdkörper
8. Visus Aufnahme: Ferne: \_\_\_\_\_ Nähe: \_\_\_\_\_ Tension: \_\_\_\_\_ 9. Entlassungsvisus: Ferne: \_\_\_\_\_ Nähe: \_\_\_\_\_
10. Eintrittsort Fremdkörper: Hornhaut  Sklera  beides
11. Begleitverletzungen: Oberlid  Unterlid  Vorderkammer-Einblutung   
Hornhaut  Iris  Linse  Glaskörper-Blutung  Netzhaut  Sklera
12. Sonografie: präoperativ  postoperativ  Lokalisation: \_\_\_\_\_  
richtig positiv  richtig negativ  falsch positiv  falsch negativ
13. Orbita Röntgen: eine Ebene  zwei Ebenen  präoperativ  postoperativ   
Lokalisation: \_\_\_\_\_ richtig positiv  richtig negativ  falsch positiv   
falsch negativ
14. Comberg: präoperativ  postoperativ  Lokalisation: \_\_\_\_\_  
richtig positiv  richtig negativ  falsch positiv  falsch negativ
15. CT: präoperativ  postoperativ  Lokalisation: \_\_\_\_\_  
richtig positiv  richtig negativ  falsch positiv  falsch negativ
16. MRT: präoperativ  postoperativ  Lokalisation: \_\_\_\_\_  
richtig positiv  richtig negativ  falsch positiv  falsch negativ
17. Extraktionstechnik: Magnet  Vitrektomie  Pinzette  keine  sonstig
18. Extraktionsweg: Pars Plana  Eintrittskanal  Parazentese  Vorderkammer   
Keine  sonstig
19. Fremdkörper-Lage: Hornhaut  Iris  Linse  Ziliarkörper  Glaskörper   
Netzhaut  Sklera  extrabulbar
20. Hat die Bildgebung die Diagnose verändert?  
Röntgen eine Ebene ja  nein       Röntgen zwei Ebenen ja  nein   
Comberg ja  nein       CT ja  nein

**Abbildung 2:** Erfassungsbogen

Folgende Erläuterungen zum Erfassungsbogen:

4. und 5.

Unter Unfallart wurde notiert, in welchem Rahmen der Unfall geschehen ist. Dabei wurde zwischen Verkehrsunfall, berufsgenossenschaftlich versichertem Unfall, privatem Arbeitsunfall, Haushaltsunfall sowie Unfall bei Sport und Spiel unterschieden. Unter „Sonstige“ wurden Unfälle angeführt, die keiner Kategorie eindeutig zugeordnet werden konnten. Unter Unfallursache wurde der Unfallmechanismus protokolliert, welcher im Erfassungsbogen verbal dokumentiert wurde.

Unter der Unfallursache sind in der vorliegenden Studie auch Stürze dokumentiert worden. Laut der oben erwähnten Definition sind diese den Rupturen zuzuordnen und sollten theoretisch nicht in die vorliegende Studie mit einfließen. Es ist aber zu beachten, dass bei einem Sturz auf einen scharfkantigen Gegenstand wiederum eine Penetration entstehen kann, beispielsweise bei einem Sturz in eine Hecke. Deshalb sind in der vorliegenden Studie trotzdem Stürze als Verletzungsursache mit aufgeführt.

Als alle Patienten erfasst waren, wurden die häufigsten Verletzungsmechanismen ausgezählt. Eine eindeutige kategorische Zuordnung konnte bei den Fremdkörperverletzungen gemacht werden. Bei den perforierenden Verletzungen war dies aufgrund der sehr verschiedenen Verletzungsursachen nicht möglich. Daher sollen nur die häufigsten Unfallursachen aufgezeigt werden.

7.

War ein Fremdkörper vorhanden, wurde das Material des Fremdkörpers dem Operationsbericht entnommen. Bei nicht entfernten Fremdkörpern wurde der radiologische Befund zur Bewertung hinzugezogen, da der Fremdkörper hier aufgrund seiner Densität bewertet wurde. War trotzdem keine Zuweisung zu den Gruppen Metall, Glas, Holz und Stein möglich, wurde das Fremdkörpermaterial der Kategorie „Sonstige“ zugewiesen (z. B. Verletzungen durch Feuerwerkskörper).

11.

Die Begleitverletzungen wurden den Aufnahmebögen sowie den Operationsberichten entnommen und entsprechend verschlüsselt. Sollte auswärts eine Wunde schon versorgt worden sein, so wurde die Verletzung trotzdem mit angeführt.

12. – 16.

Die Ergebnisse der Untersuchungsverfahren wurden nur verwertet, wenn sie eindeutig mit der Zielstellung der Fremdkörpersuche durchgeführt wurden.

Retrospektiv erfolgte eine Analyse der Daten, wie empfindlich die verschiedenen radiologischen Verfahren im Nachweis von Fremdkörpern sind. Die Ergebnisse der radiologischen Bildgebung wurden mit den Untersuchungsergebnissen und Operationsberichten bezüglich des Vorhandenseins eines Fremdkörpers verglichen. Damit ergeben sich für die Diagnostik richtig positive Ergebnisse, bei denen die radiologische Bildgebung in der Lage war, einen tatsächlich vorhanden Fremdkörper korrekt darzustellen. Ist ein Fremdkörper in der Bildgebung nicht nachgewiesen worden, ist dies als ein falsch negatives Ergebnis zu werten. Als falsch positives Ergebnis gilt, wenn die bildgebende Diagnostik einen Fremdkörper aufzeigen konnte, obwohl in Wirklichkeit kein Fremdkörper vorhanden war. Richtig negative Ergebnisse bedeuten, dass die bildgebenden Verfahren keinen Fremdkörper darstellten, wenn tatsächlich kein Fremdkörper vorhanden war.

17. und 18.

Die Einteilung der Extraktionsmethoden erfolgte in Anlehnung an die Promotionsarbeit „Analyse von perforierenden Augenverletzungen unter besonderer Betrachtung der Wertigkeit verschiedener bildgebender Verfahren in der Diagnostik intraokularer Fremdkörper“ von Hempel, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen [29].

19.

Die Fremdkörperlage wurde dem Operationsbericht entnommen. Bei extrabulbärer Lokalisation wurde die Lage durch die radiologischen Untersuchungsverfahren in Kombination ermittelt. Intraoperativ wurde bei diesen Patienten anhand der Austrittswunde der Verdacht einer extraokularen Lage geäußert.

20.

Um die bildgebenden Verfahren zu beurteilen, sollte auch der Diagnosewert bestimmt werden. Der Diagnosewert gibt an, wie häufig ein bildgebendes Verfahren die Diagnose verändert hat.

## Codierungsschlüssel

### 3. Geschlecht

1 = männlich                            2 = weiblich

### 6. Seite der Verletzung

1 = linkes Auge                            2 = rechtes Auge

### 7. Fremdkörperart

1 = Metall                                    2 = Glas                                    3 = Holz                                    4 = Stein  
5 = sonstige                                    6 = kein Fremdkörper

### 10. Eintrittsort Fremdkörper

1 = Hornhaut                                    2 = Sklera                                    3 = beides

### 11. Begleitverletzungen

0 = nicht vorhanden                            1 = vorhanden

### 12. bis 16. Diagnostik

1 = richtig positiv                            2 = richtig negativ  
3 = falsch positiv                                    4 = falsch negativ

### 17. Extraktionstechnik

0 = keine Extraktion                            1 = Magnet                                    2 = Vitrektomie  
3 = Pinzette    4 = sonstig

### 18. Extraktionsweg

0 = keine Extraktion                            1 = Pars Plana                            2 = Eintrittskanal  
3 = Parazentese                                    4 = Vorderkammer                            5 = sonstig

### 19. Fremdkörper-Lage

0 = Fremdkörper dort nicht lokalisiert                    1 = Fremdkörper dort lokalisiert

**Abbildung 3:** Codierungsschlüssel

Folgende Erläuterungen zum Codierungsschlüssel:

11.

Die im Erfassungsbogen aufgeführten Begleitverletzungen wurden tabellarisch in jeweils einer Spalte aufgeführt. Die aufgeführten Verletzungen wurden mit „1“ codiert, wenn eine entsprechende Verletzung vorhanden war, mit „0“, wenn diese nicht nachgewiesen werden konnte.

19.

Den im Erfassungsbogen aufgeführten möglichen Fremdkörperlokalisierungen wurde in der Datenbank jeweils eine Spalte zugeordnet. War der Fremdkörper in dem entsprechenden Bereich lokalisiert, wurde diesem die Zahl „1“ zugeordnet. Konnte der Fremdkörper nicht in diesem Bereich nachgewiesen werden, wurde dieser mit „0“ codiert.

#### **4.1.4 Analyse**

Die erhobenen Daten wurden anschließend in ein Tabellenkalkulationsprogramm übertragen. Mit diesem Programm war es möglich, die Fremdkörperprävalenz, die Sensitivität, die Spezifität sowie den positiven und negativen Vorhersagewert für das jeweilige Untersuchungsverfahren zu berechnen. Die Fremdkörperprävalenz wurde für jedes Untersuchungsverfahren bestimmt und verdeutlicht, wie häufig Patienten einen Fremdkörper aufwiesen, wenn dieses Verfahren zur Fremdkörpersuche verwendet wurde. Sensitivität bedeutet, wie empfindlich das Untersuchungsverfahren im Nachweis von Fremdkörpern ist. Die Sensitivität gibt die Rate der entdeckten Fremdkörper von der Gesamtzahl der Fremdkörper an, die mit einem bildgebenden Verfahren untersucht wurden. Die Spezifität sagt aus, wie sicher das diagnostische Verfahren Gesunde als gesund erkennt. Bezogen auf unsere Arbeit bedeutet die Spezifität, wie viele Patienten ohne Fremdkörper durch das bildgebende Verfahren auch als solche erkannt wurden. Der positive Vorhersagewert gibt die Wahrscheinlichkeit wieder, bei wie vielen Patienten mit einem Fremdkörpernachweis im diagnostischen Verfahren auch wirklich ein Fremdkörper vorliegt. Der negative Vorhersagewert gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass ein Patient mit einem negativen Fremdkörpernachweis tatsächlich auch keinen Fremdkörper hat. Tabelle 1 erläutert die Berechnungen, die anhand der gewonnenen Daten ermöglicht wurden.

**Tabelle 1:** Formeln für verwendete Berechnungen

	Fremdkörper	
<b>Ergebnis Diagnostik</b>	Vorhanden	Nicht vorhanden
<b>Fremdkörper nachweisbar</b>	richtig positiv (a)	falsch positiv (b)
<b>Fremdkörper nicht nachweisbar</b>	falsch negativ (c)	richtig negativ (d)
<b>Prävalenz</b>	$= a + c/(a + b + c + d)$	
<b>Sensitivität</b>	$= a/(a + c)$	
<b>Spezifität</b>	$= d/(b + d)$	
<b>positiver Vorhersagewert</b>	$= a/(a + b)$	
<b>negativer Vorhersagewert</b>	$= d/(c + d)$	

In dem Statistikprogramm SPSS konnten Gruppenunterschiede durch den Chi-Quadrat-Test ( $\chi^2$ -Test) nachgewiesen werden. Ein Unterschied wird als signifikant angesehen, wenn das Ergebnis  $p < 0,05$ , als sehr signifikant wenn  $p < 0,01$  und als hoch signifikant wenn  $p < 0,001$  ist. Da der Chi-Quadrat-Test bei kleinen Gruppen nicht angewendet werden darf, wurde in solchen Fällen der exakte Test nach Fischer verwendet.

## **4.2 Experimentelle Studien**

### **4.2.1 Holzfremdkörper**

Da Experimente mit jeder Holzart aufgrund der großen Anzahl zu aufwendig sind, wurden exemplarisch Kiefern- und Eichenholz für unsere Studie genutzt. Eichenholz ist ein typisches Hartholz, während Kiefernholz ein Vertreter der Weichhölzer ist. Beide Holzarten kommen in Deutschland häufig vor und werden vielfach als Werkstoffe verwendet. In der vorliegenden Studie sollte der Einfluss von hartem oder weichem Holz auf die Darstellbarkeit in den bildgebenden Verfahren beurteilt werden, weshalb sich speziell für diese Holzarten entschieden wurde.

Die Darstellung von Holz ist zusätzlich vom Wassergehalt abhängig, weshalb von jeder Holzart unbehandelte trockene und frische Hölzer verwendet wurden. Die Untersuchung erfolgte somit in dem vorliegenden Versuchsaufbau mit insgesamt vier verschiedenen Hölzern.

Es erfolgte die Herstellung von insgesamt fünf unterschiedlichen Größen mit einer Maße von 1 x 1 x 4 mm; 1 x 1 x 5 mm; 1,5 x 1,5 x 4 mm; 1,5 x 1,5 x 5 mm und 2 x 2 x 4 mm (Abbildung 4). Von den vier Hölzern wurden jeweils zwei Fremdkörper jeder Größe angefertigt, so dass eine Gesamtzahl von 40 Fremdkörpern in dem Untersuchungsmodell vorlag.

Zur Herstellung der unterschiedlichen Holzgrößen wurden mit der Säge aus den verwendeten Hölzern kleinere Stücke angefertigt. Mit einem Cuttermesser und einem Skalpell wurde unter Verwendung einer Lupe das Holz anschließend in die benötigte Größe und Form gebracht. Die Größe der Hölzer wurde mit einer Mikrometerschraube bestimmt. Bei der Messung war zu beachten, dass die Form und die Größe durch den Druck des Stempels der Mikrometerschraube nicht verändert wurden.



**Abbildung 4:** Größe Fremdkörper; von oben nach unten:  
4 mm<sup>3</sup>; 5 mm<sup>3</sup>; 9 mm<sup>3</sup>; 11,25 mm<sup>3</sup>; 16 mm<sup>3</sup>

#### 4.2.2 Untersuchungsmodell

Als Medium, in dem die Fremdkörper positioniert wurden, diente entweder eine Agarlösung oder Schweineschmalz. Die verwendete 2 %ige Agarlösung sollte den Glaskörper bzw. die intraokulären Strukturen darstellen. Das Schweineschmalz sollte das periorbitale Fettgewebe imitieren. Es wurden jeweils 12 Becher mit der Agarlösung und 12 Becher mit dem Schweineschmalz gefüllt. In den Bechern mit der Agarlösung war sowohl das frische, als auch das trockene Kiefern- und Eichenholz jeder Größe einmal verwendet worden. Gleichermaßen gilt für die Becher mit dem Fett. Insgesamt wurden somit 40 Fremdkörper auf 20 Becher verteilt, so dass jeder Becher zwei Fremdkörper enthielt. Zwei Becher mit Schweineschmalz und zwei Becher mit Agarlösung enthielten keine Fremdkörper.

Um die Becher mit Schweineschmalz zu füllen, wurde dieses erhitzt, so dass es eine flüssige Konsistenz bekam. Anschließend wurde das Schweineschmalz bis zu einer bestimmten Höhe in die Joghurtbecher gegossen, in der die Fremdkörper liegen sollten. Die frischen Holzfremdkörper konnten nun positioniert werden. Das trockene Holz sank zum Teil nach unten, so dass nach Aushärten der ersten Schicht Schweineschmalz eine dünne Schicht flüssiges Schmalz hinzugefüllt wurde. Jetzt konnten die trockenen Holzfremdkörper positioniert werden. Nach dem Aushärten der bisher eingefüllten Schichten konnten die Becher vollständig mit frischem Schmalz aufgefüllt werden.

Für die Herstellung der 2 %igen Agarlösung wurden 20 g Agarpulver in 480 ml Wasser untergerührt und langsam erhitzt. Da sich in den Vorversuchen herausstellte, dass die Holzfremdkörper in der Lösung nach oben trieben und somit nur oberflächlich lagen, musste

für den Blindversuch ein anderes Vorgehen gewählt werden, damit die Fremdkörper im ganzen Becher verteilt liegen. Die Lösung wurde bis zu einer bestimmten Höhe in die Joghurtbecher gegossen und die Fremdkörper positioniert. Die Agarlösung bekam nun die Gelegenheit auszuhärten. Eine neue frisch angefertigte 2 %ige Agarmischung wurde hergestellt und die Becher nun vollständig aufgefüllt.

Da sich in den Vorversuchen in der CT und der MRT eine Lösung mit 4 – 10 % Agar gleich darstellte wie eine Lösung mit 2 % Agar, wurde sich für die Letztere entschieden. Dies machte die Herstellung des In-Vitro-Modells einfacher, da bei höheren Agaranteilen das Problem bestand, dass die Lösung schon nach dem Aufkochen zu dickflüssig wurde. Nach dem Befüllen der Becher war die Agarlösung bei der Positionierung der Fremdkörper schon ausgehärtet. Des Weiteren waren in der anschließend durchgeföhrten CT und MRT sehr viele Luftblasen erkennbar, vor allem im Bereich um die Holzfremdkörper. Damit war ein Großteil der Fremdkörper schon anhand der vielen kleinen lokal auftretenden Luftbläschen identifizierbar. Außerdem traten bei den hohen Agar-Konzentrationen vermehrt Verklumpungen auf, welche wie die Luftblasen bis zu einem gewissen Punkt erwünscht waren, da in der Klinik auch Gewebe-Unregelmäßigkeiten auftreten, aber aufgrund des hohen Vorkommens in unserem Experiment zu sehr irritierten.

Zusätzlich wurde versucht, ein Modell herzustellen, das eine Glaskörperblutung simulieren sollte. Dazu wurde einem freiwilligen Probanden in mehreren EDTA-Röhrchen venöses Blut entnommen. Das entnommene 30 ml EDTA-Blut wurde mit 210 ml Wasser vermischt und anschließend 10 g Agarpulver untergerührt. Diese Lösung wurde erhitzt und dann in die Becher gefüllt. Nach dem Aushärten dieser Masse wurden die computer- und magnetresonanztomografischen Untersuchungen mit den unten genannten Einstellungen durchgeführt, in denen bildmorphologisch kein Unterschied zur 2 %igen Agarlösung nachweisbar war. Damit konnte dieser Versuchsaufbau verworfen werden.

#### **4.2.3 CT und MRT: Geräte und Einstellungen**

Die Probenkörper wurden in der CT, 1,5 T MRT und 3 T MRT untersucht. Die technischen Daten sind in den nachstehenden Tabellen aufgeführt. Für beide MRT-Geräte wurden in Vorversuchen verschiedene Untersuchungssequenzen erprobt.

Für die 1,5 T MRT wurde sich aufgrund der guten Darstellbarkeit und geringen Untersuchungszeit für das unten genannte Untersuchungsprotokoll entschieden. Diese entsprechen den Sequenzen, welche von Glatt und Mitarbeiter durch eine experimentelle Studie empfohlen wurden [22]. In der 1,5 T MRT wurde weiterhin eine T1-gewichtete

Sequenz mit TE 8,6 msec/TR 400 msec entsprechend den Untersuchungen von McGuckin und Mitarbeitern durchgeführt [46]. Zusätzlich wurden unterschiedliche T2-gewichtete Sequenzen erprobt. Diese Ansätze wurden jedoch aufgrund der zu langen Untersuchungszeit und der geringeren Darstellbarkeit verworfen.

Für die 3 T MRT lagen keine Erfahrungen bezüglich der Darstellbarkeit von Holzfremdkörpern vor. Es wurden Untersuchungen mit TE 9 msec/TR 400 msec und TE 18 msec/TR 700 msec durchgeführt. Andere T1-gewichtete Sequenzen wurden aufgrund der zu langen Untersuchungszeit und des geringen Kontrastes abgebrochen, so dass sich für unten genannte Einstellung entschieden wurde. T2-gewichtete Sequenzen mit TE 118 msec/TR 5000 msec und TE 2,5 msec/TR 350 msec erbrachten keinen weiteren Gewinn.

**Tabelle 2:** Technische Daten der CT

CT	
<b>Hersteller</b>	Aquillon 32; Toshiba
<b>Schichtdicke</b>	0,5 mm
<b>Pitchfaktor</b>	0,844
<b>Rotationszeit</b>	0,75 sec
<b>Kollimation</b>	0,5 x 32
<b>Bildmatrix</b>	520 x 520
<b>Dosisflächenprodukt</b>	914 mGycm <sup>2</sup>
<b>mAs total</b>	2711 mAs
<b>Röhrenspannung</b>	120 kv
<b>Stromstärke</b>	200 mA
<b>Untersuchungszeit</b>	16:23 sec

**Tabelle 3:** Technische Daten der MRT

	<b>1,5 T MRT</b>	<b>3 T MRT</b>
<b>Hersteller</b>	Avanto; Siemens	Magnetom Verio 3, Siemens
<b>Sequenz</b>	T1- Spin-Echo	T1-Spin-Echo
<b>TR</b>	700 ms	700 ms
<b>TE</b>	21 ms	18 ms
<b>Bildmatrix</b>	173 x 384 Pixel	224 x 320 Pixel
<b>FoV</b>	230 mm	200 mm
<b>FoV-Phase</b>	75 %	100 %
<b>Distanzfaktor</b>	10 %	10 %
<b>Schichten</b>	19	19
<b>Schichtdicke</b>	2 mm	2 mm
<b>Untersuchungszeit</b>	1:34 min	4,06 min

#### 4.2.4 Bildanalyse

Das Experiment sollte die Kriterien einer Blindstudie erfüllen. Die CT und MRT-Untersuchungen wurden einmalig drei verschiedenen Radiologen vorgelegt, welche sich in der fortgeschrittenen Facharztausbildung befanden. Die Radiologen hatten keinen Kontakt zueinander und wurden nur darüber informiert, dass hölzerne Fremdkörper in dem Modell zu finden sind. Die Aufgabe der Radiologen war es, die Fremdkörper nachzuweisen und zu lokalisieren. Dabei konnten die sagittalen, transversalen und coronalen Rekonstruktionen betrachtet werden. Ebenso durften die Fenstereinstellungen frei gewählt werden. Die angebliche Lage der Hölzer wurde entsprechend notiert. Außerdem sollten die Radiologen einschätzen, wie sicher sie sich ihrer Diagnosen waren. Dies sollte in drei Kategorien erfolgen. Es sollte angegeben werden, ob das gezeigte Objekt „eventuell“, „wahrscheinlich“ oder „sehr wahrscheinlich“ ein Holzfremdkörper ist. Für jeden Radiologen wurden ebenfalls die Strukturen notiert, welche keine Fremdkörper waren, aber als solche angegeben wurden (falsch positive Ergebnisse).

#### **4.2.5 Auswertung**

Die Ergebnisse wurden in eine Excel- und SPSS-Tabelle übertragen, wobei jeweils Spalten für die Holzart, die Holzgröße, den Feuchtigkeitsgehalt, den Hintergrund, den Untersucher und den diagnostischen Verfahren angelegt wurden. Den Ergebniskategorien „eventuell“; „wahrscheinlich“ und „sehr wahrscheinlich“ wurden entsprechende Zahlenwerte zugeordnet (eventuell = 1; wahrscheinlich = 2; sehr wahrscheinlich = 3). Nun waren Berechnungen durch SPSS mittels Chi-Quadrat-Test zur Abhängigkeit der Darstellung der Holzfremdkörper möglich.

Die statistische Analyse erfolgte mit Excel 2003 oder mit SPSS (Superior Performance Software System, Version 15.0). Die Grafiken wurden in dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel 2003 erstellt. Die Textverarbeitung erfolgte mit Microsoft Word 2003.

## **5. Ergebnisse der retrospektiven Untersuchungen**

### **5.1 Patientenkollektiv**

Aus dem Zeitraum vom 01.01.1996 bis zum 31.10.2009 wurden 213 Patienten, die wegen penetrierenden oder perforierenden Verletzungen der Hornhaut oder der Sklera an der Universitäts-Augenklinik behandelt wurden, in die Studie einbezogen. Bei 82 dieser Patienten war ein intraokularer oder intraorbitaler Fremdkörper aufzufinden. Tabelle 4 verdeutlicht den Anteil von Fremdkörperverletzungen und Perforationen bzw. Penetrationen. Gleichzeitig wird die Häufigkeit des Auftretens dieser Verletzungen beim männlichen und weiblichen Geschlecht aufgeführt. Fremdkörperverletzungen traten fast nur beim männlichen Geschlecht auf, während der Frauenanteil bei den perforierenden Verletzungen deutlich höher lag.

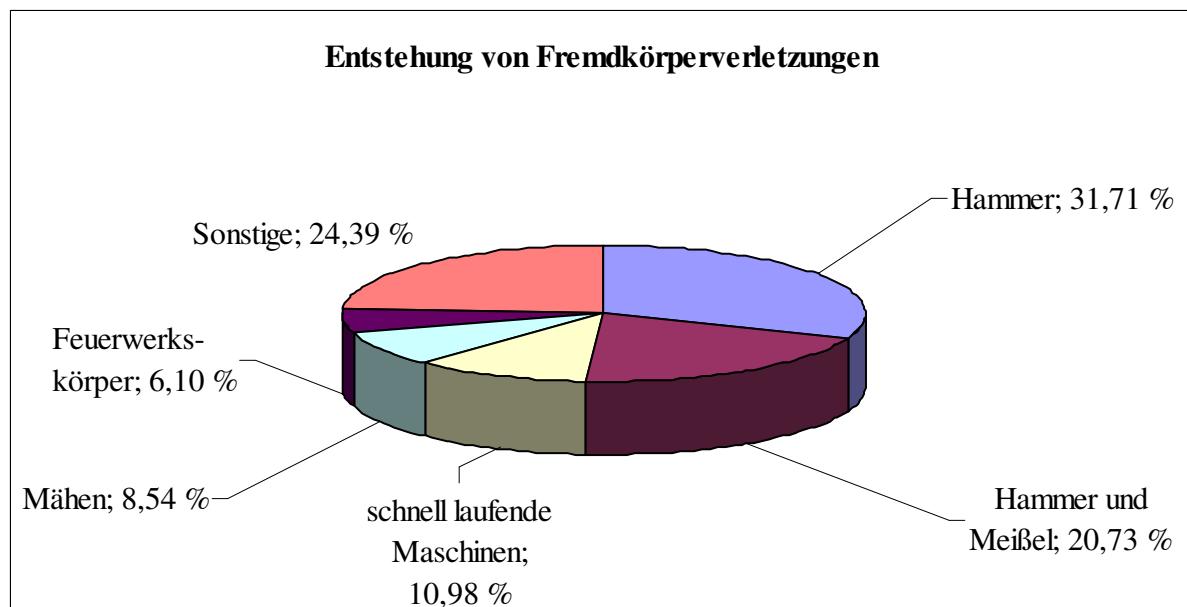
**Tabelle 4:** Häufigkeit von Fremdkörperverletzungen und Perforation/Penetration, Auftreten der Verletzungen beim männlichen und weiblichen Geschlecht

		<b>Ohne Fremdkörper</b>	<b>Mit Fremdkörper</b>
<b>Anteil Verletzungen</b>		61,50 %	38,50 %
<b>Geschlecht</b>	männlich	82,44 %	98,78 %
	weiblich	17,56 %	1,22 %

Die Betrachtung des Alters beider Patientengruppen ergab keine wesentlichen Unterschiede. Patienten mit einer perforierenden Verletzung des Auges waren im Durchschnitt 38 Jahre alt, Patienten mit einer Fremdkörperverletzung waren aufgerundet 37 Jahre alt.

### **5.2 Verletzungsentstehung und Fremdkörpermaterial**

Die Hälfte der Fremdkörperverletzungen entstand im Rahmen von Arbeiten mit dem Hammer oder bei Arbeiten mit dem Hammer und dem Meißel. Relativ häufig traten noch Fremdkörperverletzungen durch schnell laufende Maschinen auf. Andere Verletzungsursachen machen einen deutlich kleineren Anteil aus (Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Verletzungsursachen von Fremdkörperverletzungen

Aufgrund der Anamnese ist häufig schon eine Aussage zu dem Material des vermuteten Fremdkörpers möglich. Da in unserem Patientengut ein Großteil der Fremdkörper bei Arbeiten mit dem Hammer oder bei Arbeiten mit schnell laufenden Maschinen entstand, ist ein Großteil der Fremdkörper metallischen Ursprungs (88 %). Weit weniger häufig bestanden die Fremdkörper aus Glas (6 %). Fast neun von zehn der Fremdkörper waren somit der radiologischen Diagnostik zugänglich. Noch seltener als Glas kamen die in der Bildgebung oftmals schwierig nachweisbaren Materialien Holz und Stein vor. Beide Materialien waren jeweils einmal vertreten (je 1 %).

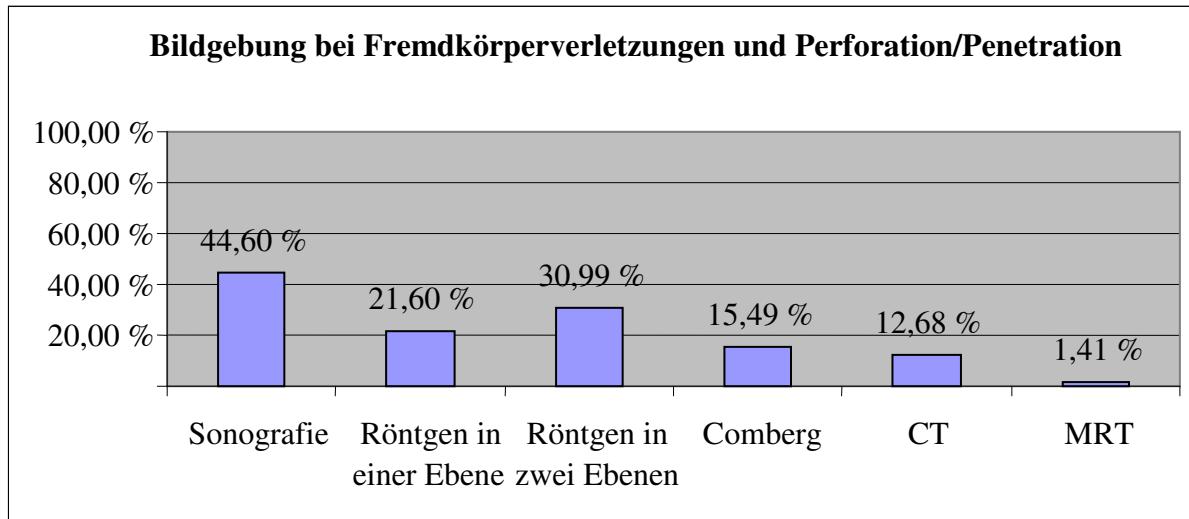
Anders als bei den Fremdkörperverletzungen gab es bei den perforierenden Verletzungen keine typische Entstehungsweise, so dass eine einfache Zuordnung in einzelne Kategorien kaum möglich war. Tabelle 5 zeigt die häufigsten Ursachen von perforierenden Verletzungen.

**Tabelle 5:** häufigste Ursachen der perforierenden Verletzungen

Unfallursache Perforation	Häufigkeit
Sturz	13,74 %
Arbeiten mit Draht	10,69 %
Hammer	8,40 %
Straßenverkehr	7,63 %
Gläser	6,87 %

### **5.3 Einsatz bildgebender Verfahren**

Wie oben festgestellt wurde, waren in 38,5 % der perforierenden Verletzungen Fremdkörper zu finden. An der Universitätsklinik Rostock kamen nach der klinischen Untersuchung verschiedene bildgebende Methoden zum Nachweis oder Ausschluss einer Fremdkörperverletzung zum Einsatz (Abbildung 6). Einen wesentlichen Bestandteil machte die Sonografie aus, die bei rund 45 % der Patienten angefordert wurde. Auch die konventionellen Übersichtsaufnahmen wurden an der Augenklinik Rostock häufig eingesetzt. Das Orbita Röntgen in zwei Ebenen wurde bei 31 % der Patienten angefordert, das Orbita Röntgen in einer Ebene bei 22 % der Patienten. 13 % der Patienten wurden computertomografisch untersucht. Damit ist die CT etwas weniger häufig verwendet worden, als das Verfahren nach Comberg. Den geringsten Anteil an der Fremdkörperdiagnostik bildet die MRT, welche bei insgesamt drei Patienten verwendet worden ist. Aufgrund der geringen Anzahl von magnetresonanztomografischen Untersuchungen in der vorliegenden Studie erfolgte keine weitere Analyse dieses bildgebenden Verfahrens.



**Abbildung 6:** Häufigkeiten der bildgebenden Modalitäten bei Perforationen und Fremdkörperverletzungen

### **5.4 Mehrfachuntersuchungen**

Im Rahmen einer Perforation, Penetration oder Fremdkörperverletzung war bei einigen Patienten der Einsatz mehrerer unterschiedlicher bildgebender Verfahren notwendig, was durch die nachstehende Tabelle 6 dargestellt wird.

**Tabelle 6:** Mehrfachuntersuchungen: in der vertikalen Ebene befinden sich die zusätzlich durchgeführten bildgebenden Untersuchungen

	Sonografie	Röntgen eine Ebene	Röntgen zwei Ebenen	Comberg	CT
<b>Sonografie</b>		40,00 %	59,09 %	81,82 %	59,26 %
<b>Röntgen eine Ebene</b>	18,95 %		1,52 %	15,15 %	7,41 %
<b>Röntgen zwei Ebenen</b>	41,05 %	2,22 %		33,33 %	22,22 %
<b>Comberg</b>	28,42 %	11,11 %	16,67 %		25,93 %
<b>CT</b>	16,84 %	4,44 %	9,09 %	21,21 %	

Die Tabelle verdeutlicht den notwendigen Einsatz zusätzlicher bildgebender Modalitäten zur Sonografie, welche als alleiniges Untersuchungsverfahren nicht ausreichend ist. Parallel zu der Sonografie wurden vorwiegend die konventionellen Röntgenmethoden eingesetzt, dies betrifft vor allem das Röntgen in zwei Ebenen. Vier von zehn Patienten, welche sonografisch untersucht wurden, erhielten zusätzlich eine radiologische Untersuchung der Orbita in zwei Ebenen. Des weiteren ist die Sonografie oftmals mit dem Röntgen nach Comberg kombiniert worden (28,42 %).

Das Röntgen in einer Ebene wurde eher als alleinige Modalität eingesetzt. Nur mit der Sonografie ist das Röntgen in einer Ebene häufig kombiniert worden. Andere bildgebende Methoden wurden eher selten zusätzlich durchgeführt.

Das Röntgen in zwei Ebenen wurde ebenfalls vorwiegend mit der Sonografie kombiniert. Aufgerundet 60 % der Patienten, die ein Röntgen in zwei Ebenen erhielten, wurden gleichzeitig sonografisch untersucht. Die anderen bildgebenden Verfahren wurden weit weniger häufig zusätzlich angefordert. Trotzdem wurde ein nicht unerheblicher Teil zusätzlich mit dem Verfahren nach Comberg geröntgt, wodurch scheinbar ein gewisses Interesse an der Lokalisation eines Fremdkörpers besteht (17 %).

Besondere Aufmerksamkeit soll der Comberg-Methode und der CT gelten. Gerade die Comberg-Methode ist zusätzlich zu anderen bildgebenden Modalitäten eingesetzt worden. Der größte Teil der Patienten, die eine Comberg-Untersuchung erhielten, wurde gleichzeitig sonografisch untersucht (81,82 %). Zusätzlich war bei circa einem Drittel der Patienten ein Röntgen in zwei Ebenen angefordert worden. Obwohl die Comberg-Methode eine exakte Lokalisation ermöglichen sollte, wurde bei aufgerundet jedem fünften Patienten zusätzlich eine CT notwendig.

Eine vorwiegende Kombination der CT mit anderen bildgebenden Untersuchungsverfahren ist nicht erfolgt. Die oben dargestellte Tabelle zeigt jedoch, dass häufig der Versuch einer sonografischen Fremdkörperdarstellung erfolgte. Ein Viertel der Patienten, die computertomografisch untersucht wurden, erhielten zuvor eine bildgebende Untersuchung durch das Comberg-Verfahren, was eine gewisse Unsicherheit der Comberg-Methode vermuten lässt.

Der mehrfache Einsatz der unterschiedlichen Modalitäten bedeutet aber auch, dass andere Patienten nicht bildgebend untersucht wurden. Dies war bei insgesamt 52 Patienten (24,41 %) mit einer Perforation, Penetration oder einer Fremdkörperverletzung der Fall. In der Gruppe der Patienten mit einer Fremdkörperverletzung wurden aufgerundet 90 % der Patienten bildgebend untersucht. Somit ist bei 10 % der Fremdkörperverletzungen keine Bildgebung erfolgt. Dies waren vor allem Patienten, deren Fremdkörper schon an der Spaltlampe sichtbar waren. Bei einem kleineren Teil der Patienten ist ein Fremdkörper zufällig während der Operation entdeckt worden.

In der Patientengruppe mit einer perforierenden oder penetrierenden Verletzung erhielten deutlich mehr Patienten keine bildgebende Diagnostik. Bei 32,1 % der Patienten wurde keine Bildgebung als notwendig erachtet.

## **5.5 Einsatz der bildgebenden Verfahren bei klinisch nachgewiesenen Fremdkörpern**

Die untenstehende Tabelle 7 unterteilt die Fremdkörperverletzungen nochmals in eine Gruppe, bei denen die Fremdkörper schon an der Spaltlampe sichtbar oder nicht sichtbar waren und zeigt in Abhängigkeit hiervon die folgende bildgebende Diagnostik. Insgesamt 35 Fremdkörper (42,68 %) waren schon bei der Untersuchung an der Spaltlampe nachweisbar, während 47 Fremdkörper (57,32 %) nicht auffindbar waren. Ersichtlich wird aus der Tabelle, dass Patienten fast doppelt so häufig eine Sonografie erhielten, wenn bei der Spaltlampenuntersuchung kein Fremdkörper sichtbar war. Grund hierfür könnten die schweren Begleitverletzungen des Bulbus sein, die es einem Untersucher unmöglich machen, einen Fremdkörper an der Spaltlampe zu entdecken, so dass die Untersuchung zwar der Fremdkörpersuche diente, aber ebenfalls die Begleitverletzungen beurteilt werden sollten. Es soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass die sonografischen Untersuchungen nur dann in die Arbeit einbezogen wurden, wenn erkenntlich war, dass die Untersuchung auch zur Fremdkörpersuche diente. Mittels Chi-Quadrat-Test nach Pearson konnte ein hoch signifikanter Einsatz der Sonografie bei an der Spaltlampe nicht sichtbarem Fremdkörper nachgewiesen werden ( $p < 0,001$ ).

Der Einsatz der Röntgenuntersuchung in einer oder zwei Ebenen ist unabhängig von der Sichtbarkeit des Fremdkörpers an der Spaltlampe, ein signifikanter Zusammenhang ließ sich in der retrospektiven Analyse nicht nachweisen. Einen Zusammenhang ergab jedoch die Untersuchung der Anwendung der Comberg-Methode und der CT bei nicht sichtbarem Fremdkörper. Es ließ sich ein hoch signifikanter Einsatz der Comberg-Methode bei Fremdkörpern nachweisen, welche nicht an der Spaltlampe nachweisbar waren ( $p < 0,001$ ). Die Comberg-Methode wurde bei nur 14 % der Patienten durchgeführt, wenn der Fremdkörper an der Spaltlampe sichtbar war. Dagegen wurde sie bei 53 % der Patienten mit nicht sichtbarem Fremdkörper eingesetzt.

Ähnliche Ergebnisse erbrachte die Analyse der Verwendung der CT zur Fremdkörperdarstellung. In nur einem Fall erhielt ein Patient mit einem Fremdkörper eine CT, obwohl dieser schon an der Spaltlampe nachgewiesen werden konnte. Dagegen erhielt fast ein Drittel der Patienten mit an der Spaltlampe nicht sichtbarem Fremdkörper eine CT, wodurch sich mit dem Exaktem Test nach Fischer ein sehr signifikanter Zusammenhang zwischen dem Einsatz der CT und nicht sichtbaren Fremdkörpern herstellen ließ ( $p < 0,01$ ). Es lässt sich also zusammenfassend sagen, dass die Sonografie, das Röntgen nach Comberg und die CT vor allem dann eingesetzt wurden, wenn der Fremdkörper an der Spaltlampe nicht sichtbar war.

Außerdem ist in der genannten Tabelle 7 ebenfalls die eingesetzte Diagnostik bei penetrierenden und perforierenden Verletzungen nochmals dargestellt, da in solchen Fällen kein Fremdkörper vorhanden war und damit an der Spaltlampe nicht sichtbar sein konnte. Interessanterweise sind bei perforierenden bzw. penetrierenden Verletzungen viel häufiger keine bildgebenden Verfahren eingesetzt worden, als bei Fremdkörperverletzungen. Bezuglich der Sonografie und dem Röntgen in zwei Ebenen war auffällig, dass diese Verfahren bei perforierenden/penetrierenden Verletzungen weit weniger häufig zum Einsatz kamen als bei Fremdkörperverletzungen, deren Fremdkörper nicht an der Spaltlampe darstellbar war. Zusätzlich wird der geringere Einsatz des Comberg-Verfahrens und der CT bei perforierenden Verletzungen gegenüber den Fremdkörperverletzungen nochmals verdeutlicht.

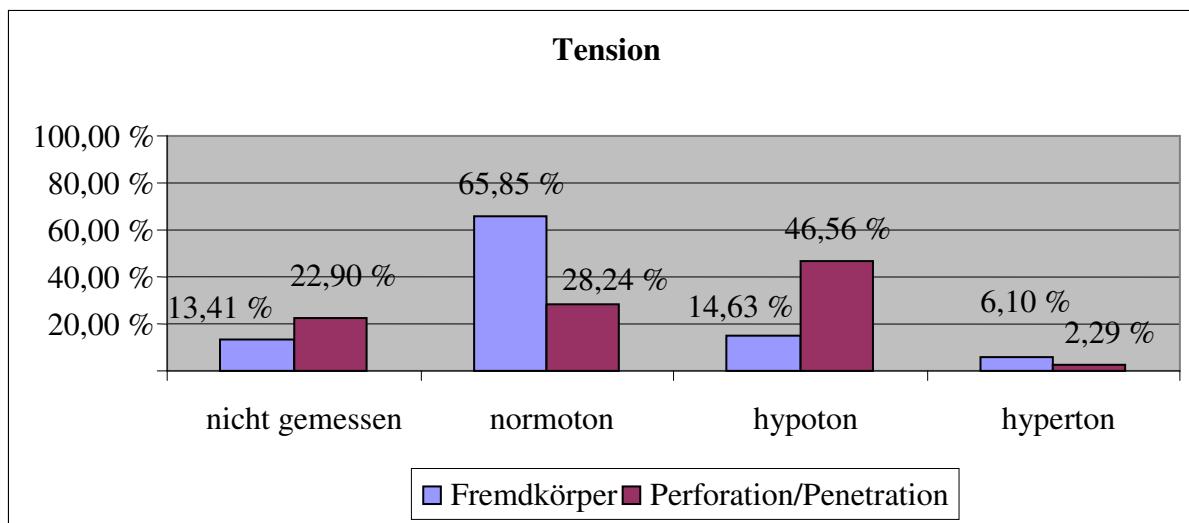
**Tabelle 7:** verwendete bildgebende Diagnostik bei sichtbarem oder nicht sichtbarem Fremdkörper an der Spaltlampe

Bildgebung	Fremdkörper			Penetration/Perforation
	sichtbar	nicht sichtbar	kein Fremdkörper	
<b>Sonografie</b>	34,29 %	72,43 %	37,40 %	
<b>Röntgen in einer Ebene</b>	20,00 %	14,89 %	23,66 %	
<b>Röntgen in zwei Ebenen</b>	28,57 %	40,43 %	27,48 %	
<b>Comberg</b>	14,29 %	53,19 %	2,29 %	
<b>CT</b>	2,86 %	31,91 %	8,40 %	
<b>keine Bildgebung</b>	25,71 %	2,13 %	41,22 %	

## 5.6 Bildgebung in Abhängigkeit von der Tension bei Aufnahme

Durch eine Fremdkörperverletzung wird die Sklera oder Hornhaut in der Art geschädigt, dass intraokuläre Strukturen nach außen treten können, ebenso Glaskörper oder Kammerwasser. Gleichermassen ist dies auch bei Perforationen und Penetrationen des Auges möglich. Ein Indiz für eine Perforation/Penetration oder Fremdkörperverletzung kann der in der Folge entstehende niedrige Augeninnendruck sein, auch wenn eine Verletzung im sichtbaren Bereich der Hornhaut oder der Sklera nicht erkennbar ist.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Tension bei Aufnahme werden in der nachstehenden Abbildung 7 aufgelistet. Ein Rückschluss auf eine perforierende Fremdkörperverletzung durch einen niedrigen Augeninnendruck scheint nicht möglich. Wie in der Abbildung erkenntlich ist, wurde bei einem Teil der Patienten der Augeninnendruck aus mangelnder Indikation bei zu starker Verletzung des Auges oder durch fehlende Kooperation seitens des Patienten nicht gemessen.



**Abbildung 7:** Augeninnendruck von Fremdkörperverletzungen und Perforation/Penetration bei Aufnahme

In der nachstehenden Tabelle 9 ist die Bildgebung in Abhängigkeit vom Augeninnendruck verzeichnet. Gerade die Sonografie ist sehr signifikant abhängig davon eingesetzt worden, ob eine Augeninnendruckmessung stattfand oder nicht ( $p < 0,01$ ). Patienten, die bei Aufnahme keine Messung des Augeninnendruckes erhalten hatten, wurden in 24 % der Fälle zur Fremdkörpersuche sonografiert. Dagegen erhielten Patienten mit einer Druckmessung durchschnittlich in 49 % der Fälle eine Sonografie zur Fremdkörpersuche.

Gleichzeitig ließ sich ein signifikanter Zusammenhang des Einsatzes der Sonografie zur Fremdkörpersuche bei Patienten mit normotonem Bulbus nachweisen ( $p < 0,05$ ). Es zeigte sich, dass die Hälfte der Patienten mit einem normotonen Bulbus mit der Zielsetzung der Fremdkörpersuche sonografiert wurden. Patienten, deren Tension nicht gemessen wurde, oder deren Augeninnendruck nicht normwertig waren, erhielten durchschnittlich in 39 % der Fälle eine Sonografie.

Auffällige Werte ergaben sich weiterhin für die Comberg-Methode. 27 % der Patienten mit normotonem Bulbus erhielten eine Aufnahme nach Comberg. Bei einem nicht normotonem Bulbus kam die Comberg-Methode weit weniger häufig zum Einsatz (7 %), weswegen sich ein hoch signifikanter Zusammenhang zwischen dem Einsatz des Comberg-Verfahrens und einem normotonem Bulbus nachweisen lies ( $p < 0,001$ ).

Auch bei einem hypotonem Bulbus ist die Sonografie relativ häufig eingesetzt worden. Bei einem Teil der Patienten geschah dies vor der primären Wundversorgung trotz des notwendigen Kontaktes zwischen Ultraschallkopf und dem verletzten Auge. Insgesamt wurde die Sonografie bei 42 % der Patienten mit hypotonem Bulbus angewandt. Die Comberg-Methode ist mit 7 % am wenigsten bei Patienten mit hypotonem Bulbus eingesetzt worden.

Die bildgebenden Verfahren, die keinen Kontakt mit dem Bulbus erfordern, wurden unabhängig vom Augeninnendruck eingesetzt. Gerade bei hypotonen Augeninnendruckwerten, bei denen eine Perforation oder eine Fremdkörperverletzung zu vermuten war, sind keine bildgebenden Verfahren besonders häufig eingesetzt worden. Gleichermaßen gilt für Patienten, deren Tension gar nicht gemessen wurde.

**Tabelle 9:** apparative Bildgebung in Abhängigkeit vom Augeninnendruck

Diagnostik	nicht gemessen	normoton	hypoton	hyperton
<b>Sonografie</b>	24,39 %	52,75 %	42,47 %	75,00 %
<b>Röntgen in einer Ebene</b>	21,95 %	18,68 %	23,29 %	25,00 %
<b>Röntgen in zwei Ebenen</b>	17,07 %	32,97 %	34,25 %	37,50 %
<b>Comberg</b>	7,32 %	26,37 %	6,85 %	12,50 %
<b>CT</b>	12,20 %	12,09 %	13,70 %	12,50 %

### 5.7 Einsatz bildgebender Verfahren bei Begleitverletzungen

Durch die Gewalteinwirkung von Außen entstehen bei Perforationen mit und ohne Fremdkörper Begleitverletzungen, die zum einen ein Indiz für eine Fremdkörperverletzung sein können. Zum anderen können Begleitverletzungen wie eine Vorderkammer- oder eine Glaskörpereinblutung einen Einblick in den Augenhintergrund verhindern. Tabelle 10 gibt die Häufigkeit von bestimmten Verletzungen bei Penetration, Perforationen und Fremdkörperverletzungen wieder. Annähernd gleich häufig traten Verletzungen der Augenlider und der Hornhaut sowie Vorderkammereinblutungen auf. Auffallend war die weniger häufig auftretende Verletzung der Sklera bei Fremdkörperverletzungen, die hier bei jedem Dritten Patienten zu verzeichnen war. Eine Läsion der Linse trat bei 48 % der Patienten mit Fremdkörper auf, ungefähr 20 % mehr als bei perforierenden Verletzungen. Auch eine Glaskörperblutung trat bei Verletzungen mit Fremdkörpern mit 44 % ungefähr doppelt so häufig auf wie bei den Perforationen bzw. Penetrationen. Es soll ebenfalls auf die häufiger aufgetretene Verletzung der Netzhaut hingewiesen werden, die bei den Fremdkörperverletzungen bei 45 % der Patienten vorhanden war und damit gegenüber den perforierenden/penetrierenden Verletzungen mehr als doppelt so häufig vorkam.

**Tabelle 10:** Begleitverletzungen von Patienten mit Perforation, Penetration oder Fremdkörpern

Begleitverletzung	Penetration/Perforation	Fremdkörperverletzung
<b>Oberlid</b>	20,61 %	15,29 %
<b>Unterlid</b>	8,40 %	11,76 %
<b>Hornhaut</b>	78,63 %	69,41 %
<b>Sklera</b>	55,73 %	34,12 %
<b>Vorderkammer-einblutung</b>	32,80 %	20,00 %
<b>Iris</b>	42,40 %	36,47 %
<b>Linse</b>	29,01 %	48,24 %
<b>Glaskörperblutung</b>	20,61 %	43,53 %
<b>Netzhaut</b>	16,03 %	44,71 %

Die folgende Tabelle 11 zeigt, wie häufig bildgebende Verfahren im Zusammenhang mit einer Fremdkörpersuche bei bestimmten Verletzungen zum Einsatz kamen. Dabei sticht hervor, dass Verletzungen der Augenlider vor allem sonografisch untersucht wurden. Ein signifikanter Zusammenhang ließ sich jedoch nicht herstellen.

Gleichzeitig fiel die häufige computertomografische Untersuchung im Rahmen einer Verletzung der Oberlider auf. Hierfür konnte ein sehr signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden ( $p < 0,01$ ). Verletzungen der Unterlider wurden hingegen weit weniger häufig computertomografisch untersucht. Ein signifikanter Zusammenhang ließ sich für die CT bei Unterlidverletzungen nicht nachweisen.

Im Rahmen einer Verletzung der Hornhaut oder der Sklera wurden die bildgebenden Untersuchungen annähernd gleich häufig eingesetzt, was aufgrund der Aufnahmekriterien in diese Studie zu erwarten war. Weshalb die Sonografie bei Verletzungen der Hornhaut häufiger angewendet wurde, lässt sich retrospektiv nicht beurteilen, allerdings ergab sich hierfür auch kein signifikanter Zusammenhang.

Gerade bei dem Nachweis von Linsenverletzungen schien eine bildgebende Diagnostik notwendig, da nur bei 10 % der Patienten darauf verzichtet wurde. Außerdem konnte ein signifikanter Zusammenhang ( $p < 0,05$ ) zwischen dem Einsatz der Sonografie und Linsenverletzungen nachgewiesen werden. Die Sonografie wurde hier bei 54 % der Verletzungen durchgeführt.

Die konventionellen Röntgenmethoden wurden ebenfalls bei vorliegenden Verletzungen der Linse relativ häufig eingesetzt, wobei kein signifikanter Zusammenhang besteht. Das Röntgen in einer Ebene wurde bei 26 % der Patienten angefordert. Bei keiner anderen Verletzung kam das Röntgen in einer Ebene häufiger zum Einsatz. Zusätzlich wurden 35 % der Patienten mit einer Linsenverletzung in zwei Ebenen geröntgt. Nur bei Verletzungen der Netzhaut wurde häufiger in zwei Ebenen geröntgt. Die Comberg-Methode wurde noch bei 19 % der Patienten eingesetzt.

Bildgebende Verfahren waren im Rahmen der Verletzungen des hinteren Augenabschnittes von wesentlicher Bedeutung, was durch die nachstehende Tabelle 11 verdeutlicht wird. Ungefähr jeder zweite Patient mit einer Glaskörperblutung oder einer Netzhautverletzung wurde sonografiert. Fast bei jedem dritten Patienten wurde ein Röntgen in zwei Ebenen angefertigt. Die Läsion der Netzhaut ist die Verletzung, bei der das Röntgen in zwei Ebenen am häufigsten eingesetzt wurde. Auffallend war ebenfalls die überwiegende Verwendung der Comberg-Methode bei Glaskörperblutungen und Netzhautverletzungen, wobei sich im Rahmen dieser beiden Verletzungen ein signifikanter Zusammenhang zum Einsatz der Comberg-Methode nachweisen ließ. Der ermittelte p-Wert mit dem Chi-Quadrat-Test nach Pearson lag für beide Verletzungen unter 0,01 und zeigt einen sehr signifikanten Zusammenhang. Lediglich 19 % der Patienten mit Glaskörperblutung und 22 % der Patienten mit Netzhautverletzungen erhielten keine Bildgebung.

**Tabelle 11:** Häufigkeiten der Diagnostik in Abhängigkeit von Begleitverletzungen

Verletzung	Sonografie	Röntgen in einer Ebene	Röntgen in zwei Ebenen	Comberg	CT
<b>Oberlid</b>	34,21 %	13,16 %	26,32 %	7,89 %	26,32 %
<b>Unterlid</b>	40,00 %	20,00 %	25,00 %	15,00 %	15,00 %
<b>Hornhaut</b>	48,15 %	23,46 %	30,86 %	14,81 %	13,58 %
<b>Sklera</b>	33,66 %	15,84 %	31,68 %	8,91 %	15,84 %
<b>Vorderkammer- einblutung</b>	48,28 %	27,59 %	29,31 %	15,52 %	10,34 %
<b>Iris</b>	51,19 %	22,62 %	25,00 %	20,24 %	15,48 %
<b>Linse</b>	53,93 %	25,84 %	34,83 %	19,10 %	13,48 %
<b>Glaskörper- blutung</b>	53,97 %	19,05 %	33,33 %	26,98 %	15,87 %
<b>Netzhaut</b>	46,55 %	17,24 %	36,21 %	27,59 %	15,52 %

## **5.8 bildgebende Diagnostik in Abhängigkeit von der Fremdkörperlokalisierung**

Der größte Teil der Fremdkörper war in unserer Studie im hinteren Augenabschnitt lokalisiert (59 %). Im vorderen Augenabschnitt lagen insgesamt 24 % der Fremdkörper. Eine extrabulbäre Lokalisation war bei insgesamt 13 % der Patienten zu verzeichnen.

Betrachtet man die einzelnen Augenstrukturen im Detail, so ist auffällig, dass ein Großteil der Fremdkörper im Bereich von empfindlichen Strukturen des Auges lokalisiert war. Fast 20 % der Fremdkörper waren intraoperativ in der Netzhaut nachweisbar. Weitere 16 % der Fremdkörper lagen präretinal.

Die häufigste Lokalisation von Fremdkörpern des vorderen Augenabschnittes ist die Vorderkammer. Hier sind ungefähr ein Fünftel aller Fremdkörper lokalisiert. Bei einem Patienten durchdrang der Fremdkörper den ganzen Bulbus. Dieser wird in der Tabelle extra angeführt. Die genaue Häufigkeitsverteilung der Lokalisationen der Fremdkörper ist der nachstehenden Tabelle 12 zu entnehmen.

**Tabelle 12:** Lage der Fremdkörper

<b>Lage</b>	<b>Anzahl</b>	<b>Prozent</b>
<b>Hornhaut</b>	11	13,41 %
<b>Vorderkammer</b>	16	19,51 %
<b>Iris</b>	7	8,54 %
<b>Linse</b>	9	10,98 %
<b>Ziliarkörper</b>	1	1,22 %
<b>vorderer Glaskörper</b>	8	9,76 %
<b>mittlerer Glaskörper</b>	4	4,88 %
<b>hinterer Glaskörper</b>	7	8,54 %
<b>Netzhaut</b>	16	19,51 %
<b>präretinal</b>	13	15,85 %
<b>Sklera</b>	9	10,98 %
<b>gesamter Bulbus</b>	1	1,22 %
<b>extrabulbär</b>	11	13,41 %
<b>Fremdkörper gesamt</b>	82	

### **5.8.1 Fremdkörper im vorderen Augenabschnitt**

Die im vorderen Augenabschnitt befindlichen Fremdkörper waren häufig schon in der Untersuchung an der Spaltlampe sichtbar. Zur weiteren bildgebenden Diagnostik dienten bei diesen Fremdkörpern die Sonografie und das Röntgen in zwei Ebenen. 39 % der Patienten mit einem Fremdkörper im vorderen Augenabschnitt wurden sonografisch untersucht. Das Röntgen in zwei Ebenen wurde bei weiteren 30 % der Patienten angewendet. Der Einsatz der Lokalisationsmethoden, wie das Röntgen nach Comberg oder die CT, bei Fremdkörpern im vorderen Augenabschnitt ist zu vernachlässigen.

### **5.8.2 Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt**

Da gerade Fremdkörper aus dem hinteren Augenabschnitt mittels Vitrektomie entfernt werden, ist eine Betrachtung der angewandten bildgebenden Diagnostik von in diesem Abschnitt lokalisierten Fremdkörpern notwendig. Die Sonografie macht den Hauptteil der bildgebenden Diagnostik aus. Zwei Drittel der Patienten mit im hinteren Augenabschnitt lokalisierten Fremdkörpern sind sonografisch untersucht worden. Die Berechnung mittels Chi-Quadrat-Test nach Pearson ergab einen sehr signifikant Einsatz der Sonografie bei im hinteren Augenabschnitt gelegenen Fremdkörpern ( $p < 0,01$ ).

Weiterhin fiel ein gezielter Einsatz der Lokalisationsmethode nach Comberg auf, wenn Fremdkörper in diesem Augenabschnitt lagen. Im Vergleich zu anderen Lokalisationsmöglichkeiten von Fremdkörpern, ist das Comberg-Verfahren am häufigsten bei Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt verwendet worden. Etwas weniger als die Hälfte der Patienten wurde mit dieser Methode geröntgt. War der Fremdkörper dagegen nicht im hinteren Augenabschnitt lokalisiert, ist das Comberg-Verfahren bei nur 15 % der Patienten eingesetzt worden. Dies zeigt einen gezielten Einsatz der Comberg-Methode, wenn ein Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt vermutet wird. Die Berechnungen mittels Chi-Quadrat-Test nach Pearson ergaben hierfür einen sehr signifikanten Zusammenhang ( $p < 0,01$ ). Dass die Comberg-Methode gezielt zur Lokalisation von Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt verwendet wurde, zeigt auch die zuvor eingesetzte Diagnostik. Alle Patienten, deren Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt lokalisiert waren und gleichzeitig ein Röntgen nach Comberg erhielten (24 Patienten), bekamen zuvor immer eine andere bildgebende Diagnostik. In dieser bestand der Verdacht, dass der Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt gelegen sein könnte. 87 % der Patienten, bei denen eine Comberg-Untersuchung durchgeführt wurde, erhielten eine Sonografie, 13 % ein Röntgen in einer Ebene und 39 % erhielten ein Röntgen der Orbita in zwei Ebenen.

Das Röntgen in zwei Ebenen kam bei Patienten mit im hinteren Augenabschnitt gelegenen Fremdkörpern relativ häufig zum Einsatz. Rund 40% dieser Patienten wurden durch diese Bildgebung untersucht. Allerdings konnte hierfür kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden, da diese Methode auch bei anderen Lokalisationen relativ häufig eingesetzt wurde.

Eine computertomografische Untersuchung von Fremdkörpern, die intraokular aufzufinden waren, ist in der Regel als nicht notwendig erachtet worden. Die CT wurde sowohl bei Fremdkörpern im vorderen, wie auch bei Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt relativ selten durchgeführt.

### **5.8.3 extrabulbäre Fremdkörper**

Bei dieser Gruppe wurde zur bildgebenden Darstellung bzw. Lokalisation die Computertomografie bei rund 55 % der Patienten bevorzugt eingesetzt, es besteht ein höchst signifikanter Zusammenhang zwischen dem Einsatz der CT und der Lokalisation eines extrabulbär gelegenen Fremdkörpers ( $p < 0,001$ ).

Bei der Hälfte der Patienten mit einem extrabulbären Fremdkörper-Verdacht, bei denen eine CT durchgeführt wurde, war zuvor eine Sonografie und bei jeweils einem Drittel der Patienten ein Röntgen in zwei Ebenen und die Comberg-Methode zum Einsatz gekommen. Die Comberg-Methode wurde bei insgesamt 36 % der Patienten angewandt. Allerdings war das Comberg-Verfahren bei der extrabulbären Fremdkörperlokalisierung offensichtlich oftmals unzureichend, da bei 50 % dieser Patienten zusätzlich eine CT notwendig wurde.

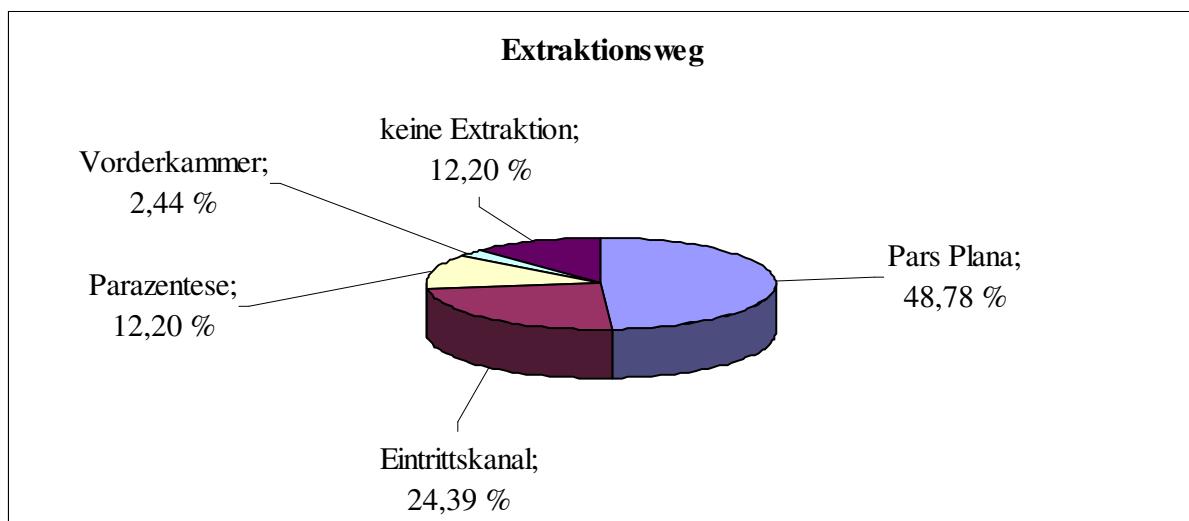
Ebenso häufig wie die Comberg-Methode wurde das Röntgen in zwei Ebenen eingesetzt. Bei 50 % der Patienten, die ein Röntgen in zwei Ebenen erhielten und deren Fremdkörper extrabulbär lag, wurde ebenfalls zusätzlich eine CT zur ergänzenden Lokalisations-Diagnostik eingesetzt. 25 % dieser Patienten erhielten zusätzlich eine Untersuchung mittels Comberg-Verfahren.

**Tabelle 13:** eingesetzte Bildgebung in Abhängigkeit von der Lage der Fremdkörper

Diagnostik	vorderer Augenabschnitt	hinterer Augenabschnitt	extrabulbär
Sonografie	39,13 %	66,67%	27,27%
Röntgen in einer Ebene	21,74%	11,76%	18,18%
Röntgen in zwei Ebenen	30,43%	41,18%	36,36%
Comberg	4,35%	45,10%	36,36%
CT	13,04%	13,73%	54,55%

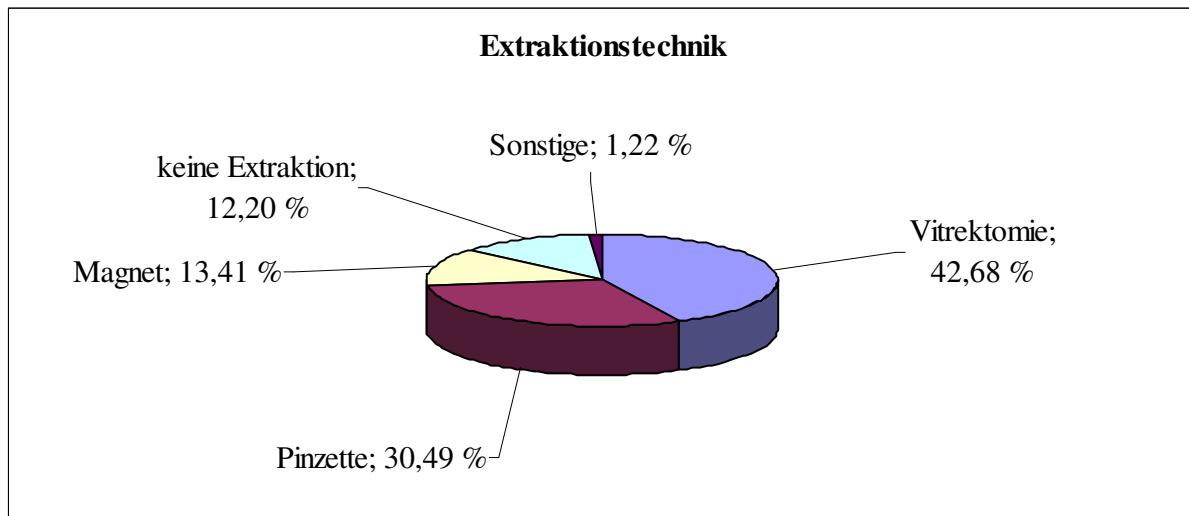
## 5.9 Extraktionsweg und Operationstechnik

Für die zu entfernenden Fremdkörper wurden unterschiedliche Extraktionsmethoden verwendet. Bei einem Großteil wurde der Fremdkörper über die Pars Plana entfernt (49 %). Bei weiteren 24 % der Patienten war der Fremdkörper so günstig lokalisiert, dass dieser durch den Eintrittskanal entfernt werden konnte. Andere Fremdkörper hingegen waren über eine Parazentese am Limbus als Zugangsweg für im vorderen Augenabschnitt lokalisierte Fremdkörper extrahiert worden (12 %). Fremdkörper, die für die Parazentese oder die Sklerotomie zu groß waren, wurden über einen Schnitt in der peripheren Hornhaut über die Vorderkammer entnommen (2 %). Da einige der Fremdkörper in ihrer Lokalisation keine Probleme verursachten, konnten diese belassen werden, gerade unter Berücksichtigung der möglichen Komplikationen einer Operation (12 %).



**Abbildung 8:** Extraktionswege der Fremdkörper

Die nachstehende Abbildung 9 bildet die Häufigkeiten der angewandten Extraktionstechnik ab. Es wird der große Anteil der Vitrektomie als Operationstechnik zur Entfernung der Fremdkörper deutlich. Trotzdem wurde ein großer Teil der Fremdkörper über eine Pinzette oder über einen extraokularen Magneten extrahiert, da der Fremdkörper günstig lokalisiert war. Als „Sonstige“ wird ein Fremdkörper dargestellt, welcher in der Linse lokalisiert und von so geringer Größe war, dass er bei der Lensektomie mit abgesaugt wurde.



**Abbildung 9:** Extraktionstechniken der Fremdkörper

Welche bildgebenden Verfahren bei den verschiedenen Extraktionsverfahren genutzt wurden, zeigt die nachstehende Tabelle 14.

**Tabelle 14:** eingesetzte Bildgebung in Abhängigkeit von der Extraktionstechnik

Diagnostik	Magnet	Vitrektomie	direkt chirurgisch	keine Entfernung
<b>Sonografie</b>	54,55 %	82,86 %	28,00 %	30,00 %
<b>Röntgen in einer Ebene</b>	9,09 %	14,29 %	32,00 %	10,00 %
<b>Röntgen in zwei Ebenen</b>	36,36 %	40,00 %	28,00 %	40,00 %
<b>Comberg</b>	45,45 %	57,14 %	8,00 %	30,00 %
<b>CT</b>	9,09 %	16,67 %	12,00 %	60,00 %

Betrachtet man die Sonografie bei den verschiedenen eingesetzten Extraktionsmethoden, so fällt ein häufiger Einsatz der Sonografie bei vitrektomierten Patienten auf. Acht von zehn Patienten mit einem Fremdkörper, der durch die Pars Plana Vitrektomie extrahiert wurde, erhielten eine Sonografie zur Fremdkörperdarstellung. Über die Hälfte der Patienten, deren Fremdkörper durch einen Magneten extrahiert wurde, wurden ebenfalls sonografiert. Ein signifikanter Unterschied des Einsatzes der Sonografie bei Entfernung über die Pars Plana Vitrektomie und der Extraktion durch den Magneten ergab sich nicht. Vergleicht man hingegen die Gruppe der Pars Plana Vitrektomie und allen restlichen Gruppen, also deren Fremdkörper über andere Zugangswege entfernt oder sogar belassen wurden, so ergab sich ein signifikanter Einsatz der Sonografie bei der Pars Plana Vitrektomie ( $p < 0,01$ ). Grund hierfür war der weit weniger häufige Einsatz des Ultraschalls bei Patienten, deren Fremdkörper direkt chirurgisch oder gar nicht extrahiert wurde.

Das Röntgen in einer und zwei Ebenen wurde eher universell eingesetzt. Eine Bevorzugung bei bestimmten Extraktionsmethoden ließ sich nicht nachweisen.

In der retrospektiven Analyse fiel die häufige Verwendung der Comberg-Methode vor allem bei Patienten auf, deren Fremdkörper durch einen Magneten oder eine Vitrektomie extrahiert wurde. Die Comberg-Aufnahme wurde bei fast jedem zweiten Patienten angewandt, deren Fremdkörper durch den Magneten entfernt wurde. Durchschnittlich bei sechs von zehn Patienten wurde diese Methode eingesetzt, wenn der Fremdkörper durch eine Vitrektomie extrahiert wurde. Ein signifikanter Unterschied bezüglich der Verwendung der Comberg-Methode bei den beiden genannten Extraktionsmethoden ergab sich dadurch nicht. Bei der direkten chirurgischen Fremdkörperentfernung wurde dagegen die Comberg-Methode vernachlässigt, so dass sich in der retrospektiven Analyse für den Einsatz des Röntgen nach Comberg ein sehr signifikanter Zusammenhang zur Vitrektomie herstellen ließ ( $p < 0,01$ ).

Insgesamt erhielten 35 Patienten eine Entfernung des Fremdkörpers durch eine Vitrektomie. 20 dieser Patienten wurden durch Comberg-Aufnahmen bildgebend untersucht. Von diesen 20 Patienten erhielt jeder Patient bis auf einen eine zusätzliche bildgebende Diagnostik durch eine Sonografie oder ein Röntgen in ein oder zwei Ebenen. Drei Patienten erhielten zusätzlich eine CT.

Von den 15 Patienten, welche keine Comberg-Aufnahmen benötigten, deren Fremdkörper aber durch eine Vitrektomie entfernt wurde, erhielten 12 Patienten ebenfalls mindestens eine bildgebende Diagnostik. Bei zwei Patienten wurde ohne weitere Diagnostik eine CT angefordert. Insgesamt drei Patienten erhielten keine Bildgebung, wobei ein Teil der Fremdkörper zufällig während der Operation entdeckt wurde.

Aber nicht nur bei der Vitrektomie ließ sich retrospektiv ein signifikanter Zusammenhang zwischen einem bildgebenden Verfahren und einer Extraktionsmethode nachweisen. So wurde die CT überdurchschnittlich oft bei Patienten eingesetzt, deren Fremdkörper in der Orbita belassen wurde. Insgesamt bei 60 % dieser Patienten fand die CT Verwendung. Bei allen anderen Extraktionsarten wurde diese Methode der Fremdkörperdarstellung weit weniger häufig eingesetzt, so dass sich ein sehr signifikanter Zusammenhang zwischen belassenen Fremdkörpern und dem Einsatz der CT nachweisen ließ ( $p < 0,01$ ).

40 % der Patienten, deren Fremdkörper belassen werden konnte, wurden nicht computertomografisch untersucht. Stattdessen war in anderen bildgebenden Untersuchungen eine eindeutig extrabulbäre Lage des Fremdkörpers beschrieben worden. Oftmals erhielten diese Patienten aufgrund der Begleitverletzungen eine Pars Plana Vitrektomie, in der dann Austrittswunden nachgewiesen werden konnten. Damit konnte dann die zuvor in der radiologisch bildgebenden Diagnostik als extrabulbär beschriebene Lage bestätigt werden. Ein Patient mit belassenem Fremdkörper erhielt keine bildgebende Diagnostik, da der Fremdkörper schon in der Spaltlampe in der Vorderkammer lokalisiert werden konnte und die Verletzung schon einige Zeit zurück lag.

## **5.10 Sensitivität und Spezifität der einzelnen Verfahren**

### **5.10.1 Sonografie**

Insgesamt 95 Patienten wurden im Rahmen einer vermuteten Fremdkörperverletzung mit dem Ziel einer Fremdkörperdarstellung sonografisch untersucht. Ungefähr jeder dritte Patient verletzte sich während der Arbeit mit dem Hammer oder dem Hammer und dem Meißel. Knapp 13% der Patienten erlitt die Verletzung bei Arbeiten mit schnell laufenden Maschinen, so dass bei einem großen Teil der Patienten die Anamnese auf einen metallischen Fremdkörper hindeutete.

Die Darstellung eines Fremdkörpers in der Sonografie gelang bei 34 von 44 Fremdkörpern. Ein korrekt dargestellter Fremdkörper bestand aus Glas, alle anderen richtig dargestellten Fremdkörper waren metallischen Ursprungs. Nur ein Fremdkörper war im vorderen Augenabschnitt lokalisiert, ein weiterer lag extrabulbär. Die restlichen dargestellten Fremdkörper waren im hinteren Augenabschnitt zu finden.

Zusätzlich zu den 34 richtig dargestellten Fremdkörpern wurde bei vier Patienten eine Struktur im Auge sichtbar, die als Fremdkörper falsch interpretiert wurde (falsch positive Ergebnisse).

57 sonografische Untersuchungen des Auges mit der Zielsetzung der Fremdkörperdarstellung konnten keinen Fremdkörper darstellen. Von diesen 57 Untersuchungen zeigte die Sonografie in 47 Fällen korrekt keinen Fremdkörper (richtig negativ). Damit gelang bei zusammengenommen zehn Patienten kein Nachweis eines vorhandenen Fremdkörpers (falsch negative Ergebnisse). Die nicht dargestellten Fremdkörper bestanden zum größten Teil aus Metall. Der kleinere Teil der Fremdkörper bestand aus Glas, Stein oder wurde der Gruppe Sonstig zugeordnet. Die nicht nachgewiesenen Fremdkörper waren nicht nur extrabulbar lokalisiert, ein großer Teil war auch schon im vorderen Augenabschnitt zu finden, was eine Unsicherheit in der Fremdkörperdarstellung durch die Sonografie bedeutet.

Bei acht der zehn Patienten mit falsch negativen sonografischen Ergebnissen wurde zusätzlich ein anderes bildgebendes Verfahren angewandt, wodurch schließlich sieben Fremdkörper entdeckt wurden. Zwei Patienten mit falsch negativem Ergebnis wurden keiner weiteren radiologischen Diagnostik unterzogen, da der Fremdkörper schon an der Spaltlampe sichtbar war.

Die errechneten Werte für die Fremdkörperprävalenz, Sensitivität, Spezifität, sowie den positiven und negativen Vorhersagewert sind der untenstehenden Tabelle 15 zu entnehmen.

**Tabelle 15:** Gütekriterien für die Sonografie

Fremdkörper		
Sonografie	vorhanden	nicht vorhanden
<b>FK positiv</b>	34 (a)	4 (b)
<b>FK negativ</b>	10 (c)	47 (d)
Prävalenz = 46,32 %		
Sensitivität = 0,77 (KI 0,62 – 0,88)		
Spezifität = 0,92 (KI 0,80 – 0,97)		
positiver Vorhersagewert = 0,89		
negativer Vorhersagewert = 0,82		

### 5.10.2 Orbita Röntgen in einer Ebene

Das Röntgen in einer Ebene erfolgte bei 46 Patienten zum Fremdkörpernachweis bzw. Fremdkörperausschluss. Ungefähr ein Viertel der Patienten, die mit der genannten Modalität untersucht wurden, verletzten sich beim Arbeiten mit dem Hammer. Damit lag eine Verletzung mit einem möglichen metallischen Fremdkörper vor. Die retrospektive Analyse

der Anamnese lieferte sonst keinen speziellen Anhalt für einen metallischen Fremdkörper, das Röntgen in einer Ebene ist eher unabhängig von der Anamnese eingesetzt worden.

Im Orbita Röntgen in einer Ebene waren sechs von acht Fremdkörpern korrekt darstellbar. Bei zwei Patienten gab es radiologisch keinen Anhalt für einen Fremdkörper, obwohl einer vorhanden war (falsch negativ). Diese bestanden aus Stein und Glas und waren in der Vorderkammer und extrabulbär lokalisiert.

Es wurde kein Fremdkörper dargestellt, der keiner war. Damit gab es keine falsch positiven Ergebnisse. Insgesamt 38 Untersuchungen mittels Röntgen in einer Ebene waren korrekt negativ. Die errechneten Werte werden in der nachstehenden Tabelle 16 dargestellt.

**Tabelle 16:** Gütekriterien für das Röntgen in einer Ebene

Fremdkörper		
Röntgen in einer Ebene	vorhanden	nicht vorhanden
<b>FK positiv</b>	6 (a)	0 (b)
<b>FK negativ</b>	2 (c)	38 (d)
Prävalenz = 17,39 %		
Sensitivität = 0,75 (KI 0,36 – 0,95)		
Spezifität = 1,0 (KI 0,89 – 1,0)		
positiver Vorhersagewert = 1,0		
negativer Vorhersagewert = 0,95		

### 5.10.3 Orbita Röntgen in zwei Ebenen

Mit der Zielstellung eines Fremdkörpernachweises wurde das Röntgen der Orbita in zwei Ebenen bei 65 Patienten durchgeführt. Fast die Hälfte der Patienten hatte anamnestisch die Verletzung während der Arbeit mit dem Hammer, Hammer und Meißel oder schnell laufenden Maschinen, wodurch sich der Verdacht auf einen metallischen Fremdkörper ergab. Durch das Röntgen der Orbita in zwei Ebenen konnten 23 Fremdkörper von 26 Fremdkörpern korrekt nachgewiesen werden. Alle dargestellten Fremdkörper waren metallischer Herkunft. Auch in dieser bildgebenden Modalität ergaben sich keine falsch positiven Ergebnisse, d. h. jeder dargestellte Fremdkörper war tatsächlich auch ein Fremdkörper.

In 42 Untersuchungen konnte kein Fremdkörper nachgewiesen werden. Bei 39 Patienten war dieses Ergebnis korrekt. Daraus ergeben sich drei falsch negative Untersuchungen, in denen ein vorhandener Fremdkörper nicht korrekt diagnostiziert wurde. Einer der unentdeckten

Fremdkörper bestand aus Glas konnte damit der Untersuchung nicht zugänglich sein. Der genannte Fremdkörper war präretinal zu finden.

Ein weiterer Fremdkörper war sehr klein, metallischen Ursprungs und in der Linse lokalisiert. Damit gelingt selbst bei metallischen Fremdkörpern die Darstellung durch das Röntgen der Orbita in zwei Ebenen nicht mit letzter Sicherheit.

Der dritte unentdeckte Fremdkörper war der Gruppe Sonstige zugeordnet worden und lag in der Linse, sowie im vorderen Glaskörper.

Aus diesen Werten kann für das Orbita Röntgen in zwei Ebenen eine Fremdkörperprävalenz von 40 % errechnet werden. Dies zeigt, dass das Röntgen in zwei Ebenen schon gezielter in der Fremdkörpersuche eingesetzt wurde, als das Röntgen der Orbita in einer Ebene. Die Sensitivität war aufgrund der nicht dargestellten Fremdkörper nur etwas höher als im Vergleich zur Röntgenuntersuchung in einer Ebene.

**Tabelle 17:** Gütekriterien für das Röntgen in zwei Ebenen

Fremdkörper		
Röntgen in zwei Ebenen	vorhanden	nicht vorhanden
<b>FK positiv</b>	23 (a)	0 (b)
<b>FK negativ</b>	3 (c)	39 (d)
Prävalenz = 40,00 %		
Sensitivität = 0,88 (KI 0,69 – 0,97)		
Spezifität = 1,0 (KI 0,89 – 1,0)		
positiver Vorhersagewert = 1,0		
negativer Vorhersagewert = 0,93		

#### 5.10.4 Comberg-Aufnahme

Die Comberg-Spezialaufnahme wurde bei 33 Patienten zur Lokalisation eines Fremdkörpers durchgeführt. Insgesamt 72 % der Patienten, die durch dieses Verfahren bildgebend untersucht wurden, verletzten sich während der Arbeit mit Hammer oder mit dem Hammer und dem Meißel.

Insgesamt 30 Fremdkörper konnten korrekt nachgewiesen werden. Alle dargestellten Fremdkörper bestanden aus Metall. Wie schon in den anderen konventionellen Röntgenmethoden ergaben sich auch bei der Comberg-Aufnahme keine falsch positiven Ergebnisse.

Weitere drei Patienten erhielten eine Comberg-Aufnahme, in der kein Fremdkörper nachgewiesen werden konnte. Diese Patienten hatten tatsächlich keinen Fremdkörper, so dass sich keine falsch negativen Ergebnisse ergaben.

Da bei 33 durchgeführten Aufnahmen 30 Fremdkörper vorhanden waren, ergibt sich eine Fremdkörperprävalenz von 91 %. Diese hohe Prävalenz resultiert durch die häufige Kombination mit anderen bildgebenden Verfahren. Zusätzlich gab es weder falsch positive, noch falsch negative Ergebnisse. Dadurch ergaben sich für Sensitivität und Spezifität die sehr hohen Werte von 1,0.

**Tabelle 18:** Gütekriterien für die Comberg-Aufnahme

Fremdkörper		
Comberg Aufnahme	vorhanden	nicht vorhanden
<b>FK positiv</b>	30 (a)	0 (b)
<b>FK negativ</b>	0 (c)	3 (d)
Prävalenz = 90,91 %		
Sensitivität = 1,0 (KI 0,86 – 1,0)		
Spezifität = 1,0 (KI 0,31 – 1,0)		
positiver Vorhersagewert = 1,0		
negativer Vorhersagewert = 1,0		

### 5.10.5 Computertomografie

Die Computertomografie wurde bei 27 Patienten zum Fremdkörpernachweis bzw. zur Fremdkörperlokalisation durchgeführt. Die Auswahlkriterien zur Durchführung einer CT waren retrospektiv nicht immer eindeutig zu erfassen. Zum einen ist die CT bei Patienten mit schwersten Begleitverletzungen eingesetzt worden, z. B. bei Gewaltdelikten. Zum anderen war der Einsatz auch von der Anamnese abhängig, in der nicht eindeutig zu klären war, aus welchem Material der Fremdkörper bestand. Beispielsweise haben drei Patienten mit Knallkörperverletzungen eine computertomografische Untersuchung der Orbita erhalten. Ebenso wurden drei Patienten computertomografisch untersucht, welche ein Trauma der Orbita erlitten, bei dem die Sehhilfe zerstört wurde.

Zum anderen wurde die CT vor allem bei Patienten eingesetzt, bei denen ein Fremdkörpernachweis in den zuvor durchgeführten bildgebenden Untersuchungen unsicher oder widersprüchlich war. So erhielten 22 % der Patienten, die computertomografisch

untersucht wurden, gleichzeitig ein Röntgen in zwei Ebenen. 26 % der Patienten erhielten zuvor eine Comberg-Untersuchung.

In 15 Fällen konnte ein Fremdkörper richtig dargestellt und lokalisiert werden. Alle dargestellten Fremdkörper waren metallischer Herkunft, außer einem extrabulbär gelegenem und aus Glas bestehendem Fremdkörper.

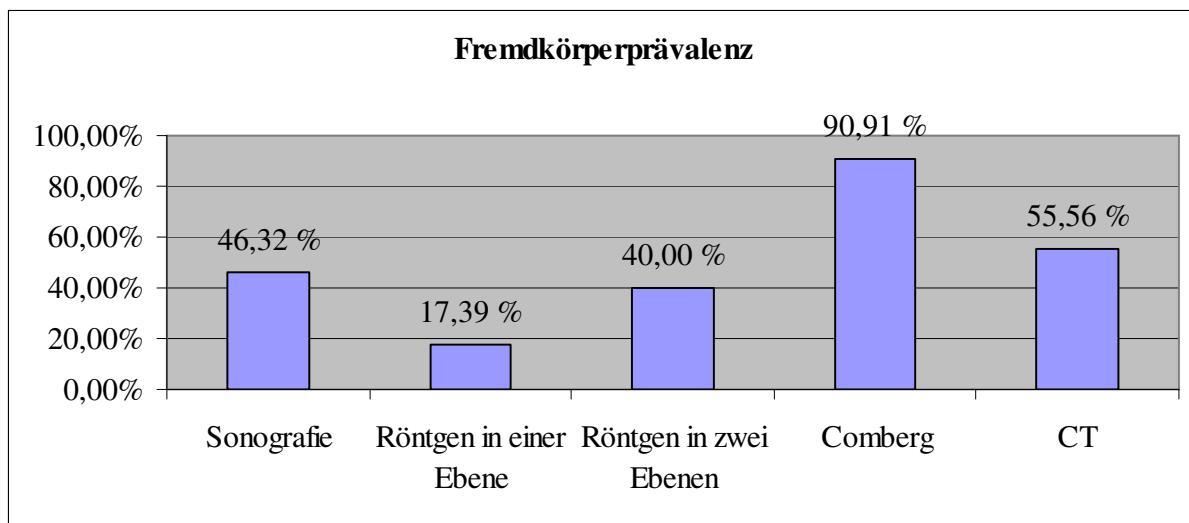
In insgesamt 12 computertomografischen Untersuchungen gelang kein Nachweis eines Fremdkörpers, wobei diese Ergebnisse korrekt negativ waren. Falsch negative Ergebnisse ergaben sich nicht.

Durch die Darstellung von 15 Fremdkörpern bei insgesamt nur 27 Untersuchungen ergab sich eine Fremdkörperprävalenz dieser Untersuchungsmethode von 56 %. Auch bei der computertomografischen Untersuchung gab es keine falsch positiven oder negativen Ergebnisse zu verzeichnen, so dass sich eine Sensitivität und Spezifität von 1,0 ergab. Der positive und negative Vorhersagewert kann ebenfalls mit 1,0 beziffert werden (Tabelle 19).

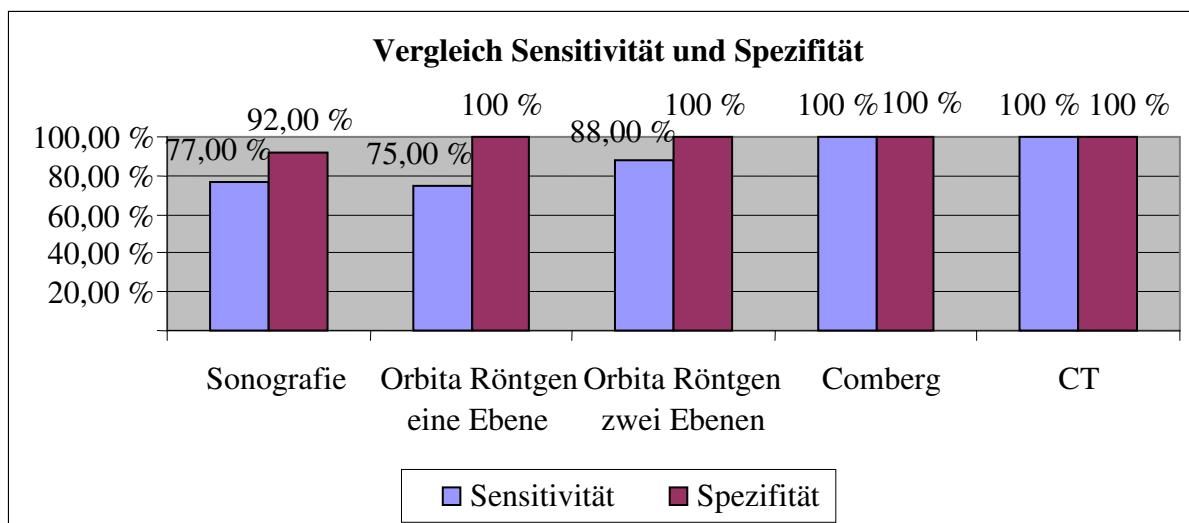
**Tabelle 19:** Gütekriterien für die CT

Fremdkörper		
Computertomografie	vorhanden	nicht vorhanden
<b>FK positiv</b>	15 (a)	0 (b)
<b>FK negativ</b>	0 (c)	12 (d)
Prävalenz = 55,56 %		
Sensitivität = 1,0 (KI 0,75 – 1,0)		
Spezifität = 1,0 (KI 0,70 – 1,0)		
positiver Vorhersagewert = 1,0		
negativer Vorhersagewert = 1,0		

Die nachstehenden Abbildungen 10 und 11 vergleichen die errechneten Werte für die einzelnen Modalitäten untereinander.



**Abbildung 10:** Vergleich Fremdkörperprävalenz der bildgebenden Verfahren



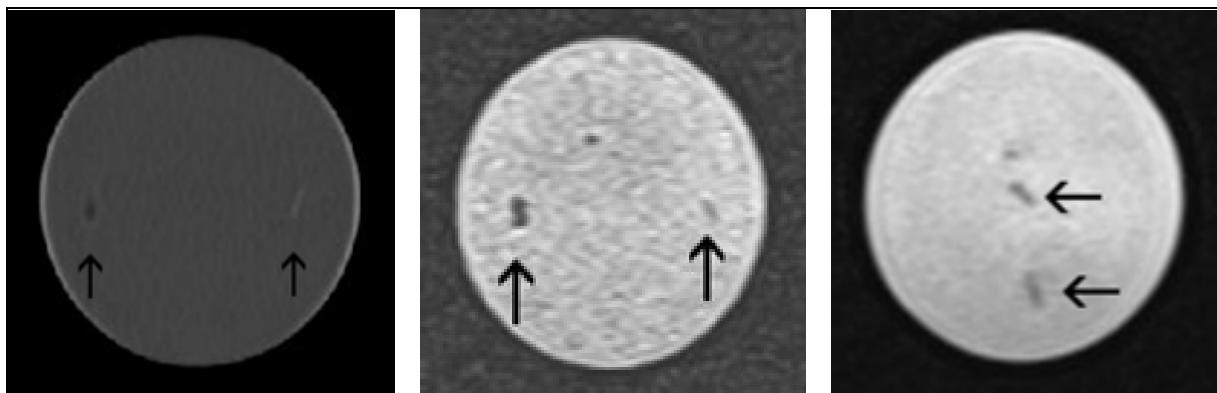
**Abbildung 11:** Vergleich der Sensitivität und Spezifität der eingesetzten bildgebenden Verfahren

## 6. Ergebnisse der experimentellen Studie

### 6.1 Nachweis der Fremdkörper in Abhängigkeit von der Holzart

Die computertomografischen Untersuchungen ergaben eine unterschiedliche Darstellung der hölzernen Fremdkörper. Sowohl in der Agarmasse als auch in der Fettmasse waren die dargestellten Holzfremdkörper zum Großteil als hypodense Struktur erkennbar. Vereinzelt konnten jedoch einige Fremdkörper in der CT ebenso als hyperdense Struktur dargestellt werden. Es waren sowohl zwei kleine Fremdkörper als auch zwei größere Fremdkörper betroffen, unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt und der Art des Holzes. Die linke Aufnahme der Abbildung 12 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Sie zeigt einen hypodens und einen hyperdens dargestellten Fremdkörper in der CT.

In der 1,5 T und 3 T MRT waren hingegen alle dargestellten Fremdkörper als hypointense Struktur erkennbar. Die mittlere und rechte Aufnahme der Abbildung 12 veranschaulichen die unterschiedlichen Darstellungen von Holzfremdkörpern in den eingesetzten magnetresonanztomografischen Verfahren.



**Abbildung 12:** Darstellung der Fremdkörper in der Agarmasse

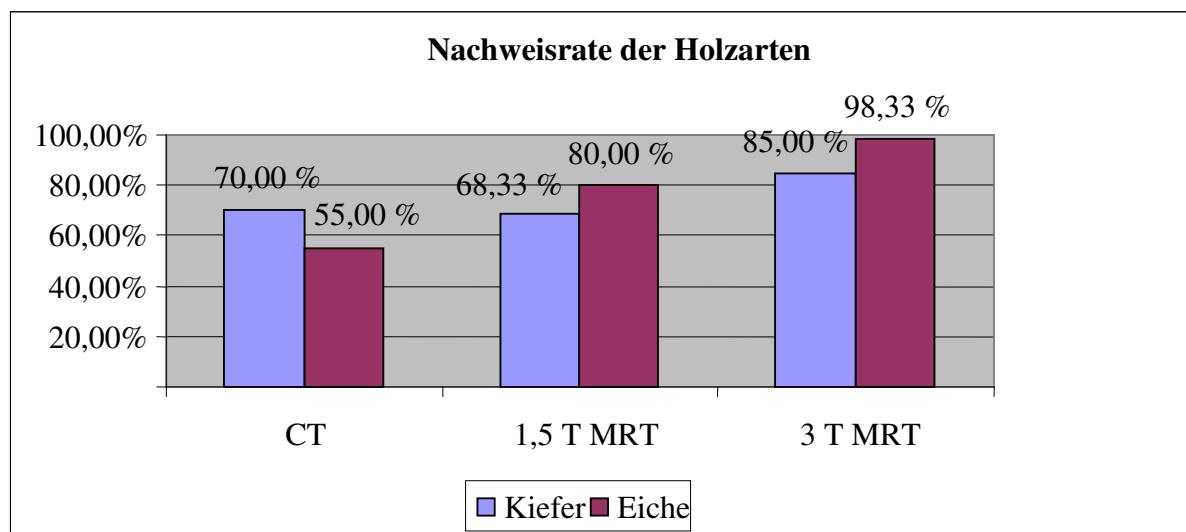
Bild links: computertomografische Darstellung von trockenen Holzsplittern, der rechte Eichenfremdkörper von  $4 \text{ mm}^3$  Größe stellt sich hyperdens dar, der linke Kiefernfremdkörper von  $11,25 \text{ mm}^3$  Größe hypodens; Bild Mitte: Darstellung eines trockenen  $5 \text{ mm}^3$  (links) und Anschnitt eines trockenen  $16 \text{ mm}^3$  (rechts) großen Fremdkörpers aus Eichenholz in der 1,5 T MRT; Bild rechts: Darstellung eines  $4 \text{ mm}^3$  großen (unten) und eines  $9 \text{ mm}^3$  großen (oben) Fremdkörpers aus frischem Eichenholz in der 3 T MRT

Die experimentellen Untersuchungen ergaben für die Darstellbarkeit von Hart- oder Weichholz in den bildgebenden Verfahren einige Unterschiede. 70 % der Fremdkörper aus Kiefernholz, also einem weichen Holz, wurden in der CT erkannt. Dagegen wurden nur 55 % der Fremdkörper aus Eichenholz, dem Hartholz, korrekt nachgewiesen. Eine univariate Analyse ergab keinen signifikanten Zusammenhang für die unterschiedliche Darstellbarkeit von Kiefern- und Eichenholz in der CT.

Für die magnetresonanztomografischen Untersuchungen im 1,5-T-Gerät ergaben sich ebenfalls keine wesentlichen Unterschiede in der Darstellbarkeit von Fremdkörpern aus Kiefern- oder Eichenholz. In der 1,5 T MRT wurden, wie schon in der CT, rund 70 % der Fremdkörper aus Kiefernholz richtig dargestellt. Für das Eichenholz ergab sich in der 1,5 T MRT jedoch eine bessere Darstellbarkeit der Fremdkörper als in der CT. Rund 80 % der Eichenfremdkörper wurden korrekt dargestellt. Ein signifikanter Unterschied ergab sich hieraus nicht.

Die univariate Analyse der Darstellbarkeit der verwendeten Holzarten ergab für die 3 T MRT im Gegensatz zu den anderen beiden bildgebenden Verfahren einen signifikanten Unterschied ( $p < 0,05$ ). 85 % der Fremdkörper aus Kiefernholz wurden richtig erkannt bzw. dargestellt. Von den Eichenholzfremdkörpern waren jedoch fast alle Fremdkörper durch die 3 T MRT darstellbar. Abbildung 13 stellt die ermittelten Ergebnisse grafisch dar.

Vergleichende Untersuchungen der Darstellbarkeit von Kiefernholz in den drei bildgebenden Verfahren ergaben statistisch keinen wesentlichen Vorteil durch eine der Untersuchungsmethoden. Deutlich andere Ergebnisse konnten für die Darstellung von Eichenholz ermittelt werden. Durch die eingeschränkte Nachweisrate von lediglich 55 % für Eichenholz in der CT und der deutlich höheren Nachweisrate von Eichenholz in beiden magnetresonanztomografischen Untersuchungen ergab sich ein höchst signifikanter Unterschied ( $p < 0,001$ ).



**Abbildung 13:** nachgewiesene Fremdkörper der verschiedenen Holzarten in den bildgebenden Verfahren

## **6.2 Nachweisrate der Fremdkörper in Abhängigkeit vom Umgebungsmedium**

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde geprüft, ob Holzfremdkörper in einer fett- oder wasserreichen Umgebung besser zur Darstellung kommen. Tabellarisch sind unten die Ergebnisse dieser Analyse zusammengefasst (Tabelle 20).

Die Betrachtung der Ergebnisse der computertomografischen Untersuchungen ergaben, dass in der Agarmasse und in dem Schweineschmalz annähernd gleich viele Fremdkörper gefunden werden konnten. Somit ist die Erkennbarkeit von Holz in der CT unabhängig vom Umgebungsmedium, in dem sich die Holzfremdkörper befinden.

In der 1,5 T MRT hingegen gelang eine Darstellung der Holzfremdkörper bei fettreichem Umgebungsmedium häufiger, mit sehr signifikantem Ergebnis ( $p < 0,01$ ). Es konnten gegenüber der Agarmasse 20 % mehr Fremdkörper richtig dargestellt bzw. erkannt werden, wenn sich der Fremdkörper in einem fettreichen Umgebungsmedium befand. Grund hierfür ist der größere Kontrast zwischen dem hyperintens dargestelltem Fettgewebe gegenüber dem hypointens dargestellten Holz. In der Agarmasse war ein derartiger Kontrast nicht vorhanden.

In der 3 T MRT dagegen konnten die Fremdkörper in der Agarmasse ebenso häufig dargestellt werden wie Fremdkörper, die in Fett eingebettet waren. Gegenüber der CT und der 1,5 T MRT waren die Fremdkörper in der Agarmasse häufiger entdeckt worden. Auch im Schweinschmalz ließen sich mehr Fremdkörper durch die 3 T MRT nachweisen als in den anderen beiden verwendeten bildgebenden Verfahren. Da in der Agarmasse und dem Schweineschmalz fast die gleiche Anzahl von Fremdkörpern entdeckt wurde, ließ sich für die Darstellung in der 3 T MRT kein signifikanter Zusammenhang zum verwendeten Hintergrundmaterial nachweisen.

Im Vergleich der drei Untersuchungsverfahren untereinander stellte die 3 T MRT 90 % der Fremdkörper in der Agarmasse dar, die 1,5 T MRT und die CT jeweils nur 63 %. Die Berechnungen in der 3 x 2 Kontingenztafel ergaben dadurch eine höchst signifikant bessere Darstellung der Fremdkörper in der Agarmasse durch die 3 T MRT ( $p < 0,001$ ).

Vergleichende Untersuchungen der Darstellbarkeit der Fremdkörper im Fetthintergrund in den drei Untersuchungsverfahren ergaben in der 3x2 Kontingenztafel ebenfalls einen höchst signifikant besseren Nachweis durch die MRT-Untersuchungen. Die CT war der MRT im Fetthintergrund unterlegen ( $p < 0,001$ ).

**Tabelle 20:** Nachweis der Fremdkörper in Abhängigkeit vom verwendeten Umgebungsmedium

Bildgebung	Fk in Agarmasse	Fk in Fettmasse
CT	63,33 %	61,67 %
1,5 T MRT	63,33 %	85,00 %
3 T MRT	90,00 %	93,33 %

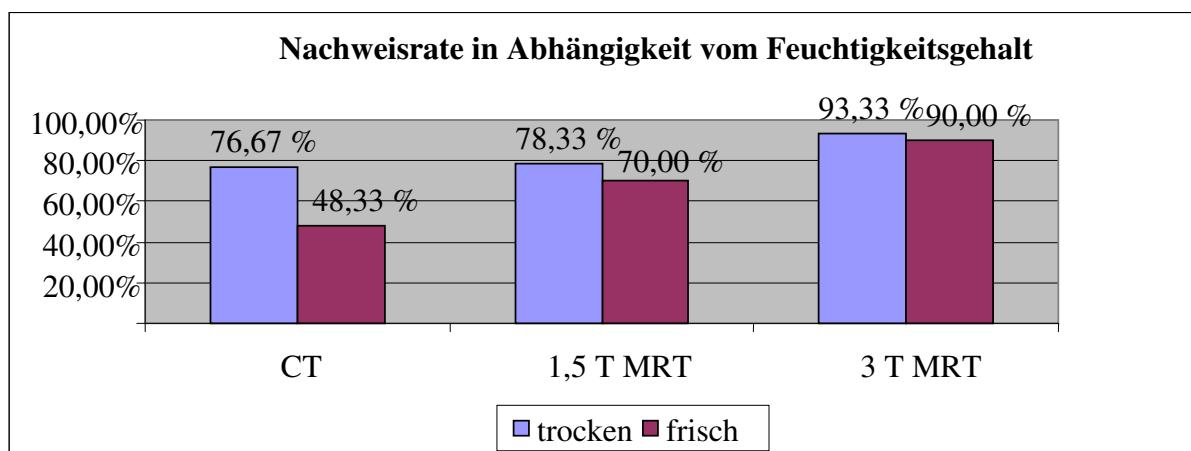
### 6.3 Nachweis der Fremdkörper in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt

Die Darstellbarkeit von trockenem oder frischem Holz in der CT und MRT ist in der untenstehenden Abbildung 14 dargestellt.

Die experimentelle Untersuchung von trockenem und frischem Holz durch die CT ergab eine signifikant bessere Darstellung von trockenem Holz ( $p < 0,01$ ). Eine Darstellung der trockenen Holzfremdkörper gelang in rund drei Viertel der Fälle. Dagegen wurde nur rund die Hälfte der frischen Holzfremdkörper aufgrund der ähnlichen Dichte zum umliegenden Gewebe korrekt nachgewiesen.

Für die 1,5 T MRT ergab sich kein Unterschied in der Bildgebung von trockenem oder frischem Holz. Rund acht von zehn trockenen Holzfremdkörpern konnten durch dieses bildgebende Verfahren entdeckt werden. Ein Nachweis der frischen Holzfremdkörper gelang in sieben von zehn Fällen. Ähnlich verhielt es sich in der MRT mit einem höheren Magnetfeld. Aufgrund der höheren Sensitivität gelang eine Darstellung der Fremdkörper in der 3 T MRT häufiger. Die untenstehende Grafik zeigt aber auch, dass frische Fremdkörper nicht besser zur Darstellung kamen, als trockene Fremdkörper. Rund neun von zehn Fremdkörpern konnten bei frischem und trockenem Holz erkannt werden. Ein Unterschied in der Darstellbarkeit von trockenem und frischem Holz ergab sich somit in der MRT nicht, weder für das 1,5 T Gerät, noch für das 3 T Gerät.

Hervorgehoben werden soll die Signifikanzanalyse in der  $3 \times 2$  Feldertafel. Der Vergleich der bildgebenden Verfahren untereinander ergab eine signifikant bessere Darstellbarkeit von trockenem Holz in der 3 T MRT als in der 1,5 T MRT oder CT ( $p < 0,05$ ). Gleichzeitig war die 3 T MRT in der Lage auch frisches Holz deutlich besser darzustellen als die anderen beiden Untersuchungsverfahren, mit höchst signifikantem Ergebnis ( $p < 0,001$ ).



**Abbildung 14:** Nachweisbarkeit hölzerner Fremdkörper in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt

#### 6.4 Nachweisrate der Fremdkörper in Abhängigkeit von der Größe

Die Anzahl der entdeckten Fremdkörper einer bestimmten Größe wird in der Tabelle 21 wiedergegeben und veranschaulicht die Schwierigkeit in der Diagnostik von Holzfremdkörpern. Zwar zeigt sich hier wiederum die höhere Sensitivität der MRT in der Diagnostik von hölzernen Fremdkörpern, allerdings wird ebenso ersichtlich, wie viele kleine Fremdkörper einem Nachweis durch die bildgebende Diagnostik entgehen. Gerade die CT konnte bei den kleinsten Fremdkörpern nur die Hälfte oder weniger korrekt darstellen. Erst ab einer Größe der Fremdkörper von  $9 \text{ mm}^3$  gelang der Nachweis in sieben von zehn Fällen. Selbst bei zunehmender Größe der Fremdkörper ergaben sich weiterhin Probleme im Nachweis der Fremdkörper, selbst bei einer Größe von  $16 \text{ mm}^3$  konnten nur drei von vier Fremdkörpern korrekt erkannt werden.

Auch in der 1,5 T MRT waren nur ungefähr die Hälfte der kleinsten Fremdkörper nachweisbar. Allerdings konnten ungefähr 20 % mehr der  $5 \text{ mm}^3$  großen Fremdkörper in der 1,5 T MRT als in der CT nachgewiesen werden. Alle  $9 \text{ mm}^3$  großen Holzfremdkörper konnten von den drei Radiologen in der MRT richtig erkannt werden, allerdings wurden größere Fremdkörper wiederum nicht immer entdeckt. Rund 12 % der  $11,25 \text{ mm}^3$  und 8 % der  $16 \text{ mm}^3$  großen hölzernen Fremdkörper wurden nicht als solche identifiziert.

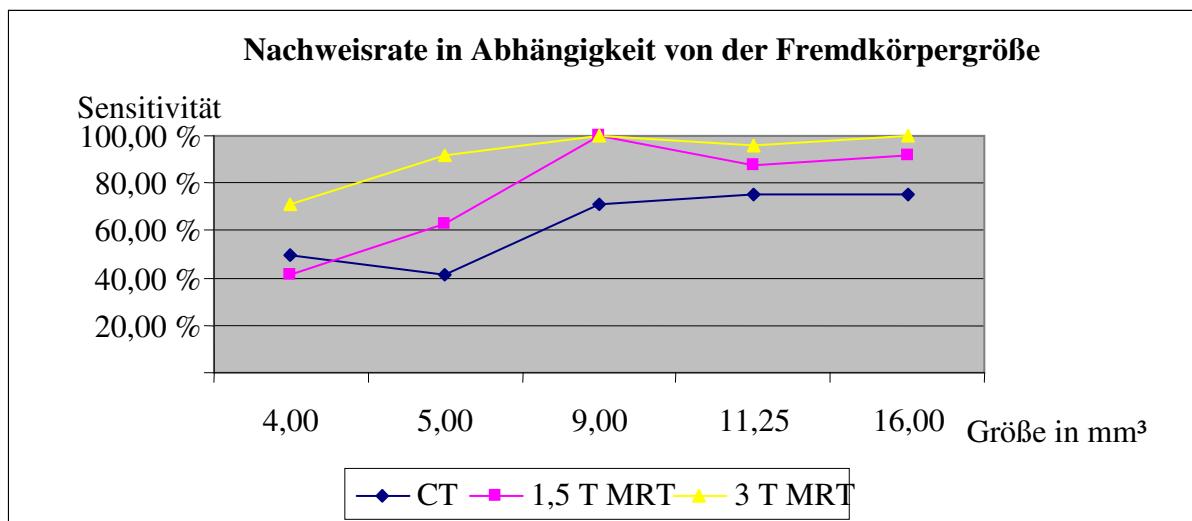
Während in der CT und der 1,5 T MRT nur rund die Hälfte der  $4 \text{ mm}^3$  großen Holzfremdkörper korrekt erkannt wurden, konnten in der 3 T MRT sieben von zehn Fremdkörpern dieser Größe richtig als Holzsplitter klassifiziert werden. Bei  $5 \text{ mm}^3$  großen Fremdkörpern gelang eine Darstellung in der 3 T MRT sogar in neun von zehn Fällen, also doppelt so häufig wie in der CT. Wie schon in der 1,5 T MRT konnten alle  $9 \text{ mm}^3$  großen

Fremdkörper in der 3 T MRT richtig zugeordnet werden. Aber auch hier entgingen den Untersuchern einige der 11,25 mm<sup>3</sup> großen Objekte. Dafür konnten wiederum alle 16 mm<sup>3</sup> großen Fremdkörper entdeckt werden.

Die nachstehende Abbildung 15 veranschaulicht graphisch die Nachweisrate von hölzernen Fremdkörpern unterschiedlicher Größe durch die angewendeten bildgebenden Verfahren.

**Tabelle 21:** Nachweis der Fremdkörper in Abhängigkeit von deren Größe

	CT	1,5 T MRT	3 T MRT
<b>4 mm<sup>3</sup></b>	50,00 %	41,67 %	70,83 %
<b>5 mm<sup>3</sup></b>	41,67 %	62,50 %	91,67 %
<b>9 mm<sup>3</sup></b>	70,83 %	100,00 %	100,00 %
<b>11,25 mm<sup>3</sup></b>	75,00 %	87,50 %	95,83 %
<b>16 mm<sup>3</sup></b>	75,00 %	91,67 %	100,00 %



**Abbildung 15:** Anzahl der dargestellten Fremdkörper in Abhängigkeit von der Fremdkörpergröße

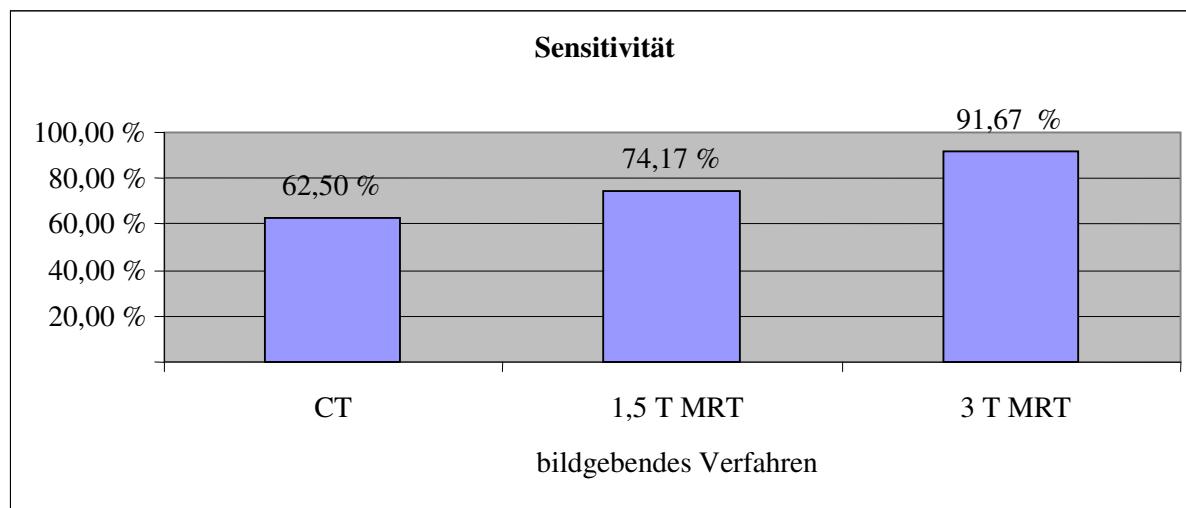
## 6.5 Sensitivität der einzelnen Verfahren

Abbildung 16 verdeutlicht die Sensitivität der angewandten Verfahren in der Darstellung von Holz. Hier zeigt sich, dass die MRT einen Vorteil gegenüber der CT in der Abbildung von hölzernen Fremdkörpern aufweist. Durch die CT konnten lediglich 63 % der Holzfremdkörper als solche identifiziert werden. Als problematisch erwies sich die uneinheitliche Darstellung der Holzfremdkörper, da der Großteil hypodens erscheint, wenige Fremdkörper jedoch auch hyperdens zur Darstellung kamen. Die CT weist bei der Darstellung von Hölzern mit höherem Wassergehalt erhebliche Unsicherheiten auf. Grund hierfür ist die

ähnliche Dichte der Fremdkörper zum umliegenden Gewebe. Zwar konnten trockene Hölzer häufiger dargestellt werden, trotzdem war eine Differenzierung zu Luft häufig nur anhand der Form möglich. Durch die erheblichen Einschränkungen der CT konnten selbst größere Fremdkörper nicht mit Sicherheit dargestellt werden, wodurch sich die geringe Sensitivität der CT für Holz ergab.

Dagegen konnten in der 1,5 T MRT rund drei Viertel der Fremdkörper von den Radiologen korrekt erkannt werden. Die im Vergleich zur CT höhere Sensitivität ergab sich durch die signifikant bessere Darstellbarkeit von Fremdkörpern in einem fettreichen Umgebungsmedium. Gleichzeitig waren mehr Fremdkörper in der Agarmasse nachweisbar. Die höhere Sensitivität ergibt sich ebenfalls durch die Möglichkeit der Darstellung von kleineren Holzfremdkörpern ab einer Größe von 9 mm<sup>3</sup>.

Ein höheres Magnetfeld in der MRT erbrachte in der Darstellung von Holzfremdkörpern einen weiteren Vorteil. Es konnten rund 15 % mehr Fremdkörper in der 3 T MRT als in der 1,5 T MRT dargestellt werden. Wie schon in der 1,5 T MRT waren die Fremdkörper ebenfalls einheitlich hypointens, was gegenüber der uneinheitlichen Darstellung in der CT einen Vorteil bedeutet. Die höhere Sensitivität im Vergleich zur MRT mit niedriger Feldstärke ergab sich durch die Darstellbarkeit unabhängig vom umgebenden Medium. Die Darstellung von frischem Holz und Eichenholz gelang in der 3 T MRT deutlich besser als in den anderen Untersuchungsverfahren. Außerdem ergab sich eine deutlich höhere Nachweisrate durch die mögliche Darstellung von kleineren Holzfremdkörpern.



**Abbildung 16:** Sensitivität der einzelnen bildgebenden Verfahren

## **6.6 Falsch positive Ergebnisse**

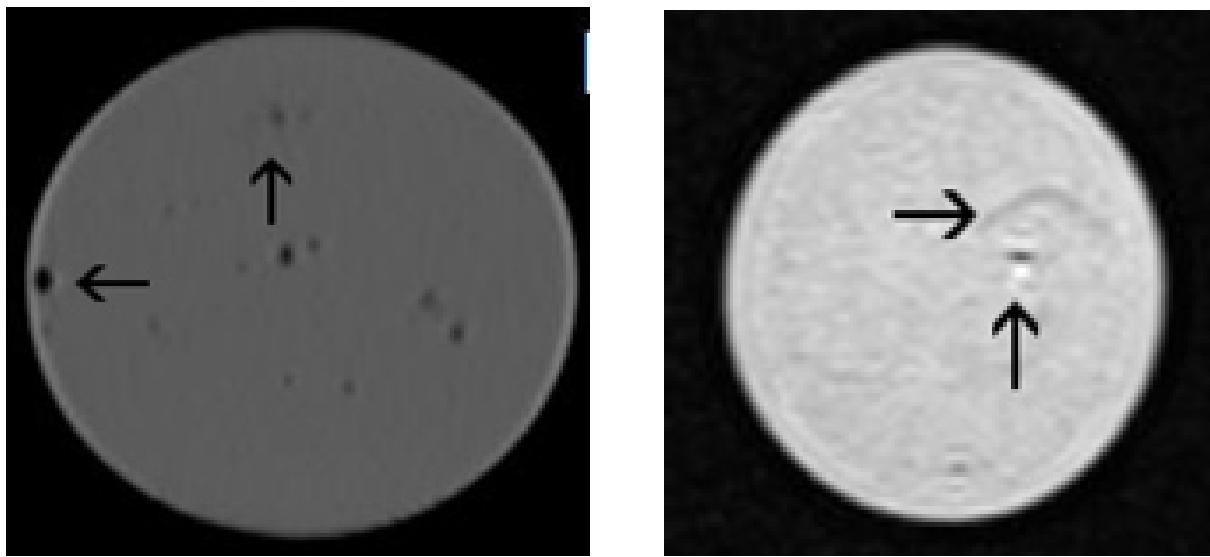
In der Auswertung der computer- und magnetresonanztomografischen Untersuchungen wurden einige Strukturen als Fremdkörper bezeichnet, die keine Holzfremdkörper waren. Wie oben beschrieben, war eine Verwechslung mit Luft häufig. Gleichzeitig war eine Differenzierung von Verklumpungen mit Agar ebenfalls möglich, wodurch der sichere Nachweis von Fremdkörpern zusätzlich erschwert wurde. Abbildung 17 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Zwar traten die Verwechslungen mit Luft vermehrt bei computertomografischen Untersuchungen auf, jedoch war eine Verwechslung mit Luft oder Verklumpungen mit Agar auch in der MRT möglich.

In der CT wurden von den Radiologen insgesamt 22 Strukturen beschrieben, die fälschlich als Fremdkörper bezeichnet wurden. Die drei Radiologen haben dabei größtenteils einheitlich dieselben dargestellten Strukturen als hölzerne Fremdkörper beschrieben. Insgesamt acht der falsch positiven Ergebnisse in der CT ergaben sich bei den Versuchen mit der Agarmasse. Die angeblichen Fremdkörper wurden entweder mit Agar-Verklumpungen oder Luft verwechselt. Im Versuchsaufbau mit dem Schweineschmalz wurden für die CT etwas mehr falsch positive Ergebnisse (14) nachgewiesen. Bei diesem Versuchsaufbau war vor allem die Verwechslung mit Luft das vorwiegende Problem.

Bei 14 der 22 falsch positiven Ergebnisse wurden die Strukturen als „vermutlicher Fremdkörper“ beschrieben wurden und nur drei als „sehr wahrscheinlicher Fremdkörper“. Somit waren sich die Radiologen bei dem Großteil der falsch gedeuteten Fremdkörper unsicher, ob die dargestellte Struktur wirklich ein Fremdkörper ist.

In der MRT sind ebenfalls falsch positive Ergebnisse zu verzeichnen. Insgesamt 24 Strukturen wurden in der 1,5 T MRT falsch als Fremdkörper gedeutet. 12 dieser Strukturen, die keine Fremdkörper waren, wurden von den Radiologen als „wahrscheinlicher Fremdkörper“ beschrieben. Die Radiologen waren sich somit sicher, dass der fehl gedeutete Fremdkörper tatsächlich einer ist.

In der 3 T MRT waren weniger falsch positive Ergebnisse zu verzeichnen, als in der 1,5 T MRT. Im Vergleich zu der CT gab es nur ein falsch positives Ergebnis weniger. Wie schon in den Untersuchungen in dem 1,5 T Gerät waren in der 3 T MRT falsch positive Ergebnisse bei den Untersuchungen mit der Agarmasse häufiger. Insgesamt 13 falsch positive Ergebnisse waren hier zu registrieren, während es bei den Untersuchungen mit Schweineschmalz wiederum nur acht waren. Insgesamt neun Strukturen wurden hier als „vermutlicher Fremdkörper“ bezeichnet, zehn als „wahrscheinlicher Fremdkörper“.



**Abbildung 17:** Bild links: Agarmasse in der CT, der waagerechte Pfeil markiert Luft, der senkrechte Pfeil markiert eine Zusammenlagerung von Agar-Pulver, beide Strukturen sind fast nur anhand der Form von Fremdkörpern zu unterscheiden; Bild rechts: Darstellung von Agar in der 3 T MRT, der senkrechte Pfeil markiert Luft, der waagerechte Pfeil eine Zusammenlagerung von Agar

**Tabelle 22:** falsch positive Rate der bildgebenden Modalitäten

Hintergrund	CT	1,5 T MRT	3 T MRT
Agar	8	16	13
Fett	14	8	8

## 6.7. Bewertungssicherheit

In der vorliegenden Studie waren die Radiologen bei der Auswertung der Untersuchung dazu aufgefordert worden, zum Einen die Fremdkörper aufzufinden und zum Anderen anzugeben, wie sicher sie sich waren, dass die dargestellte Struktur auch wirklich ein Fremdkörper ist. Das Ergebnis ist in der nachstehenden Tabelle 23 dargestellt. In der Tabelle ist nicht nur die häufigere Nachweisrate, sondern auch die sicherere Erkennbarkeit der Holzfremdkörper in der MRT ersichtlich. In dieser sind Fremdkörper nur halb so oft als „vermutlicher Fremdkörper“ beschrieben worden als in der CT. Insgesamt 16 % der Holzfremdkörper wurden als solche beschrieben. In der 1,5 T MRT wurde dagegen in nur 7,5 % der Fälle die Kategorie „vermutlicher Fremdkörper“ verwendet, während diese in der 3 T MRT mit rund 9 % nur etwas häufiger zum Einsatz kam. Wie aus der Tabelle weiterhin ersichtlich ist, wurde die Kategorie „wahrscheinlicher Fremdkörper“ bei allen radiologisch verwendeten Verfahren fast gleich häufig eingesetzt. Rund ein Fünftel der erkannten Fremdkörper wurden als „wahrscheinlicher Fremdkörper“ bezeichnet.

Dass die hölzernen Fremdkörper in den MRT-Untersuchungen häufig sicherer erkannt wurden, zeigt die Betrachtung der Kategorie „sehr wahrscheinlicher Fremdkörper“. In der CT wurden rund ein Viertel der Fremdkörper sicher nachgewiesen, während in der 1,5 T MRT rund 46 % der Fremdkörper sicher als solche erkannt wurden. In der 3 T MRT legten sich die Radiologen am häufigsten fest. 64 % der Fremdkörper wurden als „sehr wahrscheinlicher Fremdkörper“ korrekt bezeichnet.

**Tabelle 23:** Bewertungssicherheit von Fremdkörpern bei unterschiedlichen bildgebenden Modalitäten

	<b>CT</b>	<b>1,5 T MRT</b>	<b>3 T MRT</b>
<b>vermutlicher Fk</b>	15,83 %	7,50 %	9,17 %
<b>wahrscheinlicher Fk</b>	20,00 %	20,83 %	18,33 %
<b>sehr wahrscheinlicher Fk</b>	26,67 %	45,83 %	64,17 %
<b>Fk nicht erkannt</b>	37,50 %	25,83 %	8,33 %
<b>Summe</b>	100,00 %	100,00 %	100,00 %

## **7. Diskussion**

### **7.1. Methodendiskussion retrospektive Studie**

Zielstellung der Arbeit war es, den Stellenwert der bildgebenden Methoden in der Diagnostik von intraorbitalen Fremdkörpern zu bestimmen, unter besonderer Betrachtung der notwendigen Bildgebung im Rahmen der Extraktion des Fremdkörpers durch die Pars Plana Vitrektomie. Aufgrund des retrospektiven Aufbaus der Studie bestehen einige Limitationen, die im Folgenden erläutert werden.

Für die vorliegende Arbeit wurden nach dem ICD-Code die Namen und Daten der Patienten recherchiert, die mit einer Perforation, Penetration oder einer Fremdkörperverletzung an der Universitätsaugenklinik Rostock behandelt wurden. Durch die genannte Vorgehensweise zur Ermittlung der in Frage kommenden Patienten besteht die Möglichkeit, dass nicht alle Patienten erfasst wurden. Gleichzeitig konnten einige Patienten nicht in die vorliegende Studie eingeschlossen werden, deren Akten nicht vorlagen. Dies sollte jedoch nur Einzelfälle betreffen, die dadurch die vorliegenden Ergebnisse nicht wesentlich beeinflussen.

Im Rahmen der Datenerfassung wurden einige Befunde aufgenommen, die im weiteren Verlauf als nicht zielführend im Sinne der Fragestellung eingeordnet wurden, so dass sie keine Berücksichtigung fanden. So blieben beispielsweise der Aufnahme- und Entlassungsvitus unbeachtet.

Zur Bestimmung des Anteils der Fremdkörper, die in konventionellen Röntgenmethoden bildgebend sind, wurde retrospektiv das Material des Fremdkörpers ermittelt. Die Materialbestimmung des Fremdkörpers gelang sicher, wenn dieser operativ entfernt wurde. Das Fremdkörpermaterial konnte in diesen Fällen dem Operationsbericht entnommen werden. Wurde ein Fremdkörper jedoch belassen, musste die Materialbestimmung durch die Bewertung die Analyse der Röntgenbefunde in Kombination mit der Anamnese erfolgen, was Unsicherheiten mit sich bringt.

Dem Einsatz der verwendeten bildgebenden Untersuchungsverfahren galt besondere Aufmerksamkeit. Anhand der Patientenakte und des Krankheitsverlaufes war bekannt, ob eine Fremdkörperverletzung oder eine Perforation/Penetration vorlag. Wie im Erfassungsbogen abgebildet, wurde notiert, welche bildgebenden Verfahren eingesetzt wurden. Hier ergeben sich Unsicherheiten bezüglich der Häufigkeit der eingesetzten bildgebenden Verfahren, sollten die entsprechenden Befunde nicht abgeheftet oder keine Aktennotiz von einer durchgeföhrten bildgebenden Untersuchung durchgeführt worden sein.

Anschließend wurden die Befunde der bildgebenden Untersuchungen analysiert. Es wurde notiert, ob die angewandte Untersuchungsmodalität einen Fremdkörper richtig darstellen

konnte oder nicht, was den Befunden entnommen wurde. Aus diesen Daten war es möglich, die Testgüte der bildgebenden Verfahren zu bestimmen. Diesbezüglich ergeben sich ebenfalls Unsicherheiten bei Patienten mit Perforationen oder belassenen Fremdkörpern. Konnte in der Bildgebung kein Fremdkörper dargestellt werden und ist keine operative Sanierung erfolgt, ist theoretisch trotzdem das Vorliegen einer Fremdkörperverletzung möglich. Dadurch wäre das Ergebnis des bildgebenden Verfahrens als falsch negativ zu werten. Andererseits sind theoretisch auch falsch positive Ergebnisse denkbar. Sollte ein bildmorphologisch dargestellter Fremdkörper bei fehlender therapeutischer Konsequenz belassen werden, ist das Vorliegen einer Fremdkörperverletzung nicht endgültig bewiesen. Dies betrifft vor allem computertomografische Untersuchungen, die nach der vorliegenden Studie vor allem bei Patienten mit extrabulbären Fremdkörper eingesetzt wurde, welche häufig belassen wurden. Durch die Betrachtung des zur Verfügung stehenden Materials mit weiterem Krankheitsverlauf, kann die Korrektheit der Untersuchungsergebnisse bestätigt werden. Die durch die Bildgebung festgestellte Lokalisation eines Fremdkörpers wurde notiert, damit ein Vergleich mit der intraoperativ beschriebenen Lage des Fremdkörpers erfolgen konnte. Ziel war die Exaktheit der Lokalisation durch die bildgebende Modalität zu bestimmen. Da jedoch in einigen Operationsberichten keine exakte Lokalisation eines Fremdkörpers angegeben wurde, ebenso wie bei einem Großteil der sonografischen Untersuchungen, konnte ein Vergleich nicht erfolgen.

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der bildgebenden Diagnostik von Fremdkörperverletzungen lag, sollte auch bestimmt werden, ob eine Bildgebung vor oder nach der operativen Versorgung erfolgte. Problematisch erwies sich die Einteilung bei mehreren operativen Eingriffen. In einigen Fällen wurde eine Wundversorgung und anschließend eine Vitrektomie durchgeführt, teilweise sogar mit einer dritten sich anschließenden Operation. Bei diesen Patienten eine Untersuchung als prä- oder postoperativ zu benennen, war damit retrospektiv schwierig und nicht immer eindeutig. Deshalb erfolgte keine Unterteilung in eine präoperativ und postoperativ durchgeführte Diagnostik.

Um die bildgebenden Verfahren zu beurteilen, sollte auch der Diagnosewert bestimmt werden. Der Diagnosewert gibt an, wie häufig ein bildgebendes Verfahren die Diagnose verändert hat. Dies konnte jedoch in der vorliegenden Arbeit keine Berücksichtigung finden. Grund hierfür ist der Aufbau der Studie. Retrospektiv konnte nicht beurteilt werden, wie wahrscheinlich im Vorfeld der Untersuchung eine Fremdkörperverletzung angesehen wurde. Zusätzlich wurden mehrere bildgebende Untersuchungen oder Fremdkörperextraktionen an einem Tag durchgeführt, so dass nicht beurteilt werden konnte, welches Verfahren die

Diagnose schließlich veränderte. Durch diese Unsicherheit wurde dieser Ansatz der Bewertung der bildgebenden Modalitäten verworfen und entsprechend nicht weiter verfolgt.

## **7.2. Ergebnisdiskussion retrospektive Studie**

Die geringe Anzahl von Perforationen, Penetrationen und Fremdkörperverletzungen in unserem retrospektiven Teil der Arbeit bezogen auf den großen Zeitraum von fast 13 Jahren verdeutlicht die geringe Inzidenz dieser Verletzungen des Auges [5, 31]. Das Patientenkollektiv der Universitätsaugenklinik Rostock unterscheidet sich im Vergleich nicht wesentlich von anderen Studien. Das überwiegende Auftreten der genannten Verletzungen beim männlichen Geschlecht in einem arbeitsfähigen Alter ist allgemein bekannt [10, 24, 31] und trifft auch auf diese Studie zu. Gleichzeitig wird die Dramatik einer solchen Verletzung dadurch nochmals hervorgehoben. Der mögliche Visusverlust bedeutet für den Patienten eine erhebliche Einschränkung der Lebensqualität oder sogar die Berufsunfähigkeit schon in einem jungen Lebensalter.

Auch bezüglich des Fremdkörpermaterials und der Verletzungsentstehung ist kein wesentlicher Unterschied zu anderen Studien festzustellen. Verschiedene Analysen bestätigen die vorliegenden Ergebnisse, dass bis zu 90 % der Fremdkörper metallischer Herkunft sind [18, 24, 31, 68]. Der hohe Anteil von Metall erklärt sich durch die überwiegende Entstehung von Fremdkörperverletzungen bei handwerklichen Tätigkeiten. Die typische Anamnese für eine Fremdkörperverletzung ist das Arbeiten mit dem Hammer [15, 24, 31, 68]. Gerade traumatische Ereignisse während der Arbeit mit dem Hammer oder Meißel erfordern deshalb den Ausschluss einer möglichen Fremdkörperverletzung.

Die Diagnose einer Fremdkörperverletzung ist jedoch in der Regel nicht einfach. Nur in seltenen Fällen ist diese offensichtlich, wenn es sich um große Fremdkörper handelt. Aufgrund der oben genannten Anamnese mit Verletzungen bei Ereignissen, die mit hohen Kräften oder Geschwindigkeiten einhergehen, sind die Fremdkörper jedoch in der Regel von geringer Größe und können damit leicht übersehen werden. Dies stellt den klinischen Untersucher und die Bildgebung damit vor eine Herausforderung. Eine Vorstellung über die sehr geringe Größe der Fremdkörper liefern die Studien von El-Asrar et al und Woodcock et al. In der Studie von El-Asrar et al sind rund 37 % der Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt kleiner als 2 mm im Durchmesser, rund 38 % sind größer als 4 mm im Durchmesser [16]. Woodcock et al geben ein durchschnittliches Gewicht von 48 mg der metallischen intraokularen Fremdkörper an. Haben Fremdkörper zusätzlich noch eine scharfe oder spitze Form, so benötigten die Fremdkörper nur eine durchschnittliche Masse von 30 mg, um den

hinteren Augenabschnitt zu erreichen [68]. Die beiden Studien von El-Asrar et al und Woodcock et al verdeutlichen damit die hohe Anforderung an die klinische Untersuchung und die bildgebende Diagnostik. Der Fremdkörper kann aufgrund der geringen Größe und der möglichen Begleitverletzungen während der klinischen Untersuchung dem Arzt entgehen. Andererseits kann dieser auch der bildgebenden Untersuchung aufgrund der geringen Größe nicht zur Darstellung kommen, weshalb bei der Bewertung sämtlicher bildgebender Befunde Vorsicht geboten ist.

Die geringe Fremdkörpergröße und die vielen möglichen Begleitverletzungen, die einen Einblick in den hinteren Augenabschnitt verhindern, erschweren die klinische Diagnose einer Fremdkörperverletzung erheblich. Dies spiegelt sich auch in der klinischen Nachweisrate von Fremdkörpern in der vorliegenden Studie wieder. Nur 40 % der Fremdkörper waren an der Spaltlampe nachweisbar. Aufgerundet sechs von zehn Fremdkörpern blieben der klinischen Untersuchung an der Spaltlampe verborgen, was durch ähnlich aufgebaute Studien bestätigt wird [13, 66]. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer bildgebenden Untersuchung zum Ausschluss oder Nachweis eines intraorbitalen Fremdkörpers, gerade unter der Berücksichtigung der vielfältigen Komplikationen eines verbliebenen Fremdkörpers.

Die Indikation zur bildgebenden Untersuchung sollte jedoch streng gestellt werden. Sicherlich ist die Anamnese ein wegweisender Hinweis. Allerdings sollte die Entscheidung zur Bildgebung nicht nur anhand der Anamnese getroffen werden, da hierdurch unnötig viele Patienten untersucht werden müssen, oder einer unnötigen Strahlenbelastung ausgesetzt werden. Gleichzeitig würde dies einen hohen Arbeitsaufwand nach sich ziehen. Ein zusätzliches Kriterium neben der Anamnese bietet die klinische Untersuchung mit dem Beweis einer Perforation oder Penetration des Bulbus. Saeed et al illustrieren dies an Patienten mit einer intraokularen Fremdkörperverletzung oder vermuteter Fremdkörperverletzung, bei denen jeweils ein konventionelles Röntgen durchgeführt wurde. Es wurde bei 204 Röntgenuntersuchungen verglichen, ob ein klinischer Beweis für eine Perforation oder Penetration vorhanden war. In 87% der Fälle wurde eine Röntgendiagnostik durchgeführt, bei denen kein klinischer Beweis für eine Penetration vorlag. Ergebnis war, dass bei diesen Patienten kein Fremdkörper dargestellt werden konnte [57]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Bray und Griffith. Es konnte geschlussfolgert werden, dass die klinische Untersuchung damit den wichtigsten Schritt in der Diagnostik darstellt [6].

Letztlich muss jedoch der klinisch tätige Arzt entscheiden wie groß der Fremdkörperverdacht ist und in wie weit die Diagnostik ausgedehnt werden muss, da kleine Fremdkörper in den Bulbus eindringen können ohne den Beweis einer Penetration [25]. Damit wird ein Teil der

bildgebenden Verfahren eingesetzt, um absolute Gewissheit zu haben, dass keine Fremdkörperverletzung vorliegt.

In der vorliegenden Studie sollten weitere klinische Anhaltspunkte bestimmt werden, die eine Indikation für eine bildgebende Diagnostik darstellen und die Auswahl des durchzuführenden bildgebenden Verfahrens erleichtern. Als ein Auswahlkriterium wurde die Tension des Bulbus vermutet. Diese kann zunächst laut den vorliegenden Ergebnissen keinen Fremdkörperverdacht erhärten oder unwahrscheinlich machen, zumal die Messung der Tension beim traumatisierten Patienten häufig nicht möglich war und somit auch nicht erzwungen wurde. Gleichzeitig zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass ein niedriger Augeninnendruck nicht zu einem vermehrten Einsatz der bildgebenden Diagnostik führte. Die Tension des Bulbus ist kein weiteres Kriterium zur Durchführung einer bildgebenden Diagnostik.

Die Tension wurde jedoch vorwiegend vor dem Einsatz der Sonografie und der Comberg-Methode bestimmt. Vor allem der normotone Bulbus wurde sonografisch untersucht. Gerade vor dem Hintergrund, dass ein normotoner Bulbus keinen Hinweis für eine Fremdkörperverletzung bietet, wurde der Augeninnendruck gemessen, damit das Risiko einer sonografischen Untersuchung bestimmt werden konnte. Allerdings ist in Einzelfällen auch eine vorsichtige sonografische Untersuchung möglich und durchgeführt worden. Prinzipiell sollte der Einsatz der Sonografie bei stark perforierenden Verletzungen des Auges vermieden werden oder so atraumatisch wie möglich erfolgen, da die Gefahr eines Prolaps intraokularer Strukturen besteht [32].

Ähnlich verhält es sich bei den durchgeführten Comberg-Aufnahmen. Der Einsatz ist ebenfalls von der Tension abhängig und wurde vorwiegend bei einem normotonen Bulbus durchgeführt. Der Einsatz bei einem niedrigen Augeninnendruck wurde jedoch vermieden.

Neben der Tension des Bulbus wurden als weiteres Auswahlkriterium für eine bildgebende Untersuchung die Begleitverletzungen vermutet. Es ergab sich statistisch ein Zusammenhang zu Oberlid- und Linsenverletzungen, sowie zu Glaskörperblutungen und Netzhautverletzungen. Gerade bei Verletzungen des Oberlides ergab sich ein signifikanter Zusammenhang zum Einsatz der CT, wobei hier der Verdacht auf einen intraorbitalen aber extraokular gelegenen Fremdkörper bestand. Obwohl sich rechnerisch ein signifikantes Ergebnis ergab, muss dieser Zusammenhang hinterfragt werden. Zum einen war eine CT nicht bei jeder Oberlidverletzung notwendig, zum anderen ließ sich kein signifikanter Zusammenhang von computertomografischen Untersuchungen zu Unterlidverletzungen nachweisen. Weshalb die Unterlidverletzungen eher sonografisch untersucht wurden und sich

kein signifikanter Zusammenhang zur CT nachweisen ließ, kann retrospektiv nicht nachvollzogen werden. Die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass im Rahmen von Verletzungen der Augenlider mit entsprechender Anamnese und Klinik die Diagnostik ausgeweitet werden sollte und eine computertomografische Untersuchung zu erwägen ist.

Im Rahmen von Linsenverletzungen konnte ein signifikant höherer Einsatz der Sonografie zum Fremdkörpernachweis ausgemacht werden. Weshalb die Linsenverletzungen vorwiegend sonografisch untersucht wurden, kann retrospektiv nur vermutet werden. Eine Verletzung der Linse kann auf einen Fremdkörper hindeuten, der in den hinteren Augenabschnitt gelangt ist, weshalb hier auch die anderen bildgebenden Verfahren häufiger eingesetzt wurden als bei Verletzungen im vorderen Augenabschnitt.

Die Analyse der vorliegenden Studie verdeutlicht, dass vorwiegend Verletzungen der Netzhaut und Glaskörperblutungen bildmorphologisch untersucht wurden. Durch einen verminderten Einblick durch eine Glaskörperblutung während der Untersuchung an der Spaltlampe und die vorwiegende Lokalisation der Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt scheint gerade bei diesen Verletzungen eine bildgebende Untersuchung notwendig. Für die Comberg-Methode ließ sich für diese Verletzungen sogar ein signifikanter Zusammenhang nachweisen. Dies lässt eine notwendige Lokalisation eines möglichen Fremdkörpers vermuten. Vergleichende Untersuchung von Begleitverletzungen und eingesetzter bildgebender Diagnostik liegen derzeit nicht vor.

Zwar konnte für einige Begleitverletzungen ein signifikanter Zusammenhang zu einigen bildgebenden Verfahren hergestellt werden, allerdings verdeutlichen die Ergebnisse lediglich, dass bestimmte Verletzungen eine weiterführende bildgebende Diagnostik erfordern. Im Gegensatz zu der Anamnese und einem klinischen Beweis einer Penetration oder Perforation sind die genannten klinischen Auswahlkriterien für die bildgebende Modalitäten eher von untergeordneter Bedeutung. Die Tension hat Bedeutung für Untersuchungsmodalitäten, die einen Kontakt mit dem Bulbus erfordern und sollten deshalb vorsichtig eingesetzt werden, um eine weitere Verletzung des Auges zu vermeiden.

An der Universitätsaugenklinik Rostock sind insgesamt 75 % der Patienten mit einer Perforation, Penetration oder Fremdkörperverletzung sonografisch oder radiologisch untersucht worden. Betrachtet man die Fremdkörperverletzungen separat, so erhielten sogar 90 % der Patienten eine Bildgebung. Aufgrund des häufig unterschiedlichen Untersuchungsaufbaus ist ein direkter Vergleich mit anderen Literaturergebnissen schwierig. Die zur Verfügung stehenden Studien erbrachten jedoch, dass bei einem Großteil der Patienten mit einer Fremdkörperverletzung eine bildgebende Untersuchung notwendig wird

und bestätigen damit die vorliegenden Ergebnisse. Beispielsweise wurden in einer retrospektiven Analyse von intraokularen Fremdkörperverletzungen ebenfalls 75 % der Patienten bildgebend untersucht [68]. In einer weiteren Studie von Fulcher und Mitarbeiter über intraorbitale Fremdkörper erhielt sogar jeder Patient ein bildgebendes Verfahren [21]. Gleichzeitig zeigen die vorliegenden Ergebnisse, dass ein kleinerer Teil der Patienten mit einem Fremdkörper nicht bildgebend untersucht wurde. Dies betrifft einige wenige Patienten, deren Fremdkörper beispielsweise während der Pars Plana Vitrektomie entdeckt und entfernt wurden. Eine weitere bildgebende Untersuchung wurde aufgrund fehlender Hinweise für eine Austrittswunde als nicht notwendig erachtet. Die meisten Fremdkörperverletzungen, bei denen auf eine weiterführende bildgebende Diagnostik verzichtet wurde, waren schon an der Spaltlampe sichtbar. Bei diesen Patienten ist eine bildmorphologische Untersuchung weit weniger häufig erfolgt. Gerade das Comberg-Verfahren und die CT kamen kaum zum Einsatz, schließlich konnte der Fremdkörper schon an der Spaltlampe lokalisiert werden. Aber auch die Sonografie und die konventionellen bildgebenden Verfahren sind deutlich weniger eingesetzt worden. Obwohl in der vorliegenden Studie nachgewiesen werden konnte, dass nicht bei jeder Fremdkörperverletzung eine bildgebende Untersuchung erfolgte, wird die Durchführung einer weiteren bildgebenden Untersuchung in der Literatur empfohlen, da ein zweiter Fremdkörper dem untersuchenden Arzt entgehen kann [57]. So konnten Woodcock und Mitarbeiter in zwei Fällen mittels CT neben dem an der Spaltlampe nachgewiesenen Fremdkörper einen weiteren Fremdkörper auffinden [68].

Mit welcher Modalität dann letztendlich der Nachweis oder Ausschluss eines Fremdkörpers erfolgen sollte, wird kontrovers diskutiert. Am häufigsten kam an der Universitätsklinik Rostock die Sonografie als bildgebendes Verfahren zur Diagnostik einer Fremdkörperverletzung zur Anwendung. Insgesamt 44 % der Patienten mit einer Perforation, Penetration oder einer Fremdkörperverletzung erhielten eine sonografische Untersuchung. Lag eine Fremdkörperverletzung vor, erhielten 56 % der Patienten eine Sonografie. Ähnliche Ergebnisse erbrachte die Promotionsarbeit von Hempel, in der nachgewiesen werden konnte, dass 42 % der Patienten mit intraokularem Fremdkörper sonografisch untersucht wurden [29]. In anderen Studien wurde die Sonografie etwas weniger häufig eingesetzt. Imrie et al analysierten sämtliche Fremdkörperverletzungen in Großbritannien, welche über die BOSU (British Ophthalmological Surveillance Unit) erfasst wurden, einem System, dem unabhängige ophthalmologische Fachärzte angeschlossen sind. In der genannten prospektiven Beobachtungsstudie war bei 21 Prozent der Patienten mit einem intraokularen Fremdkörper eine Sonografie notwendig [31]. Als Ursache für den unterschiedlichen Einsatz der

Sonografie im Vergleich zu der vorliegenden Studie kann das Vorhandensein eines Sonografie-Gerätes in der Augenklinik der Universität Rostock angegeben werden, wodurch eine Ultraschalluntersuchung sehr schnell und mit wenig Aufwand verfügbar ist.

Sicherlich ist bei den eingesetzten Ultraschalluntersuchungen an der Universitätsklinik Rostock nicht nur die Fremdkörpersuche alleinige Indikation für dieses Verfahren gewesen. Zusätzlich wurde die Netzhautsituation, der Glaskörper und die Linse beurteilt. In dieser Arbeit wurden allerdings nur Ultraschalluntersuchungen berücksichtigt, deren Ziel es war, einen Fremdkörper auszuschließen oder zu lokalisieren. Zur Diagnostik der begleitenden Verletzungen wurde die Sonografie viel häufiger verwendet, was den allgemeinen Stellenwert der Sonografie in der Diagnostik einer Verletzung des Auges nochmals unterstreicht.

Das Röntgen in einer oder zwei Ebenen ist an der Universitäts-Augenklinik Rostock bei 52 % der Patienten mit einer Fremdkörperverletzung eingesetzt worden, wobei das Röntgen der Orbita in zwei Ebenen häufiger zum Einsatz kam. Die hohe Anzahl der durchgeführten Röntgenuntersuchungen verdeutlicht die Notwendigkeit einer weiterführenden bildgebenden Untersuchung zum Nachweis oder Ausschluss eines Fremdkörpers. Gleichzeitig scheinen die genannten Methoden einen Informationszugewinn zu bedeuten. Und auch in anderen Studien wurden die Röntgenmethoden in hoher Anzahl eingesetzt, was die vorliegenden Ergebnisse in bestätigt. In der Studie von Imrie et al über das Management von intraokularen Fremdkörpern in Großbritannien wurden 66 % der Patienten mit einem intraokularen Fremdkörper geröntgt [31]. Die Analyse der eingesetzten bildgebenden Verfahren von Hempel erbrachte, dass 33 % der intraokularen Fremdkörper durch das Röntgen in einer oder zwei Ebenen bildgebend untersucht worden sind [29]. Die unterschiedlichen Ergebnisse zu der vorliegenden Studie erklären sich durch die Analyse von intra- und extraokularen sowie extrabulbären Fremdkörpern in der vorliegenden Studie.

Neben dem Röntgen der Orbita in einer oder zwei Ebenen wurde auch die Comberg-Methode an der Universitäts-Augenklinik Rostock bei mehr als einem Drittel der Patienten mit einer Fremdkörperverletzung eingesetzt. Lag keine Fremdkörperverletzung vor, wurde diese Untersuchung kaum eingesetzt, so dass insgesamt 33 von 213 Patienten durch die Comberg-Methode untersucht wurden. Der Einsatz dieser Methode bei einem Großteil der Patienten mit einem Fremdkörper könnte die Notwendigkeit einer exakteren Lokalisation bedeuten, wobei in der vorliegenden Studie nicht geklärt werden konnte, wie gut eine Lokalisation tatsächlich möglich ist. Laut der aktuellen internationalen Literatur ist diese Methode jedoch nur noch von historischer Bedeutung [34], so dass keine Literaturergebnisse zur Häufigkeit der Anwendung dieser Methode vorliegen. Dies liegt unter anderem an der Strahlenbelastung, der

Darstellung von nur röntgenpositiven Fremdkörpern und der notwendigen Mitarbeit des Patienten [44]. Einen möglichen Vergleich bietet nur die Promotionsarbeit von Hempel, welche zeigt, dass die Comberg-Methode in der Augenklinik der Universität Mainz bei 45 von 482 Patienten mit einer Perforation, Penetration oder Fremdkörperverletzung des Auges eingesetzt wurde [29].

Der häufige Einsatz der Comberg-Methode ist an der Universitätsklinik Rostock jedoch auch der räumlichen Trennung zwischen Augenklinik und dem CT-Standort geschuldet. Während die konventionellen Röntgenuntersuchungen und das Comberg-Verfahren direkt vor Ort durchgeführt werden können, ist die Durchführung einer CT mit einem erheblichen logistischen Aufwand verbunden. Somit wurde bei Bedarf einer exakteren Lokalisation eines Fremdkörpers die Comberg-Methode bevorzugt eingesetzt.

Eine computertomografische Untersuchung wurde bei 13 % der Patienten mit einem Fremdkörperverdacht durchgeführt. Im Vergleich zu anderen Studien ist dies relativ wenig, wird aber erklärbar durch die räumliche Trennung des CT-Gerätes von der Augenklinik. Hempel konnte einen Einsatz der bei 22,2 % der intraokularen Fremdkörperverletzungen nachweisen. In einer Studie in Großbritannien wurden 36% der intraokularen Fremdkörperverletzungen computertomografisch untersucht [31]. Andere Kliniken hingegen setzen die CT bei einem Fremdkörperverdacht viel häufiger ein. So zeigen Fulcher et al, dass 92,5% der Patienten mit einem Fremdkörper im Auge präoperativ eine CT erhalten haben [21]. Die Ergebnisse verdeutlichen den zunehmend hohen Stellenwert der CT in der Fremdkörperdiagnostik. Zwar wurden im Vergleich computertomografische Untersuchungen relativ selten durchgeführt, trotzdem wurde bei einem nicht unerheblichen Teil der Patienten der enorme logistische Aufwand betrieben.

Die retrospektive Analyse des Einsatzes von bildgebenden Verfahren bei einer Perforation, Penetration oder Fremdkörperverletzung ergab, dass oftmals mehrere Untersuchungsmodalitäten gleichzeitig eingesetzt wurden. Der kombinierte Einsatz mehrerer Verfahren wird generell empfohlen, da jedes bildgebende Verfahren seine Grenzen aufweist. Die Durchführung eines einzigen bildgebenden Verfahrens ist bei der Suche nach einem Fremdkörper als unsicher zu werten. Dies verdeutlichen auch die vorliegenden Ergebnisse. Gerade die sonografischen Untersuchungen sind als alleinige Methode zum Fremdkörpernachweis oder –Ausschluss unzureichend. Zum Fremdkörpernachweis ist die Sonografie vorwiegend in Kombination mit den konventionell bildgebenden Methoden erfolgt. Bei jedem vierten sonografierten Patienten erfolgte das Röntgen in zwei Ebenen, bei jedem dritten Patienten die Comberg-Methode.

Aber auch die Comberg-Methode ist häufig parallel zu anderen bildgebenden Untersuchungen eingesetzt worden. Die häufige Kombination mit dem Röntgen in einer oder zwei Ebenen lässt vermuten, dass die Comberg-Methode einen zusätzlichen Informationsgewinn bedeutet. Aufgrund der hohen Fremdkörperprävalenz und der hohen Anzahl von Paralleluntersuchungen mit einem Röntgen in einer oder zwei Ebenen ist die Comberg-Methode jedoch nur ergänzend durchgeführt worden. Zusätzlich wurde zu der Comberg-Aufnahme bei acht von zehn Patienten die Sonografie parallel eingesetzt. Bei jedem fünften Patienten, der durch die Comberg-Methode untersucht wurde, war gleichzeitig eine CT notwendig. Die hohe Anzahl von Mehrfachuntersuchungen verdeutlicht die Problematik der Comberg-Methode. Als alleiniges bildgebendes Verfahren ist diese für den Nachweis oder die Lokalisation eines Fremdkörpers unzureichend.

Die Möglichkeit der Lokalisation durch die zur Verfügung stehenden Verfahren wird unterschiedlich bewertet. Eine Bestimmung der Genauigkeit der Lokalisation durch die bildgebenden Modalitäten war in dieser Studie nicht möglich. Diesbezüglich finden sich jedoch einige Literaturergebnisse. Dass die Sonografie in der Lage ist, einen Fremdkörper gut zu lokalisieren zeigten Markl und Mitarbeiter. Die Sonografie erbrachte eine Übereinstimmung mit dem Operationsbefund von 79 % [44]. Weitere Studien konnten ebenfalls zeigen, dass die Sonografie einen hohen Beitrag in der Diagnostik von intraokularen Fremdkörpern leisten kann, indem sie nicht nur eine hohe Sensitivität und Spezifität aufweist, sondern dass die in der Sonografie beschriebene Lokalisation zu 95 % mit der in der operativen Revision beschriebenen Lokalisation des Fremdkörpers korreliert [47]. Eine wandnahe Lokalisation der Fremdkörper stellt aber eine diagnostische Herausforderung dar, da die Fremdkörper in der Sonografie als Wandirregularitäten falsch interpretiert werden können [61].

Wie eingangs schon beschrieben, ist mit dem Röntgen in ein oder zwei Ebenen eine exakte Lokalisation eines Fremdkörpers nicht möglich, da die Bulbuswand im Röntgen nicht bildgebend ist. Trommer und Kösling sehen deshalb konventionelle Röntgenaufnahmen aufgrund des gelieferten Summationseffektes als vermeidbare Strahlenbelastung, da eine exakte Lokalisation eines Fremdkörpers nicht möglich ist [65].

Klinische Untersuchungen zeigen, dass in 94 % der Fälle die Lokalisation des Fremdkörpers, welche durch das Comberg-Verfahren bestimmt wurde, mit dem klinischen Befund übereinstimmt. Als problematisch erwies sich die Lokalisation an der Blubuswand. Gleichzeitig ergibt sich zusätzlich eine Unsicherheit durch dislozierte Comberg-Schalen [4]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Markl et al, welche in 91 % der Fälle eine korrekte

Lagebeschreibung durch die Comberg-Methode nachweisen konnten [44]. Andere Autoren hingegen zeigen in nur 75 % der Fremdkörper eine ausreichende Genauigkeit [41].

Damit ist die Comberg-Methode in einigen Fällen als alleinige Methode überfordert, gerade bei Lokalisation der Fremdkörper im Sklerabereich. Ursache hierfür ist, dass die Comberg-Methode mit einer Bulbuslänge von 24 mm rechnet. Dadurch kann die Lokalisation skleranaher Fremdkörper problematisch sein, gerade bei verlängertem oder verkürztem Bulbus [67]. In diesen Fällen sollte zusätzlich eine Sonografie zur Bulbuslängenmessung durchgeführt werden [4].

Zur exakten Lokalisation eines Fremdkörpers, gerade bei metallischem Ursprung, ist die CT das Mittel der Wahl [9], begründet durch die hohe Sensitivität und die korrekte Lokalisation der Fremdkörper. Chacko et al geben im Experiment eine Übereinstimmung der mittels CT diagnostizierten Lage und der definitiven intra- oder extraokularen Lage von 91 % und 86 % für eine rekonstruierte Schichtdicke 1 mm und 3 mm in der Spiral-CT an. Bei größeren metallischen Fremdkörpern kann aufgrund der größeren Artefakte eine korrekte Lokalisation unsicher werden [9]. Weitere Autoren konnten in klinischen Studien nachweisen, dass durch die CT die exakte topographische Lagebestimmung möglich war, welche bei der operativen Revision des Fremdkörpers bestätigt wurde [59]. Papadopoulos und Mitarbeiter sowie Lakits und Mitarbeiter fanden eine Übereinstimmung bei allen Fremdkörperverletzungen [38, 53]. Einen Vergleich zwischen der in der CT beschriebenen Lage und der intraoperativen Lage eines Fremdkörpers konnten aufgrund der teilweise ungenauen Lagebeschreibung in den Operationsberichten in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt werden.

Obwohl die CT als Mittel der Wahl zur Lokalisation eines Fremdkörpers angesehen wird, kann auch die Lokalisation eines metallischen Fremdkörpers in der CT bei skleranaher Lage problematisch werden. Schwierigkeiten in der exakten Lagebestimmung aufgrund von Artefakten wurden gerade bei großen metallischen Fremdkörpern beschrieben [17]. Sowohl in der konventionellen, als auch in der Spiral-CT können Artefakte von metallischen Fremdkörpern über 1 x 1 mm Größe die genaue Lokalisation des Fremdkörpers als intra- oder extraokular verhindern [39]. Erschwerend kommt hinzu, dass metallische Fremdkörper in der CT häufig zu groß dargestellt werden, da die Größe der Darstellung von der Beziehung der Densität von Fremdkörper und Umgebung abhängt, weshalb eine Beurteilung im Knochenfenster erfolgen sollte [53].

Hilfreich für die Bestimmung der intra- oder extraokularen Lokalisation soll deshalb der Vergrößerungsfaktor sein. Für Eisen ergibt sich ein Faktor von 2,3, für Silber 1,77, für Kupfer 1,26 und für Aluminium 1,17 [7].

Für die Diagnostik und Therapie ist die Lokalisation eines Fremdkörpers von entscheidender Bedeutung. Nur ein Viertel der Fremdkörper ist im vorderen Augenabschnitt lokalisiert. Im Vergleich zu anderen Lagemöglichkeiten eines Fremdkörpers kann hier der klinische Nachweis und die Lokalisation noch relativ häufig an der Spaltlampe erfolgen. Prinzipiell wurden die bildgebenden Untersuchungen aus diesem Grund eher zurückhaltend eingesetzt. Eine Untersuchung ist vorwiegend durch die Sonografie und das Röntgen in zwei Ebenen erfolgt. Ein signifikanter Zusammenhang ließ sich jedoch nicht nachweisen, da diese Untersuchungsmethoden auch bei Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt oder extrabulbärer Lokalisation häufig eingesetzt wurden. Eine genauere Lokalisation des Fremdkörpers durch weitere bildgebende Verfahren war als nicht notwendig erachtet worden, die Lokalisationsverfahren wurden vermieden.

Der größte Teil der Fremdkörper ist im hinteren Augenabschnitt nachzuweisen [31, 42, 68]. Erschwerend kommt die häufige netzhautnahe Lage eines Fremdkörpers hinzu, wobei knapp ein Drittel der Fremdkörper in diesem Bereich lokalisiert sind. In der Studie von Greven et al liegen sogar 52 % der intraokularen Fremdkörper in der Nähe der Netzhaut [24]. Die genannten Lokalisationsmöglichkeiten sind insofern für die radiologische Diagnostik von Bedeutung, als dass die Fremdkörper häufig im hinteren Augenabschnitt zu suchen sind und zusätzlich eine Differenzierung zwischen intra- und extrabulbär notwendig werden könnte, gerade wenn sich die Fremdkörper in der Nähe der Retina befinden und somit nahe der Bulbuswand lokalisiert sind. In der vorliegenden Studie ist im Vergleich zu Fremdkörpern im vorderen Augenabschnitt ein häufigerer Einsatz der bildgebenden Methoden zu registrieren, da sich in diesem Rahmen häufiger Begleitverletzungen ereignen, die den Einblick in den hinteren Augenabschnitt erschweren und somit eine Bildgebung notwendig machen. Auch Woodcock et al zeigten einen häufigeren Einsatz von bildgebenden Verfahren bei Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt. 78 % der Patienten mit einem Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt erhielten ein bildgebendes Verfahren, bei Fremdkörper im vorderen Augenabschnitt waren es 58 % [68].

Besonderen Wert in der Fremdkörperdarstellung von im hinteren Augenabschnitt gelegenen Fremdkörpern wurde auf die Sonografie gelegt. Hier ließ sich ein signifikanter Zusammenhang nachweisen. Dieser erklärt sich durch das Auftreten von Glaskörpereinblutungen und Netzhautläsionen, die bei Fremdkörperverletzungen im hinteren Augenabschnitt entstehen. Durch die Sonografie konnten zum einen eine Fremdkörperdarstellung und -lokalisierung erfolgen. Gleichzeitig war eine Beurteilung der Begleitverletzungen möglich.

Das Röntgen der Orbita in zwei Ebenen wurde an der Universitäts-Augenklinik zu Rostock am häufigsten bei Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt und extrabulbären Fremdkörpern eingesetzt. Ein signifikanter Zusammenhang ließ sich hierfür allerdings nicht nachweisen, da auch bei Fremdkörpern im vorderen Augenabschnitt dieses Verfahren bei fast jedem Dritten Patienten eingesetzt wurde. De Souza et al registrierten einen Einsatz der konventionellen Röntgenmethoden bei 29 % der Patienten mit einem Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt. Allerdings erhielten Patienten in der Studie von De Souza und Mitarbeiter in 49 % der Fälle eine CT [13]. Dies erklärt den geringeren Einsatz der konventionellen Methoden im Vergleich zu der vorliegenden Studie.

Neben der Sonografie wurde das Röntgen der Orbita nach Comberg signifikant häufig bei Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt eingesetzt. Dieser hohe Einsatz der Comberg-Methode könnte auf einen zusätzlichen Informationsgewinn bezüglich der Lokalisation eines Fremdkörpers hindeuten, gerade im Hinblick auf die hohe Fremdkörperprävalenz und der hohen Anzahl der durchgeführten Paralleluntersuchungen. Allerdings soll nochmals auf die häufig gleichzeitig eingesetzte Sonografie und CT hingewiesen werden, wodurch die Comberg-Methode bezüglich eines exakten Nachweises eines Fremdkörpers und dessen exakter Lokalisation unzureichend scheint. Zwar konnte ein signifikanter Einsatz der Comberg-Methode bei Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt nachgewiesen werden, allerdings ergab sich dieser auch dadurch, dass die Comberg-Methode bei allen anderen Fremdkörperlokalisationen vernachlässigt eingesetzt wurde. Es muss berücksichtigt werden, dass 45,10 % der Patienten mit einem Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt durch diese Methode bildgebend untersucht wurden. Damit war bei dem größeren Teil der Patienten zum einen eine Comberg-Methode nicht notwendig, zu anderen die Kombination des Röntgens in einer oder zwei Ebenen und der Sonografie ausreichend.

Für extrabulbär gelegene intraorbitale Fremdkörper ließ sich ein signifikanter Zusammenhang zur CT nachweisen, wobei häufig vor der CT andere radiologische Verfahren verwendet wurden, mit denen der Verdacht geäußert werden konnte, dass ein Fremdkörper außerhalb des Bulbus gelegen war. Die Durchführung einer CT wird empfohlen um die Lagebeziehung des extrabulbären Fremdkörpers zum Sehnerven, Bulbus und der Orbitabegrenzung zu beurteilen, aber auch, um eine intrakranielle Lage auszuschließen. Das weitere therapeutische Vorgehen ist abhängig von der diagnostizierten Lage, aber auch von einer vorhandenen Umgebungsreaktion. Durch die Beurteilung der Orbita im Weichteil- und Knochenfenster besteht die Möglichkeit die Verletzungen darzustellen sowie die Erreichbarkeit der

extraokularen Fremdkörper zu beurteilen, weshalb die CT von einigen Autoren nach okularem Trauma als Standard angesehen wird [21, 38].

Die vielfältigen Komplikationen eines Fremdkörpers erfordern in der Regel die Extraktion. In der Vergangenheit sind metallische Fremdkörper vorwiegend durch einen extraokularen Magneten entfernt worden. Heute steht die Pars Plana Vitrektomie zur Verfügung, die eine sichere Entfernung des Fremdkörpers und die Therapie der Begleitverletzungen gewährleistet. Durch die Einführung der Pars Plana Vitrektomie konnte die Prognose von intraokularen Fremdkörperverletzungen unbestritten verbessert werden. Welchen Stellenwert die Pars Plana Vitrektomie in der heutigen Zeit einnimmt, zeigen auch die vorliegenden Ergebnisse.

Insgesamt 88 % der Fremdkörper sind an der Augenklinik Rostock entfernt worden. Vergleichbare Ergebnisse sind in der Arbeit von Greven et al zu finden [24]. Die Extraktion der Fremdkörper erfolgte an der Universitätsaugenklinik Rostock zu 43 % durch die Vitrektomie und 30 % direkt chirurgisch. Die Magnetextraktion ist bei 13 % der Patienten erfolgt. In der Vergleichsarbeit von Hempel wurde die Vitrektomie bei 19 %, die direkt chirurgische Extraktion bei 42 % und die Magnetextraktion bei 24 % der Patienten eingesetzt. In verschiedenen aktuellen Studien, die das operative Vorgehen bei intraokularen Fremdkörpern analysierten, erfolgte die Entfernung der Fremdkörper in bis zu 88 % durch eine Pars Plana Vitrektomie [13]. El Asrar et al entfernten sogar in 94 von 96 Fällen Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt mittels der Pars Plana Vitrektomie [16].

Die Notwendigkeit einer bildgebenden Diagnostik und die Lokalisation eines intraokularen Fremdkörpers wird gerade seit Einführung der Pars Plana Vitrektomie unterschiedlich bewertet. Die Analyse der eingesetzten bildgebenden Diagnostik in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Operationsverfahren zur Entfernung eines Fremdkörpers ergab, dass die Bildgebung bei der Pars Plana Vitrektomie in der Gesamtzahl häufiger eingesetzt wurde, als bei den anderen Extraktionsmethoden.

Einen äußerst wichtigen Bestandteil in der Diagnostik von Fremdkörpern, welche durch die Vitrektomie entfernt wurden, machte die Sonografie aus. Rund 80 % Patienten erhielten eine sonografische Untersuchung des Auges. Dieser hohe Einsatz der Sonografie erklärt sich durch den Nachweis von Begleitverletzungen, die eine operative Therapie notwendig machen, wie beispielsweise eine Netzhautablösung oder eine Glaskörpereinblutung. Die Therapie wird bei diesen Verletzungen nur durch die Pars Plana Vitrektomie ermöglicht. In der vorliegenden Studie wurden jedoch nur sonografische Untersuchungen berücksichtigt, welche auch das Ziel einer Fremdkörperdarstellung zum Ziel hatten.

Im Rahmen einer Magnetextraktion wurde die Sonografie bei 54 % der Patienten eingesetzt. Ein signifikanter Unterschied ergab sich im Vergleich zur Pars Plana Vitrektomie nicht. Erst im Vergleich der Gruppe Pars Plana Vitrektomie mit sämtlichen anderen Extraktionsverfahren inklusive der Magnetextraktion konnte für den Einsatz der Sonografie ein signifikanter Zusammenhang zur Pars Plana Vitrektomie hergestellt werden. Damit scheint die Sonografie in der Fremdkörperdiagnostik und in der Lokalisation bei der Pars Plana Vitrektomie genauso wichtig wie bei der Magnetextraktion. Vergleichbare Studienergebnisse liegen nicht vor.

Das Röntgen in einer oder zwei Ebenen wurde bei den unterschiedlichen Extraktionsmethoden annähernd gleich häufig eingesetzt. Damit ergab sich auch für die Pars Plana Vitrektomie keine andere Anforderung in der Diagnostik.

In der vorliegenden Studie wurde hingegen auch bei der Pars Plana Vitrektomie bei 57,1 % der Patienten eine Untersuchung durch die Comberg-Methode als notwendig erachtet. Ein signifikanter Unterschied zur Gruppe von Patienten, die eine Extraktion mittels Magneten erhielten (45,5 %) ergab sich nicht. Erst der Vergleich des Einsatzes der Comberg-Methode im Rahmen der Pars Plana Vitrektomie mit allen anderen Extraktionsmethoden ergab einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Pars Plana Vitrektomie und der Comberg-Methode. Unter der Annahme, dass die Comberg-Methode zur exakten Lokalisation eines Fremdkörpers eingesetzt wurde, besteht nach den vorliegenden Ergebnissen kein wesentlicher Unterschied in der notwendigen Diagnostik und der Lokalisation von Fremdkörpern, die durch die Pars Plana Vitrektomie oder durch den Magneten entfernt wurden.

Direkt vergleichbare Ergebnisse liegen in der aktuellen Literatur nicht vor. Mester und Kuhn verglichen in einer Studie die Ergebnisse bei Fremdkörperverletzungen nach der Extraktion durch den Magneten und durch die Pars Plana Vitrektomie. Allerdings war das primäre Ziel der Studie nicht die Bestimmung der Notwendigkeit der bildgebenden Diagnostik bei diesen Therapieverfahren. In der genannten Studie wurden alle Patienten, deren Fremdkörper durch einen Magneten extrahiert wurde, konventionell bildgebend untersucht, einschließlich der Comberg-Methode. In der Vitrektomie-Gruppe erhielt kein Patient eine Comberg-Untersuchung, dafür wurden 62 % der Patienten in ein oder zwei Ebenen geröntgt [48]. Die Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass eine Lokalisation eines Fremdkörpers im Rahmen der Extraktion durch die Pars Plana Vitrektomie weniger notwendig wird, auch wenn die genannten Ergebnisse den vorliegenden bezüglich der Häufigkeit des Einsatzes der Comberg-Methode widersprechen.

Dass keine exakte Lokalisation eines Fremdkörpers erfolgen muss, wird in der aktuellen Studie dadurch verdeutlicht, dass bei 37 % der Patienten, welche eine Pars Plana Vitrektomie erhielten, weder eine Comberg-Untersuchung noch eine CT notwendig war. Gleichzeitig wurden 17% der vitrektomierten Patienten computertomografisch untersucht. Wäre eine exakte Lokalisation eines Fremdkörpers zwingend erforderlich, wäre der logistische Aufwand viel häufiger betrieben worden.

Die unterschiedlichen Extraktionsmethoden ergaben für die notwendige Diagnostik und Lokalisation anhand der vorliegenden Ergebnisse keinen wesentlichen Unterschied. Auch bei der Fremdkörperextraktion durch Pars Plana Vitrektomie ist eine gewisse Lokalisation eines Fremdkörpers wünschenswert, erkennbar an dem häufigen Einsatz der Sonografie und der Comberg-Methode. Die Lokalisation des Fremdkörpers ist aber auch nicht so zwingend erforderlich, dass in jedem Fall eine Comberg-Methode oder eine CT durchgeführt werden muss. Die Diagnostik sollte die Lagebestimmung des Fremdkörpers innerhalb oder außerhalb des Bulbus ermöglichen, damit der Operateur bei unübersichtlichem Operationssitus nicht nach einem Fremdkörper suchen muss oder von diesem überrascht wird. Die CT sollte den Fällen vorbehalten bleiben, in denen die konventionelle Bildgebung und die Sonografie bezüglich eines Fremdkörpernachweises und Lokalisation keine ausreichende Abhilfe leisten oder nicht durchgeführt werden kann [43, 47]. Bestätigt werden die vorliegenden Ergebnisse durch Kuhn und Mitarbeiter. Vor der Entwicklung der Vitrektomie mussten nicht sichtbare Fremdkörper exakt lokalisiert werden. Mit der Einführung der Vitrektomie war laut Kuhn et al eine sehr exakte Lokalisation nicht mehr notwendig. Als Grund hierfür wird angegeben, dass intraokulare Fremdkörper intraoperativ häufig an einem anderen Ort aufgefunden werden, als in der präoperativen Diagnostik angegeben, da die Untersuchungen in einer anderen Körperlage als während der OP durchgeführt werden. Zum anderen kann sich die Lage des Fremdkörpers durch Bewegung weiter verändern [33].

Mit der Entwicklung der Vitrektomie ist der Zugangsweg und die Technik zur Entfernung des Fremdkörpers unabhängig von der Lokalisation eines Fremdkörpers geworden, während der Zugangsweg bei der Entfernung mittels extraokularen Magneten abhängig von der Lokalisation des metallischen Fremdkörpers ist [34]. Bei einer Vitrektomie wird unter Sicht gearbeitet, durch eine Zange oder einen intraokularen Magneten, welche zum Fremdkörper hingeführt werden, kann dieser entfernt werden. Dadurch wird die exakte präoperative Lagebestimmung nicht mehr notwendig. Anders verhält es sich bei der Entfernung der Fremdkörper durch die extraokularen Magneten. Hier war eine exakte Lokalisation notwendig, da hiervon der Zugangsweg zur Entfernung des Fremdkörpers abhing. Ist ein

Fremdkörper im hinteren Augenabschnitt lokalisiert, wird der Zugangsweg möglichst nah am Fremdkörper gewählt, da durch das Arbeiten mit einem extraokularen Magneten der metallische Fremdkörper unkontrolliert durch das Auge wandert, wodurch sich eine weitere Verletzungsgefahr ergibt [33].

Andere Autoren sind sich dagegen einig, dass die präzise Detektion und Lokalisation eines Fremdkörpers in der Orbita vor der operativen Revision notwendig wird, da hiervon die Vorgehensweise bei der Extraktion abhängt [7, 38]. Dabei ist laut einigen Autoren für den Nachweis und die präzise Lokalisation die CT als Methode der Wahl anzusehen [37, 53]. Laut einem Review von Yeh und Mitarbeiter ist die bildmorphologische Beurteilung des Fremdkörpermaterials und der Größe wichtig, damit die Entfernung des Fremdkörpers über einen intraokularen Magneten oder die Pinzette/Zange geplant werden kann [71].

Entscheidend für die bildgebenden Verfahren ist nicht nur die Möglichkeit der Lokalisation eines möglichen Fremdkörpers, sondern auch der sichere Nachweis oder Ausschluss eines Fremdkörpers. Jedes bildgebende Verfahren besitzt in der Darstellung von Fremdkörpern seine eigenen Grenzen, weshalb sich auch in der vorliegenden Studie unterschiedliche Gütekriterien ergeben. Die Sonografie weist mit 77 % eine gute Sensitivität und mit 92 % eine hohe Spezifität auf, so dass durch sonografische Untersuchungen häufig ein Fremdkörpernachweis gelang. Die eingeschränkte Sensitivität der Sonografie in der vorliegenden Studie ergab sich durch die Einbeziehung von extraokularen Fremdkörpern, bei denen die Darstellbarkeit durch die Sonografie bekanntermaßen eingeschränkt ist [65]. Richtig eingesetzt kann für die Sonografie eine höhere Treffsicherheit bestimmt werden. Dies zeigen Rubsamen und Mitarbeiter, die in einer klinischen Studie die Darstellbarkeit von Fremdkörpern in der Sonografie untersuchten, die im hinteren Augenabschnitt lagen und durch eine Pars Plana Vitrectomie entfernt wurden. Dabei konnte für die Sonografie eine Sensitivität und Spezifität von jeweils 100 % nachgewiesen werden [56]. Shiver und Mitarbeiter weisen in einem Experiment an Schweineaugen eine Sensitivität von 88 % und eine Spezifität von 96 % der Sonografie für metallische Fremdkörper nach [61]. Die guten Ergebnisse der Sonografie mit hoher Sensitivität und Spezifität sowohl in der vorliegenden Studie als auch in der internationalen Literatur machen die Sonografie zu einem wichtigen Bestandteil in der Fremdkörperdiagnostik. So ist die Sonografie dem konventionellen Röntgen in der Darstellung von Plexiglas, Graphit oder Holz signifikant überlegen. Die Sensitivität für Metall und Glas lag in einer experimentellen Studie von Bryden und Mitarbeitern ebenfalls höher als bei dem konventionellen Röntgen (97 % und 77 % für Glas, 88 % und 69 % für Metall) [8], jedoch ergibt sich eine Änderung des Schallwiderstandes

auch an anderen Grenzflächen, so dass Verwechslungen mit Luft oder Glaskörperverdichtungen beschrieben worden sind [8, 47]. Zusätzlich ergeben sich Schwierigkeiten im Rahmen von Irregularitäten der Bulbuswand [32], die als falsch positives Ergebnis gewertet werden können. Von wesentlicher Bedeutung ist ebenfalls die alleinige Darstellung der vorderen zwei Drittel der Orbita, so dass ein extrabulbärer Fremdkörper der Untersuchungsmethode entgehen kann [65].

Die weiterführenden Berechnungen der vorliegenden Arbeit verdeutlichen die Problematik der Fremdkörperdarstellung in der Sonografie. Für den Patienten ist der positive Vorhersagewert in der Hinsicht von Bedeutung, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, bei einem positiven Fremdkörpernachweis tatsächlich auch einen Fremdkörper zu haben. Durch die oben genannten Unsicherheiten ergab sich für den positiven Vorhersagewert eine Wahrscheinlichkeit von 89 %, der im Vergleich zu den anderen bildgebenden Verfahren erniedrigt ist, da der Großteil der Fremdkörper radiologisch bildgebend war.

Bryden und Mitarbeiter empfehlen aufgrund der hohen Sensitivität der Sonografie von 93 % bei sämtlichen Fremdkörpern eine sonografische Untersuchung bei Patienten mit kleinen Wunden des Augapfels und dem Verdacht auf einen intraokularen Fremdkörper [8]. Die Ultraschalluntersuchung des Auges ist jedoch als alleinige Untersuchungsmethode überfordert und sollte durch weitere bildgebende Methoden ergänzt werden. Rubsamen et al sehen die Sonografie trotz der hohen Sensitivität und Spezifität eher als Zusatz zur CT und dem konventionellen Röntgen in der Fremdkörperdiagnostik [56]. Ähnliches Vorgehen wird von McNicholas und Mitarbeiter empfohlen aufgrund der oben genannten Verwechlungsmöglichkeit mit Luft [47]. Dieses Vorgehen wird durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bestätigt.

Für das Röntgen der Orbita in einer Ebene ergab sich eine Fremdkörperprävalenz von 17 %, für das Röntgen der Orbita in zwei Ebenen eine Prävalenz von 40 %. Dies verdeutlicht den Einsatz dieser Methode als Screeningmethode für den Ausschluss eines Fremdkörpers. Die Sensitivität von 75 % und 88 % des Röntgen der Orbita in einer und zwei Ebenen bestätigt den hohen diagnostischen Wert der beiden Untersuchungsmodalitäten. Höhere Werte für die Sensitivität sind in der ebenfalls klinischen Studie von Saeed et al zu finden, in der für das konventionelle Röntgen eine Sensitivität von 96 % und eine Spezifität von 99 % nachgewiesen wurden. Der positive Vorhersagewert betrug 96 %, der negative Vorhersagewert 99 % [57], so dass die vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden. Gleichzeitig liegt eine ähnliche Fremdkörperprävalenz vor wie bei der Sonografie oder weit darunter, so dass eine hohe Testgüte vorliegt. Der Vorteil der konventionellen Methoden wird zusätzlich

durch die hohe Spezifität offenbart. Ein dargestellter Fremdkörper ist fast immer ein Fremdkörper. Einen Schwellenwert, ab dem metallische Fremdkörper im konventionellen Röntgen nachweisbar sein sollten, geben Otto et al mit einer Größe von  $0,12 \text{ mm}^3$  an [52].

Trotz der hohen Sensitivität müssen die Limitationen der konventionellen bildgebenden Verfahren bekannt sein und die Anamnese bezüglich des Fremdkörpermaterials beachtet werden, damit keine unnötige Strahlenbelastung entsteht. Für das konventionelle Röntgen wurde nachgewiesen, dass Glas, Metall und Graphit klar darstellbar sind, im Gegensatz zu Plastik und frischem Holz [36]. Bryden et al konnten in ihrer Studie für das konventionelle Röntgen nur eine Sensitivität von 69 % für metallische und für Glas von 77 % nachweisen. In dem Experiment entgingen dem Röntgen nicht unbedingt nur die kleinen Fremdkörper. Bei anderen Materialien wie Plexiglas, Graphit oder Holz lag die Sensitivität teilweise weit unter 15 % [8]. Im Vergleich zu der vorliegenden Studie ist die Sensitivität der konventionellen Verfahren dadurch deutlich geringer. Allerdings waren viele Fremdkörper metallischen Ursprungs und damit bildgebend. Andere Materialien waren von der Anzahl seltener, konnten aber durch das Röntgen nicht nachgewiesen werden.

Zusätzlich zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Studie sowie die Ergebnisse von Bryden und Mitarbeiter [8], dass selbst Materialien, welche eigentlich bildgebend sind, in den konventionellen Methoden nicht immer korrekt dargestellt werden müssen. Hadden berichtet ebenfalls von einem Patienten mit einem im Vorderkammerwinkel gelegenen metallischen Fremdkörper, welcher durch Arbeiten mit dem Hammer entstand. Dieser Fremdkörper entging der Röntgenaufnahme in einer Ebene [27]. Auch McElvanney und Fielder berichten über einen Patienten, bei dem zweimal ein Röntgen der Orbita durchgeführt wurde, welche einen metallischen Fremdkörper nicht darstellen konnten. Der Fremdkörper war schließlich mittels Sonografie nachweisbar [45].

Für die Comberg-Methode ergab sich eine höher Sensitivität und Spezifität als bei den anderen konventionellen Methoden. Den Grund hierfür liefert die Fremdkörperprävalenz, welche bei ungefähr 90 % liegt. Dies bedeutet, dass diese Methode zum Großteil eingesetzt wurde, wenn auch tatsächlich ein Fremdkörper vorhanden war. Die hohe Prävalenz ergibt sich durch den vorhergehenden Nachweis der Fremdkörper durch andere bildgebende Methoden. Dadurch erklärt sich ebenso die hohe Sensitivität und Spezifität, denn durch den Nachweis eines röntgenpositiven Fremdkörpers im Röntgen in einer oder zwei Ebenen wird dieser ebenfalls mittels Comberg-Methode darstellbar sein. Die hohe Fremdkörperprävalenz deutet aber andererseits darauf hin, dass die Comberg-Methode nur ergänzend zu anderen Untersuchungen eingesetzt wurde. Ob das Verfahren nur zur Anwendung kam, weil parallel

gearbeitet werden konnte, kann retrospektiv nicht beurteilt werden. Hinzu kommt die schon oben erwähnte räumliche Trennung der Augenklinik von dem CT-Gerät, so dass aufgrund des logistischen Aufwandes eher auf eine Comberg-Methode zurückgegriffen wurde, falls ein Fremdkörper lokalisiert werden sollte. Vergleichende Untersuchungen bezüglich der Sensitivität und Spezifität liegen in der aktuellen Literatur nicht vor, da das Verfahren als überaltet gilt. Prinzipiell sollten aber ähnliche Ergebnisse wie bei dem Röntgen in einer oder zwei Ebenen zu erwarten sein.

Unbestritten ist der hohe Stellenwert der CT in der Diagnostik von Fremdkörperverletzungen. Auch in der vorliegenden Studie konnte eine hohe Nachweisrate bzw. eine hohe Testgüte nachgewiesen werden. Die Sensitivität und Spezifität für Fremdkörper lag bei 100 %. Zu gleichen Ergebnissen kommen Saeed und Mitarbeiter, die in ihrer klinischen Studie ebenfalls für die CT eine Sensitivität, eine Spezifität und einen positiven und negativen Vorhersagewert von jeweils 100 % ermittelten [57]. Neben der Darstellung von auch nicht metallischen Fremdkörpern werden diese hohen Werte auch die geringe Nachweisgrenze von Fremdkörpern erreicht. In verschiedenen experimentellen Studien wurde versucht, die Größe von metallischen Fremdkörpern zu bestimmen, ab der ein Nachweis sicher gelingen sollte. So konnte für Fremdkörper ab einer Größe über  $0,06 \text{ mm}^3$  eine Sensitivität von 100 % nachgewiesen werden [9]. Ein Nachweis von Eisenspänen in der CT sollte laut Trommer et al sogar ab einer Größe von  $0,04 \text{ mm}^3$  mit Sicherheit gegeben sein [65].

Aufgrund der hohen Sensitivität, der Möglichkeit der exakten Lagebestimmung, der Untersucherunabhängigkeit und der einfachen Durchführung wird durch einige Autoren zu einer computertomografischen Untersuchung bei jedem Fremdkörperverdacht bzw. traumatischen Verletzung der Orbita geraten [21, 38, 65, 71]. Der Einsatz der CT erfolgte an der Universität zu Rostock vorwiegend bei Patienten mit extrabulbär gelegenen bzw. belassenen Fremdkörpern. Zusätzlich wurden computertomografische Untersuchungen bei unklaren Befunden oder widersprüchlichen Ergebnissen der anderen bildgebenden Verfahren durchgeführt. Aufgrund des logistischen Aufwandes durch die räumliche Trennung der Universitätsaugenklinik Rostock vom Computertomografen ist eine entsprechende Untersuchung zum Fremdkörpernachweis im Vergleich zu anderen Studien weit weniger häufig erfolgt [21].

Entgegen den oben genannten Empfehlungen bei jedem Fremdkörperverdacht eine CT durchzuführen, verdeutlicht der geringere Einsatz der CT in der vorliegenden Studie, dass nicht jeder Fremdkörper bzw. Fremdkörperverdacht computertomografisch untersucht werden muss und andere bildgebende Verfahren in den meisten Fällen ausreichend sind.

Aufgrund der in der vorliegenden und in den internationalen Studien nachgewiesen hervorragenden Werte für die CT sollte theoretisch ein Fremdkörpernachweis in allen Fällen gelingen. Letztlich ergeben sich aber auch für die CT Unsicherheiten. Gerade klinische Erfahrungsberichte zeigen, dass eine Darstellung der Fremdkörper aus verschiedenen Ursachen nicht immer gelingt. McElvanney und Alistair berichten über einen Patienten mit drei ferromagnetischen Fremdkörpern von bis zu 1 x 0,5 mm Größe im Auge, die in der CT nicht darstellbar waren [45]. Als Ursache kann die Augenbewegung bei der Untersuchung genannt werden [3]. Auch Wu et al berichten über einen 1 x 1 x 1 mm großen Fremdkörper mit Lokalisation in der Linse. Der Fremdkörper war in der CT nicht bildgebend und hatte eine Siderosis zur Folge [69].

Diese Fallbeispiele verdeutlichen, dass trotz der hohen Testgüte selbst die CT im Fremdkörpernachweis fehlerbehaftet sein kann.

### **7.3. Methodendiskussion experimentelle Studie**

Die Darstellbarkeit von hölzernen Fremdkörpern in der CT und der MRT bringt erhebliche Schwierigkeiten mit sich. In den zur Verfügung stehenden Studien von Fallbeispielen und Experimenten zur Darstellung von intraorbitalen Holzfremdkörpern ist bezüglich der magnetresonanztomografischen Untersuchungen nur mit einer niedrigen Magnetfeldstärke gearbeitet worden. Damit stellt sich die Frage, ob ein stärkeres Magnetfeld einen Vorteil in der Darstellung von hölzernen Fremdkörpern erbringen kann. Um die Testgüte der bildgebenden Verfahren bestimmen und vergleichen zu können, musste ein geeignetes Modell gefunden werden, mit dem die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Darstellbarkeit herausgearbeitet werden konnten. Idealerweise sollte sich ein solches Modell leicht auf die menschlichen Gegebenheiten übertragen lassen.

Für die Auswahl der Agarmasse zur Darstellung der nicht fetthaltigen intraokularen Strukturen sprach nicht nur die einfache Herstellung. Ein wesentlicher Vorteil ergab sich durch die ähnliche computer- und magnetresonanztomografische Darstellung der Agarmasse im Vergleich zu den Strukturen der Orbita. Zusätzlich imponierte die Agarmasse in der CT und der MRT durch Verklumpungen nicht homogen und zeigte Verdichtungen. Die Zusammenlagerungen von Agar-Pulver imponierten in der CT als hypodense und in der MRT als hypointense Struktur, so dass bei der Auswertung der Ergebnisse eine Differenzierung zwischen einem Fremdkörper und einer Zusammenlagerung von Agar-Pulver häufig schwierig war. Dadurch war eine Übertragung auf menschliche Gegebenheiten vorhanden, da zwischen Fremdkörper und anderen Strukturen unterschieden werden musste.

Das gleichzeitige Vorkommen von Lufteinschlüssen war in den ersten Experimenten mit einer Agar-Konzentration von 4 % oder höher zunächst als störend empfunden worden und vereinfachte die Auffindung der Fremdkörper, da sich die Luft vor allem um diese lokalisierte. Bei einer Konzentration der Agarmasse von 2 % war diese in der Verarbeitung dünnflüssiger, so dass vorhandene Lufteinschlüsse sich nicht mehr um die Fremdkörper lagerten. Es waren jedoch ausreichend Lufteinschlüsse vorhanden, die eine Differenzierung von einem Fremdkörper für die Radiologen schwierig machten. Dies war auch für unsere Experimente von wesentlicher Bedeutung, da im Literaturstudium eine häufige Verwechslung von Holzfremdkörpern mit Luft in den bildgebenden Verfahren auffiel.

Die Beimengung von Blut zu der Agarmasse ergab im Vergleich zu der reinen 2 %igen Mischung sowohl in der Darstellung in der CT als auch in der MRT keinen wesentlichen Unterschied, weshalb auf diesen Versuchsaufbau verzichtet wurde.

Für die Simulierung des fettreichen Gewebes der Orbita wurde Schweineschmalz verwendet. Auch hier erbrachten die computer- und magnetresonanztomografischen Untersuchungen Lufteinschlüsse, die eine Differenzierung zu Holz schwierig machten, was ebenfalls in dem Experiment gewünscht war. Durch die ähnliche Darstellbarkeit und die Verdichtungen in der Agarlösung und die Lufteinschlüsse in der Fett- sowie Agarmasse war eine Übertragbarkeit auf die Orbita gegeben, weshalb sich für diesen Versuchsaufbau entschieden wurde.

Um die Anzahl der Fremdkörper im Experiment zu begrenzen, wurde sich auf die am häufigsten vorkommenden Holzarten konzentriert. Exemplarisch wurden ein Hart- und ein Weichholz ausgewählt, um einen möglichen Einfluss auf die Darstellbarkeit zu verdeutlichen. Durch die vielen unterschiedlichen Holzarten mit unterschiedlicher Zusammensetzung besteht durchaus die Möglichkeit, dass andere Holzarten anders zur Darstellung kommen als die ausgewählten.

Bisher waren in den durchgeführten Studien relativ große Holzfremdkörper verwendet worden. Um eine sichere Nachweisgrenze zu bestimmen, wurden Fremdkörper mit geringer Größe angefertigt und in den unterschiedlichen Modalitäten untersucht. Obwohl bei der Herstellung der kleinen Fremdkörper gewissenhaft gearbeitet wurde, konnten die Fremdkörper nur annähernd in der angegebenen Größe hergestellt werden. Da die Fremdkörper nicht maschinell geschaffen wurden, besitzen sie somit keine exakte oder standardisierte Größe.

Um nicht an einzelnen Fremdkörpern durch eine einmalige bildgebende Bestätigung eines Fremdkörpers die Nachweisgrenze zu bestimmen, wurden mehrere kleine Fremdkörper gleicher Größe hergestellt und die Untersuchungen durchgeführt. Damit konnte

ausgeschlossen werden, dass ein einzelner kleiner Fremdkörper nur durch Zufall entdeckt wurde. Allerdings bestand durch die hohe Anzahl der Fremdkörper in der Untersuchung aber auch ein gewisser Lerneffekt bei den Radiologen, so dass in den zuletzt vorgelegten Untersuchungen häufig mehr Fremdkörper nachgewiesen wurden. Die Bewertung durch mehrere Radiologen sollte die Reproduzierbarkeit und Untersucherunabhängigkeit ermöglichen.

Für die experimentelle Studie wurden vor der eigentlichen Studie Untersuchungen zur Darstellbarkeit der Fremdkörper mit unterschiedlichen Untersuchungsprotokollen in der 1,5 T und 3 T MRT durchgeführt. Für die 1,5 T MRT wurde im eigentlichen Experiment schließlich die T1-gewichtete Sequenz mit TE 21 msec/TR 700 msec verwendet, für die 3 T MRT wurde sich für die Verwendung einer T1-gewichteten Sequenz mit TE 18 msec/TR 700 msec entschieden. Die gewählten Einstellungen waren in der vorliegenden Studie durch gute Darstellbarkeit der Fremdkörper Erfolg versprechend, allerdings bestand ebenfalls die Möglichkeit, dass in anderen Sequenzen Fremdkörper möglicherweise noch besser zur Darstellung kommen. Die Wahl auf die T1-gewichtete Sequenz ergab sich durch die kürzeren Untersuchungszeiten, welche in der Klinik von großer Relevanz sind, da im klinischen Alltag die Häufigkeit von Bewegungsartefakten reduziert werden kann. Auch Glatt und Mitarbeiter empfehlen ebenfalls die Durchführung einer T1-gewichteten Sequenz aus den genannten Gründen [22].

#### **7.4. Ergebnisdiskussion experimentelle Studie**

In der internationalen Literatur existieren zahlreiche Kasuistiken, in denen die Schwierigkeiten in der bildgebenden Darstellung von Holzfremdkörpern beschrieben werden. Dabei weist jedes bildgebendes Verfahren erhebliche Unsicherheiten auf, wodurch unterschiedliche Empfehlungen zum Nachweis des hölzernen Fremdkörpers gegeben werden. Berücksichtigt wird bei allen Empfehlungen, dass ein hölzerner Fremdkörper in keiner Bildgebung optimal darstellbar ist und gegebenenfalls auf ein anderes Verfahren ausgewichen werden muss. So schildern Lakshmanan und Mitarbeiter einen klinischen Fall, in dem ein Patient in einen Busch gefallen war. Die durchgeführte CT erbrachte eine ovale Gasansammlung, die als Eiter interpretiert wurde. In der Folge wurde eine Drainage angelegt und es kam schließlich zu einer spontanen Exploration eines 3 cm langen Fremdkörpers. Da die CT den Holzfremdkörper nicht eindeutig darstellen konnte, schlussfolgerte man, dass eine MRT bei einem Verdacht auf einen Holzfremdkörper eingesetzt werden sollte. In der Studie

wurde diese Untersuchung jedoch nicht durchgeführt, so dass kein Vergleich zur MRT besteht [40].

Ein ähnlicher Fall wird durch Edgington und Mitarbeiter beschrieben, die eine CT bei einem Waldarbeiter durchführten. Dieser wurde von einem großen Holzstück am Auge getroffen. Die CT zeigte eine Fraktur des Orbitabodens, der medialen Orbitawand und eine Aufhellung im unteren Bereich der Orbita. In einer OP konnte aus diesem Bereich ein Holzstück entfernt werden. Dieser Fall verdeutlicht die notwendige Differenzierung zwischen Holz und Luft, da durch die Verletzung von angrenzenden Nasennebenhöhlen ebenfalls Luft in die Orbita gelangen kann. Zusätzlich konnte ebenso gezeigt werden, dass Holzfremdkörper eine ähnliche Dichte aufweisen wie das umliegende Gewebe. Die Autoren empfehlen zuerst eine computertomografische Untersuchung. Erst dann sollte nach Ausschluss eines metallischen Fremdkörpers die MRT erfolgen [14]. Ein gleiches Vorgehen wird durch Dalley et al und Lagalla et al empfohlen [11, 36].

In einer weiteren klinischen Fallbeschreibung von Ho und McGuckin stellte sich das Holz im periorbitalen Fettgewebe als hypodenses Areal mit hyperdenser Umgebungsreaktion dar. In einer anschließend durchgeführten 1,5 T MRT zeigte sich das genannte Areal hypointens zu Fett, aber isodens zu Luft, was eine Differenzierung schwierig machte. Aus diesem Grund wird zur Durchführung einer CT geraten, da in diesem Fall die Fensterung hilfreich war, den Fremdkörperverdacht zu erhärten [30]. Bestätigt werden diese Ergebnisse durch eine experimentelle Studie, in der trockenes und frisches Kiefernholz jeweils in Fett und Serumalbumin platziert und anschließend Untersuchungen durch eine CT und eine 1,5 T MRT durchgeführt wurden. Eine Differenzierung zwischen Gas und Holz gelang in der MRT nicht, was aber die CT ermöglichte [46]. Die verwendeten Fremdkörper waren jedoch 7 x 3 cm beziehungsweise 4 cm groß. Anhand welcher Kriterien die Bewertung erfolgte, wird nicht geschildert.

In einer weiteren Fallbeschreibung mit einem hölzernen Fremdkörper konnte die CT eine hypodense Zone nachweisen, welche als Luft falsch interpretiert wurde. Umgeben war diese Zone von einer mit leicht erhöhter Densität. In der anschließend durchgeführten MRT konnte der Fremdkörper schließlich nachgewiesen werden, so dass eine MRT verbunden mit einer CT bei einem Unfall mit Holz empfohlen wird [62].

Diese Fallbeispiele verdeutlichen die unterschiedliche Darstellung von Holz in den bildgebenden Verfahren. In der vorliegenden Studie waren die hölzernen Fremdkörper in den computertomografischen Untersuchungen größtenteils hypodens darstellbar. Allerdings stellten sich vereinzelte Fremdkörper auch hyperdens dar. Dies betraf sowohl Fremdkörper

aus Eiche als auch Kiefer, unabhängig von deren Größe. Weshalb sich die Fremdkörper ungleich in der CT darstellen, bleibt letztlich unklar. Die Messung von unterschiedlichen Dichtewerten von Holz in der CT ist jedoch bekannt [55]. Sogar innerhalb eines größeren Splitters wurden verschiedene Dichtewerte nachgewiesen [2], was den Nachweis von Holzfremdkörpern in der CT erschwert.

Im Vergleich zur CT stellten sich hingegen sämtliche Fremdkörper in der MRT hypointens dar, unabhängig von der verwendeten Feldstärke. Die hypointense Darstellung von Holz entspricht den Erfahrungen anderer Autoren [36, 46]. Zusätzlich konnten in der vorliegenden Studie die Beobachtungen einer internationalen Studie nachvollzogen werden, dass die Darstellung von Holzfremdkörpern in der MRT teilweise durch Truncation-Artefakte, im Deutschen auch Kantenartefakte, erleichtert wird. Diese Artefakte zeigen sich als hyperintense Punkte, die sich um das hypointense Holz bilden und an Grenzflächen entstehen, an denen ein plötzlicher Wechsel der Signalintensität stattfindet, wie er zum Beispiel bei Holz und Fett vorliegt [22].

Die unterschiedliche computertomografische Darstellung von Holzfremdkörpern erschwert die Diagnostik und setzt die Nachweisrate deutlich herab, was die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen. Die Darstellbarkeit bzw. die Nachweisrate war unabhängig von der verwendeten Holzart. Die vergleichende Untersuchung der Nachweisrate von Eichenholz als Vertreter der Harthölzer und Kiefer als Vertreter der Weichhölzer ergab in den computertomografischen Untersuchungen keinen Unterschied.

Für die magnetresonanztomografischen Untersuchungen in der 1,5 T MRT ergab sich die gleiche Nachweisrate von Fremdkörpern aus Kiefernholz wie in der CT. Allerdings waren in der MRT Eichenholzfremdkörper in der Tendenz häufiger nachweisbar. Bei der Verwendung eines höheren Magnetfeldes ergab sich in der vorliegenden Studie eine signifikant bessere Darstellung von hartem Holz in Form von Eichenholz. Weshalb die Nachweisrate von Eichenholz in der 3 T MRT höher liegt, bleibt unklar. Die Ursache für die unterschiedliche Darstellung in der 1,5 T und 3 T MRT liegt vermutlich in der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung und Struktur des Holzes.

Die vorliegenden Untersuchungen ergaben zusätzlich, dass die 3 T MRT zwar Kiefernholz besser darstellt als die anderen verwendeten Modalitäten, ein signifikanter Unterschied ergab sich dadurch jedoch nicht. In der Darstellung von Hartholz hingegen ist die CT der MRT höchst signifikant unterlegen. Vergleichende Ergebnisse liegen derzeit nicht vor.

Für die computertomografische Darstellung von Holzfremdkörpern ergeben sich schwerwiegende Probleme durch die ähnliche Dichte der Holzfremdkörper mit dem

umliegenden Gewebe [28], was durch die Untersuchung der Abhängigkeit der Darstellung der Fremdkörper vom Hintergrund bestätigt wird. Sowohl in der Agarmasse als auch in der Fettmasse waren ähnlich viele Fremdkörper nachweisbar. Andere Ergebnisse erbrachten die Untersuchungen mit der MRT. Zwar kam in der Agarmasse annähernd die gleiche Anzahl von Fremdkörpern in der 1,5 T MRT zur Darstellung wie in der CT, jedoch ergab sich ein deutlicher Vorteil im fettreichen Hintergrund, was aufgrund des höheren Kontrastes zu erwarten war. Hier konnten einerseits mehr Fremdkörper dargestellt werden, auf der anderen Seite gab es weit weniger falsch positive Ergebnisse. Einen deutlichen Vorteil ergaben die Untersuchungen mittels 3 T MRT, bei der sich die hölzernen Fremdkörper unabhängig vom gewählten Hintergrund darstellten. Es konnte annähernd die gleiche Anzahl von Fremdkörpern in der Agarmasse wie im Fett nachgewiesen werden. Hieraus ergibt sich ein wesentlicher Vorteil der 3 T MRT, denn die Darstellung von Holz ist in diesem Untersuchungsverfahren unabhängig vom umgebenden Gewebe.

Der Vergleich der Untersuchungsverfahren untereinander ergab eine signifikant bessere Darstellbarkeit der Fremdkörper in der Agarmasse in der 3 T MRT. Im Fetthintergrund war die CT in der Darstellbarkeit der MRT unterlegen.

Neben der Art des Holzes ist ein weiterer Grund für die große Breite der Densität in der CT der Grad der Hydratation. Wie in den vorliegenden Experimenten nachgewiesen werden konnte, stellte sich trockenes Holz in der CT signifikant besser dar als frisches Holz. Zu übereinstimmenden Ergebnissen kommen Mizel et al, die in einer experimentellen Studie ebenfalls eine bessere Darstellung von trockenem Holz in der CT nachweisen konnten [49]. Grund für die signifikant bessere Darstellung von trockenem Holz in der CT ist die geringere Dichte durch den höheren Luftanteil und den daraus resultierenden höheren Kontrast zum umgebenden Material. Der höhere Luftanteil im trockenem Holz erleichtert zwar einerseits die Darstellung in unseren Experimenten, andererseits ist die nachgewiesene Dichte oftmals so gering, dass die Differenzierung zu eingeschlossener Luft nicht immer gelingt, was in der Literatur oft beschrieben wurde [5, 30, 50, 54, 62]. Hilfreich zur Differenzierung von Holz und Luft sollte die Form des hypodensen Areals seins. Gerade lineare Strukturen deuten auf einen Fremdkörper hin. Wie schon in anderen Studien [60] war dies in den aktuellen Experimenten oftmals die einzige Möglichkeit zur Differenzierung. Während Luftblasen eher eine runde Form hatten, konnten die Fremdkörper anhand der linearen Form erkannt werden. Verklumpungen von Agar, welche sich in der CT ebenfalls hypodens darstellten, waren teilweise nur schwer von Holzsplittern zu unterscheiden, gerade wenn die Verklumpungen eine lineare Struktur aufwiesen. Somit besteht in der Abgrenzung von Luft oder anderen

Strukturen zu einem Holzsplitter allein anhand der Geometrie der dargestellten Struktur eine gewisse Unsicherheit, denn die Beurteilung der Form gibt nur einen Hinweis, stellt aber keinen eindeutigen Beweis für das Vorliegen einer Fremdkörperverletzung dar. Hieraus ergeben sich jedoch Konsequenzen für die CT-Untersuchung in der Klinik: es sollte dem Radiologen mitgeteilt werden, dass der Verdacht auf eine Holzfremdkörperverletzung vorliegt. Somit muss der Radiologe hypodense Areale anders werten. Generell gilt, dass in Abwesenheit einer Fraktur nachgewiesene intraorbitale Luft den Verdacht auf einen Holzfremdkörper lenken sollte [23].

Eine Messung der Dichtewerte in unseren Untersuchungen wäre sicherlich möglich, die Ergebnisse würden aber aufgrund der geringen Größe der Holzstücke und des damit entstehenden Partialvolumeneffektes verfälscht und wären damit als unsicher zu erachten, wodurch die Dichtemessung als Kriterium zur Differenzierung entfällt.

McGuckin und Mitarbeiter kommen hingegen zu anderen Ergebnissen. In der experimentellen Studie konnte die CT Holz gut von Luft und Knochen unterscheiden, wozu die MRT nicht in der Lage war. Deshalb wurde die CT bei Verdacht auf einen Holzfremdkörperverletzung empfohlen [46]. Allerdings sind der Studie zur Untersuchung große Holzfremdkörper verwendet worden.

Im Vergleich zu den trockenen Holzfremdkörpern ist die Darstellung von frischen Hölzern in der CT schwieriger. Frische Hölzer weisen eine Dichte ähnlich der des umliegenden Gewebes auf, weshalb die Fremdkörper häufig nicht vom umgebendem Weichteilgewebe zu unterscheiden sind [11, 14]. Als Grund für die zunehmende Dichte konnte ein höherer Wasseranteil nachgewiesen werden. Yamashita und Mitarbeiter führten hierzu Experimente durch, in denen Holzfremdkörper bis zu 30 Tage lang in einer Kochsalzlösung getränkt wurden. In den computertomografischen Untersuchungen ergab sich dadurch ein Anstieg der Dichte [70].

Berücksichtigt werden muss in der Klinik, dass die Dichte des Holzes bei einem Verbleib im Körper ebenfalls zunimmt. Dies konnte in einer klinischen Fallbeschreibung nachgewiesen werden, in der die Fremdkörper unterschiedlich lange in der Orbita verblieben und computertomografische Untersuchungen durchgeführt wurden. Bei einer zwei Monate alten Fremdkörperverletzung zeigte sich der Holzfremdkörper mit einer geringen Dichte. In einem zweiten Fall war der Unfall mit einem Holzfremdkörper 12 Monate vergangen. Der Fremdkörper kam nun mit einer Dichte ähnlich der von Muskeln zur Darstellung. In dem dritten Fall lag der Unfall 27 Monate zurück, wobei der Holzfremdkörper eine noch höhere Dichte zeigte, so dass eine mögliche Kalzifizierung vorliegt [5].

Der Hydratationszustand des Holzes hatte in der vorliegenden Studie keinen Einfluss auf die Darstellbarkeit mit Geräten unterschiedlicher Feldstärken. Zwar wurden in der vorliegenden Studie keine Holzsplitter verwendet, die zuvor Stunden oder Tage in Wasser gebettet wurden, aber unabhängig davon ob trockenes oder frisches Holz verwendeten wurde, waren in der 1,5 T und 3 T MRT jeweils gleich viele Fremdkörper nachweisbar. In der Studie von McGuckin et al stellte sich in der 1,5 T MRT frisches Kiefernholz besser dar, wobei dies subjektiv anhand von großen Holzfremdkörpern durch die Untersucher bewertet wurde [46].

Die Ergebnisse werden durch die Arbeit von Glatt und Mitarbeiter bestätigt, die mit der MRT nachweisen konnten, dass unterschiedliche Hydratationszustände von Holz keinen Einfluss auf die Darstellbarkeit in der T1-Wichtung haben [22]. Aufgrund der Abhängigkeit der Bildgebung in der MRT von Protonen und damit Wasser, sollte sich Holz durch den Wassergehalt im Vergleich zu Fett oder Muskeln in der MRT darstellen. Im trockenen Holz ist der Gasanteil höher als im frischen Holz, wodurch die hydrogenen oder mobilen Protonen fehlen, was die Hypointensität in T1- und Protonen-gewichteten Sequenzen erklärt. Bei frischem oder eingeweichtem Holz ist der Wasseranteil und damit der Anteil an hydrogenen Protonen höher. Wasser stellt sich in T1- und Protonen-gewichteten Sequenzen ebenfalls hypointens dar. In der T2-Wichtung sollte nun ein hyperintenses Signal erwartet werden. Glatt et al konnten dieses aber nur bei frischer Kiefer nachweisen. Andere Holzarten enthielten nicht genug Wasser, um in der T2-Sequenz signalgebend zu sein [22]. McGuckin et al begründen die Hypointensität von frischem Holz ebenfalls durch das Fehlen von ausreichend mobilen Protonen [46].

Obwohl in der Studie die 1,5 T MRT und 3 T MRT jeweils gleich viele trockene oder frische Hölzer darstellte, ergaben die Untersuchungen einen wesentlichen Vorteil der 3 T MRT. Diese konnte sowohl bei den frischen als auch bei den trockenen Hölzern im Vergleich zu den anderen Untersuchungsverfahren signifikant mehr Holzfremdkörper darstellen. Vergleichende Untersuchungen liegen diesbezüglich nicht vor.

Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ergibt sich ein wesentlicher Vorteil der MRT durch eine deutlich geringere Nachweisgrenze. 75 % der Fremdkörper mit einer Größe ab 11 mm<sup>3</sup> waren in der CT nachweisbar. In der 1,5 T MRT konnten alle 9 mm<sup>3</sup> großen Fremdkörper entdeckt werden. Verwendete man zur Untersuchung ein MRT-Gerät mit einem höheren Magnetfeld, sank die Nachweisgrenze, so dass Fremdkörper von 5 mm<sup>3</sup> sehr gut dargestellt werden konnten.

Bestätigt werden die Ergebnisse bezüglich der Nachweisgrenze von Holz in der CT und MRT durch Glatt und Mitarbeiter. Mittels 1,5 T MRT konnte in der genannten Studie Eichenholz

mit einer Fläche von  $0,5 \text{ mm}^2$  nachgewiesen werden, wozu die CT hingegen nicht in der Lage war. Zusätzlich war Balsa, einer südamerikanischen Holzart, ab einer Querschnittsfläche von  $1 \text{ mm}^2$  in der MRT und in der CT ab  $3 \text{ mm}^2$  nachweisbar. Glatt und Mitarbeiter verwendeten verschiedene Sorten Holz, die in lange Splitter geschnitten wurden, die Spitze hatte dabei eine Querschnittsfläche von  $0,5$  bis  $33 \text{ mm}^2$  [22]. Allerdings ist in diesem Experiment das Volumen nicht erkennbar, ab der ein Fremdkörper nachweisbar ist.

Die Analysen des in dieser Arbeit durchgeführten Experiments ergaben für die Darstellung von Holzfremdkörpern in der CT eine deutlich eingeschränkte Nachweisrate mit 62,5 %. Speziell die kleinen Fremdkörper waren in den Untersuchungen nur vereinzelt darstellbar. Bestätigt werden die vorliegenden Ergebnisse unserer Studie durch Shelsta und Mitarbeiter, die anhand von 23 Patienten mit intraorbitalem Holzfremdkörpern eine Sensitivität für die CT von 61 % nachweisen konnten [60]. In einer weiteren klinischen Studie von Nasr et al gelang die Darstellung von hölzernen Fremdkörpern in der CT sogar bei nur 42 % der Patienten [51]. Zu anderen Ergebnissen kommen Dass und Mitarbeiter, die in einer experimentellen Studie mit größeren Fremdkörpern, welche 1mm bis 4 mm breit und 10 mm bis 13 mm lang waren und in Schweineaugen platzierten. Es waren alle fünf Holzfremdkörper darstellbar, diese wurden von den Radiologen als möglicher Fremdkörper beschrieben [12].

Die MRT verspricht in der Darstellbarkeit von Holzfremdkörpern Vorteile. Die 1,5 T MRT konnte nicht ganz drei von vier Fremdkörpern darstellen und ist damit der CT bezüglich der Nachweisrate überlegen. Einen weiteren Vorteil erbrachte die 3 T MRT, die die Fremdkörper noch deutlicher zu Darstellung brachte. Damit widersprechen unsere Ergebnisse der klinischen Studie von Nasr und Mitarbeiter, die zu dem Ergebnis kamen, dass auch die MRT nur 57 % der Holzfremdkörper darstellen kann. Dass hier ein Unterschied in der errechneten Sensitivität besteht, ist wohl dem unterschiedlichen Aufbau der Studien zuzuschreiben. Der Einfluss von Hydratation, Entzündung und dem Aufbau der Orbita mit den Muskeln und Knochen, die eventuell das Signal beeinflussen, konnten in der vorliegenden experimentellen Studie nicht berücksichtigt werden. Ebenso kann die Untersuchung bei Patienten erschwert werden durch längere Untersuchungszeiten, so dass durch Bewegungen des Auges Fremdkörper der Untersuchung entgehen. Trotzdem widerspricht die Studie von Nasr et al nicht dem vorliegenden Ergebnis, dass die MRT gegenüber der CT eine höhere Sensitivität aufweist [51].

Ein weiterer Vorteil der MRT gegenüber der CT war die deutlichere Erkennbarkeit der Holzfremdkörper. Bei nur einem Viertel der in der CT untersuchten Fremdkörper waren sich die Radiologen sicher, dass der dargestellte Fremdkörper tatsächlich einer ist. Bei der 1,5 T

MRT waren es knapp die Hälfte aller Fremdkörper, in der 3 T MRT sogar mehr. Somit waren Holzfremdkörper leichter in der MRT zu erkennen. Allerdings muss in diesem Zusammenhang auch erwähnt werden, dass bei allen Untersuchungsverfahren ungefähr gleich viele falsch positive Ergebnisse auftraten. Eine Differenzierung zwischen Fremdkörper und einer anderen möglichen Struktur, wie zum Beispiel Luft, scheint damit auch in der MRT weiterhin nicht einfach.

In dieser Studie wurde auch geprüft, ob der Nachweis von Fremdkörpern mit den verschiedenen bildgebenden Verfahren untersucherabhängig war. In der CT konnten alle Radiologen annähernd gleich viele Fremdkörper entdecken. Für die 1,5 T MRT ergab sich ein signifikanter Unterschied, da ein Radiologe wahrscheinlich aufgrund geringerer Erfahrung in der MRT-Untersuchung nicht so viele Fremdkörper entdeckte. Für die Klinik bedeutet dies, dass bei Verdacht auf einen Holzfremdkörper unbedingt ein erfahrener Radiologe hinzugezogen werden sollte. Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen aber auch, dass die 3 T MRT nicht untersucherabhängig war. Damit vereinfacht die 3 T MRT die Suche nach Holzfremdkörpern, auch für Unerfahrene.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass bei einem Verdacht auf einen organischen Fremdkörper eine bildgebende Untersuchung mit der MRT zu empfehlen ist, vorzugsweise mit einem hohen Magnetfeld. Dies ergibt sich aus der höheren Nachweisrate und der Möglichkeit der Darstellung von kleineren Holzfremdkörpern. Die CT kann nur begrenzt die Fremdkörper nachweisen und ist nach den vorliegenden Ergebnissen in der Diagnostik von Holzfremdkörpern abzulehnen.

## **8. Zusammenfassung**

Das Vorliegen eines Fremdkörpers sollte bei traumatischen Ereignissen des Auges aufgrund der möglichen Komplikationen ausgeschlossen werden. Mit welchem bildgebenden Verfahren ein Fremdkörper nachzuweisen oder auszuschließen ist, wird jedoch kontrovers diskutiert. Ziel der Arbeit war es, den Stellenwert und die Notwendigkeit von bildgebenden Untersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der im hinteren Augenabschnitt befindlichen Fremdkörper zu ermitteln, gerade wenn diese einer Pars Plana Vitrektomie zur Extraktion zugeführt werden. Hierfür wurde retrospektiv aus dem Zeitraum von fast 14 Jahren der Einsatz der bildgebenden Diagnostik bei Patienten mit einer perforierenden oder penetrierenden Bulbusverletzungen analysiert.

Die klinische Diagnose eines Fremdkörpers an der Spaltlampe ist nur in einem kleinen Teil der Fremdkörperverletzungen möglich, da der geringere Anteil der Fremdkörper schon im vorderen Augenabschnitt lokalisiert ist. Der Großteil der Fremdkörper befindet sich jedoch im hinteren Augenabschnitt oder extrabulbär, so dass für den Beweis eines Fremdkörpers eine weiterführende bildgebende Diagnostik notwendig wird. Diese sollte bei entsprechender Anamnese und dem klinischen Beweis einer Perforation oder Penetration erfolgen, weshalb die klinische Untersuchung von entscheidender Bedeutung ist. Allerdings sollten auch die Patienten einer Bildgebung zugeführt werden, deren Fremdkörper schon an der Spaltlampe sichtbar sind, da ein zweiter möglicher Fremdkörper der klinischen Untersuchung entgehen kann.

Die Sonografie weist für eine intraokulare Fremdkörperverletzung eine gute Sensitivität und Spezifität auf und kann einen Fremdkörper lokalisieren, weshalb primär eine sonografische Untersuchung des Auges erfolgen sollte. Allerdings ist sie durch die alleinige Darstellung des vorderen Abschnittes der Orbita und durch Verwechslungsgefahr mit Luft, Einblutungen und Wandirregularitäten limitiert. Ergänzend wird ein Röntgen der Orbita in zwei Ebenen empfohlen, da der Großteil der Fremdkörper metallischer Herkunft und damit bildgebend ist. Obwohl die Comberg-Methode in einem Großteil der Fälle einen Fremdkörper korrekt lokalisieren kann, gilt sie in der heutigen Zeit als obsolet und sollte in der Fremdkörperdiagnostik keine Berücksichtigung mehr finden.

Die CT weist von den zur Verfügung stehenden bildgebenden Verfahren die höchste Sensitivität und Spezifität für nicht organische Fremdkörper auf. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit der Lokalisation und der Darstellung von nicht radiologisch bildgebenden Fremdkörpern. Allerdings ist die Durchführung einer computertomografischen Untersuchung

bei jedem Fremdkörperverdacht auch aufgrund der Kosten- und Strahlenbelastung nicht sinnvoll. Die CT bleibt deshalb Patienten vorbehalten, die schwerste Begleitverletzungen aufweisen, oder bei denen der Nachweis eines Fremdkörpers in der Sonografie und dem konventionellem Röntgen als unsicher zu erachten ist. Bei extrabulbarer Lokalisation eines Fremdkörpers ist eine CT indiziert, um das Fremdkörpermaterial, die Lage des Fremdkörpers und die Umgebungsreaktion zu bestimmen, woraus sich eine Operationsindikation ableitet. Die Pars Plana Vitrektomie ermöglicht die kontrollierte Entfernung eines im hinteren Augenabschnitt gelegenen Fremdkörpers. Dadurch ist die penible Lokalisation eines Fremdkörpers durch die Bildgebung nicht mehr notwendig. Allerdings sollte eine intra- oder extraokulare Lagebestimmung ermöglicht und der Fremdkörper annähernd lokalisiert werden. Nach der retrospektiven Analyse der Patientendaten und der vorliegenden Literatur ist in einem Großteil der Fälle eine sonografische Untersuchung in Kombination mit einem Röntgen der Orbita in zwei Ebenen ausreichend.

Der bildgebende Nachweis von hölzernen Fremdkörpern weist in sämtlichen bildgebenden Verfahren Unsicherheiten auf. Aktuell stehen MRT-Geräte mit höherer Feldstärke zur Verfügung, welche eine bessere Darstellbarkeit versprechen. Aus diesem Grund wurden Holzfremdkörper unterschiedlicher Größe hergestellt und in der CT, der 1,5 T und 3 T MRT bildgebend untersucht. Die Darstellung von Holz in der CT ist weiterhin von deutlichen Unsicherheiten geprägt, da es sich uneinheitlich darstellt. Bei trockenem Holz besteht eine hohe Verwechslungsgefahr mit Luft. Mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt gelingt eine Differenzierung zum umliegenden Gewebe aufgrund der ansteigenden Dichtewerte häufig nicht. Daraus ergibt sich eine deutlich eingeschränkte Nachweisrate von 62,5 % für Holz in der CT. Selbst größere Holzfremdkörper sind nicht mit letzter Sicherheit darstellbar.

Bei einem Fremdkörperverdacht mit Holz sollte die MRT den Vorzug erhalten, wobei T1-gewichtete Sequenzen aufgrund der kürzeren Untersuchungszeit empfohlen werden. Ein Vorteil der MRT gegenüber der CT ergibt sich durch die einheitliche hypointense Darstellung. Diese ist unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt des Holzes. Während die 1,5 T MRT Fremdkörper in einem fettreichen Hintergrund signifikant besser darstellen konnte, ist die Darstellbarkeit in einer 3 T MRT unabhängig vom Hintergrund. Ein Nachweis von Holzfremdkörpern sollte in der 1,5 T MRT ab 9 mm<sup>3</sup> und in der 3 T MRT ab 5 mm<sup>3</sup> gelingen. Dadurch liegt die Nachweisrate von Holzfremdkörpern in der 1,5 T MRT bei 74 % und für die 3 T MRT bei 92 %.

Die CT ist nach den vorliegenden Ergebnissen in der Darstellung von Holz der MRT deutlich unterlegen. Bei V. a. einen Holzfremdkörper sollte idealerweise eine magnetresonanztomografische Untersuchung mit einem hohen Magnetfeld erfolgen, wodurch die Nachweisrate deutlich gesteigert werden kann und auch der Nachweis von kleineren Fremdkörpern gelingt.

## **9. Thesen**

- 1.) Wenngleich in der Praxis insbesondere bei bereits an der Spaltlampe sichtbaren Fremdkörpern auf eine Bildgebung häufig verzichtet wird, erscheint der Einsatz der bildgebenden Diagnostik bei jedem Patienten mit Verdacht auf einen intraorbitalen Fremdkörper notwendig, um insbesondere weitere mögliche Fremdkörper sicher nachzuweisen oder auszuschließen.
- 2.) Besteht aufgrund der Anamnese und der klinischen Untersuchung ein Fremdkörperverdacht, sollten mehrere bildgebende Verfahren zum Einsatz kommen. Primär ist die Sonografie anzuwenden, da diese schnell zur Verfügung steht und für den Patienten nur eine geringe Belastung bedeutet. Da aber eine eingeschränkte Sensitivität der Sonografie für intraorbitale Fremdkörper besteht, sollte eine Kombination mit anderen bildgebenden Verfahren erfolgen. Ergibt sich anamnestisch der Verdacht auf einen röntgendichten Fremdkörper, sollte ein konventionelles Röntgenverfahren eingesetzt werden.
- 3.) Computertomografische Untersuchungen sind nicht bei jeder Fremdkörperverletzung indiziert. Die Durchführung einer CT empfiehlt sich bei Patienten mit schwersten Begleitverletzungen, in denen sich weitere explizite Fragestellungen wie eine Fraktur der Orbita ergeben. Schließlich bleibt die CT den Fällen vorbehalten, in denen ein Nachweis oder die Lokalisation eines Fremdkörpers durch andere bildgebende Verfahren als unsicher zu werten ist.
- 4.) Durch das Comberg-Verfahren besteht die Möglichkeit, radiologisch bildgebende intraokulare Fremdkörper in bis zu 90 % der Fälle korrekt zu lokalisieren. Es ergeben sich jedoch erhebliche diagnostische Schwierigkeiten bei verlängertem oder verkürztem Bulbus, da das Comberg-Schema nur für emmetrope Augen mit einer Bulbuslänge von 24 mm gilt. Auf Grund der heute zur Verfügung stehenden Alternativverfahren und wegen der Umständlichkeit der Untersuchung ist die Comberg-Methode abzulehnen.
- 5.) Bei extrabulbärer Lage eines Fremdkörpers ist die Durchführung einer computertomografischen Untersuchung zu empfehlen. Diese wird zur Lagebeschreibung des Fremdkörpers zu sensiblen Strukturen der Orbita, wie zum Beispiel den Sehnerven, erforderlich und um eine intrakraniellen Lage auszuschließen. Zusätzlich muss das

Fremdkörpermaterial und die Umgebungsreaktion beurteilt werden, um die Notwendigkeit einer operativen Extraktion zu evaluieren.

6.) Die Notwendigkeit der Lokalisation von Fremdkörpern im hinteren Augenabschnitt wird seit Einführung der Pars plana Vitrektomie kontrovers diskutiert. Eine annähernde Lokalisation eines im hinteren Augenabschnitt gelegenen Fremdkörpers ist weiterhin notwendig. So sollte ein Fremdkörper innerhalb oder außerhalb des Augapfels lokalisiert werden und ein präoperativer Lagenachweis bei absehbar unübersichtlichen Operationsverhältnissen erfolgen. Da die Pars Plana Vitrektomie die kontrollierte Extraktion eines Fremdkörpers ermöglicht, ist eine pedantische bildgebende Lokalisation nicht notwendig.

7.) Orbitale Holzfremdkörper stellen für die Bildgebung eine Herausforderung dar. Aufgrund der geringen Sensitivität der Sonografie für den Holzfremdkörpernachweis bzw. sicheren Ausschluss kann auf sie verzichtet werden.

8.) Eine verlässliche Darstellung von kleinen Holzfremdkörpern ist auch in der CT nicht möglich. Angesichts der inhomogenen Darstellung, der geringen Sensitivität und der hohen Verwechslungsgefahr von hölzernen Fremdkörpern mit Luft ist insbesondere in Hinblick auf die hohe Strahlenbelastung eine CT im Rahmen der Diagnostik von Holzfremdkörpern abzulehnen.

9.) Als Mittel der Wahl bei der Diagnostik von Holzfremdkörpern ist die MRT anzusehen. Die Verwendung eines stärkeren Magnetfeldes erhöht die Treffsicherheit und senkt die Nachweisgrenze für hölzerne Fremdkörper.

## 10. Literaturverzeichnis

- 1.) Augustin, Albert J. (1999): Augenheilkunde; 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin, S. 42
- 2.) Ayertey HD, Roters S, Dinslage S, Diestelhorst M, Kronen W, Krug B, Krieglstein GK (2001): [Stab injury of the orbit]. Ophthalmologe 98(9):906-907
- 3.) Barnes E, Griffiths M, Elliot A (1993): Intraocular foreign body missed by computed tomography. BMJ 306(6891): 1542
- 4.) Biedermann F, Eichler T, Kähler W (1991): Die Fremdkörperlokalisation im Orbitabereich nach Comberg – eine noch aktuelle röntgendiagnostische Methode? Radiol. diagn. 32: 36-40
- 5.) Boncoeur-Martel MP, Adenis JP, Rulfi JY, Robert PY, Dupuy JP, Maubon A (2001): CT appearances of chronically retained wooden intraorbital foreign bodies. Neuroradiology 43(2): 165-8
- 6.) Bray LC, Griffiths PG (1991): The value of plain radiography in suspected intraocular foreign body. Eye (Lond) 5 (Pt6): 751-4
- 7.) Briscoe D, Geffen N, Assia EI, Yaffe D (2009): Determining size and characteristics of metal intraocular foreign bodies using helical CT scan. Eur J Ophthalmol 19(5): 861-5
- 8.) Bryden FM, Pyott AA, Bailey M, McGhee CN (1990): Real time ultrasound in the assessment of intraocular foreign bodies. Eye (Lond). 4 (Pt5):727-31
- 9.) Chacko JG, Figueroa RE, Johnson MH, Marcus DM, Brooks SE (1997): Detection and localization of steel intraocular foreign bodies using computed tomography. A comparison of helical and conventional axial scanning. Ophthalmology 104(2):319-23
- 10.) Cruvinel Isaac DL, Ghanem VC, Nascimento MA, Toriqoe M, Kara-Jose N (2003): Prognostic factors in open globe injuries. Ophthalmologica 217(6):431-5
- 11.) Dalley RW (1995): Intraorbital wood foreign bodies on CT: use of wide bone window settings to distinguish wood from air. AJR 164(2): 434-5
- 12.) Dass AB, Ferrone PJ, Chu YR, Esposito M, Gray L (2001): Sensitivity of spiral computed tomography scanning for detecting intraocular foreign bodies. Ophthalmology 108(12):2326-8
- 13.) De Souza S, Howcroft MJ (1999): Management of posterior segment intraocular foreign bodies: 14 years' experience. Can J Ophthalmol. 34(1):23-9
- 14.) Edgington BD, Geist CE, Kuo J (2008): Intraorbital organic foreign body in a tree surgeon. Ophthal Plat Reconstr Surg 24(3):237-8
- 15.) Ehlers JP, Kunimoto DY, Ittoop S, Maquire JI, Ho AC, Regillo CD (2008): Metallic

- intraocular foreign bodies: characteristics` , interventions` , and prognostic factors for visual outcome and globe survival. Am J Ophthalmol 146(3): 427-433
- 16.) El-Asrar AM, Al-Amro SA, Khan NM, Kangave D (1998): Retinal detachment after posterior segment intraocular foreign body injuries. Int Ophthalmol. 22(6): 369-75
- 17.) Etherington RJ, Hourihan MD (1989): Localisation of intraocular and intraorbital foreign bodies using computed tomography. Clin Radiol 40(6): 610-4
- 18.) Falcão M, Camisa E, Falcão-Reis F (2010): Characteristics of open-globe injuries in northwestern Portugal. Ophthalmologica 224(6):389-94
- 19.) Forrest KY, Cali JM (2009): Epidemiology of lifetime work-related eye injuries in the U.S. population associated with one or more lost days of work. Ophthalmic Epidemiol 16(3):156-62
- 20.) Framme C, Roider J (1999): Epidemiology of open globe injuries. Klin Monbl Augenheilkd 215(5):287-93
- 21.) Fulcher TP, McNab AA, Sullivan TJ (2002): Clinical features and management of intraorbital foreign bodies. Ophthalmology 109(3):494-500
- 22.) Glatt HJ, Custer PL, Barrett L, Sartor K (1990): Magnetic resonance imaging and computed tomography in a model of wooden foreign bodies in the orbit. Ophthal Plast Reconstr Surg 6(2):108-14
- 23.) Green BF, Kraft SP, Carter KD, Buncic JR, Nerad JA, Armstrong D (1990): Intraorbital wood. Detection by magnetic resonance imaging. Ophthalmology 97(5):608-11
- 24.) Greven CM, Engelbrecht NE, Slusher MM, Nagy SS (2000): Intraocular foreign bodies: management` , prognostic factors` , and visual outcome. Ophthalmology 107(3):608-12
- 25.) Griffiths ML, Lee GA (2004): Retained intraocular foreign body. Clin Exp Optom 87(1):34-6
- 26.) Guthoff R (1988): Ultraschall in der ophthalmologischen Diagnostik, Leitfaden für die Praxis. Thieme, Stuttgart, S.58
- 27.) Hadden OB, Wilson JL (1990): The management of intraocular foreign bodies. Aust N Z J Ophthalmol 18(3):343-51
- 28.) Hansen JE, Gudeman SK, Holgate RC, Saunders RA (1988): Penetrating intracranial wood wounds: clinical limitations of computerized tomography. J Neurosurg 68(5): 752-56
- 29.) Hempel, 2000, Analyse von perforierenden Augenverletzungen unter der besonderen Betrachtung der Wertigkeit verschiedener bildgebender Verfahren in der Diagnostik intraokularer Fremdkörper. Med. Dissertation, Universität Mainz

- 30.) Ho VT, McGuckin JF Jr, Smergel EM (1996): Intraorbital wooden foreign body: CT and MR appearance. *AJNR* 17(1):134-6
- 31.) Imrie FR, Cox A, Foot B, Macewen CJ (2008): Surveillance of intraocular foreign bodies in the UK. *Eye (Lond)* 22(9):1141-7
- 32.) Kramer M, Hart L, Miller JW (1995): Ultrasonography in the management of penetrating ocular trauma. *Int Ophthalmol Clin* 35(1):181-92
- 33.) Kuhn F, Morris R, Witherspoon CD, Harris CL, Brown S (1993): [Magnetic intraocular foreign body in the posterior eye segment. Current treatment concepts]. *Ophthalmologe* 90(5):539-48
- 34.) Kuhn F, Morris R (2001): Authors Reply. *Ophthalmology* 108(3):432
- 35.) Kuhn F, Morris R, Witherspoon CD, Mester V (2004): The Birmingham Eye Trauma Terminology System. *J Fr Ophthalmol.* 27(2): 206-210
- 36.) Lagalla R, Manfre L, Caronia A, Bencivinni F, Duranti C, Ponte F (2000): Plain film, CT and MRI sensibility in the evaluation of intraorbital foreign bodies in an in vitro model of the orbit and in pig eyes. *Eur Radiol* 10(8):1338-41
- 37.) Lakits A, Prokesch R, Scholda C, Bankier A, Weninger F, Imhof H (1998): Multiplanar imaging in the preoperative assessment of metallic intraocular foreign bodies. Helical computed tomography versus conventional computed tomography. *Ophthalmology* 105(9):1679-85
- 38.) Lakits A, Prokesch R, Scholda C, Bankier A (1999): Orbital helical computed tomography in the diagnosis and management of eye trauma. *Ophthalmology* 106(12):2330-5
- 39.) Lakits A, Prokesch R, Scholda C, Nowotny R, Kaider A, Bankier A (2000): Helical and conventional CT in the imaging of metallic foreign bodies in the orbit. *Acta ophthalmol Scand* 78(1):79-83
- 40.) Lakshmanan A, Bala S, Belfer KF (2008): Intraorbital organic foreign body--a diagnostic challenge. *Orbit* 27(2):131-3
- 41.) Loffredo A, Cennamo G, Sammartino A, de Crecchio G (1979): The value of the association of radiological methods with echographic examination in the study of intraocular foreign bodies. *Ophthalmologica* 179(1):18-24
- 42.) Maneschg OA, Resch M, Papp A, Nemeth J (2010): Prognostic Factors and Visual Outcome for Open Globe Injuries with Intraocular Foreign Bodies. *Klin Monbl Augenheilkd* 228(9):801-7
- 43.) Maguire AM, Enger C, Elliott D, Zinreich SJ (1991): Computerized tomography in the

- evaluation of penetrating ocular injuries. *Retina* 11(4):405-11
- 44.) Markl A, Hasenfratz G, Mayr B, Fink U, Ingrisch H, Lissner J (1983): [Comparison of conventional radiology, ultrasound and computer tomography in the preoperative localization of intraocular foreign bodies]. *Computertomographie* 3(4):162-7
- 45.) McElvanney AM, Fielder AR (1993): Intraocular foreign body missed by radiography. *BMJ* 306(6884):1060-1
- 46.) McGuckin JF Jr, Akhtar N, Ho VT, Smergel EM, Kubacki EJ, Villafana T (1996): CT and MR evaluation of a wooden foreign body in an in vitro model of the orbit. *AJNR* 17(1):129-33
- 47.) McNicholas MM, Brophy DP, Power WJ, Griffin JF (1995): Ocular trauma: evaluation with US. *Radiology* 195(2):423-7
- 48.) Mester V, Kuhn F (1998): Ferrous intraocular foreign bodies retained in the posterior segment options and results. *Int Ophthalmol.* 22(6):355-362
- 49.) Mizel MS, Steinmetz ND, Trepman E (1994): Detection of wooden foreign bodies in muscle tissue: experimental comparison of computed tomography, magnetic resonance imaging, and ultrasonography. *Foot Ankle Int* 15(8):437-43
- 50.) Myllyla V, Pyhtinen J, Päivänsalo M, Tervonen O, Koskela P (1987): CT detection and location of intraorbital foreign bodies. Experiments with wood and glass. *Röfo* 146(6):639-43
- 51.) Nasr AM, Haik BG, Fleming JC, Al-Hussain HM, Karcioğlu ZA (1999): Penetrating orbital injury with organic foreign bodies. *Ophthalmology* 106(3):523-32
- 52.) Otto PM, Otto RA, Virapongse C, Friedmann SM Emerson S, Li KC, Malot R, Kaude JV, Staab EV (1992): Screening test for detection of metallic foreign objects in the orbit before magnetic resonance imaging. *Invest Radiol* 27(4):308-11
- 53.) Papadopoulos A, Fotinos A, Maniatis V, Kavadias V, Michaelides A, Avouri M, Kalamra C, Stringaris K (2001): Assessment of intraocular foreign bodies by helical-CT multiplanar imaging. *Eur Radiol* 11(8):1502-5
- 54.) Paul AM, Grundmann T (2010): Intraorbital wooden foreign body undetected on CT. *HNO* 58(12):1237-40
- 55.) Pyhtinen J, Ilkko E, Lähde S (1995): Wooden foreign bodies in CT. Case reports and experimental studies. *Acta Radiol* 36(2):148-51
- 56.) Rubsamen PE, Cousins SW, Winward KE, Byrne SF (1994): Diagnostic ultrasound and pars plana vitrectomy in penetrating ocular trauma. *Ophthalmology* 101(5):809-14
- 57.) Saeed A, Cassidy L, Malone DE, Beatty S (2008): Plain X-ray and computed

- tomography of the orbit in cases and suspected cases of intraocular foreign body. Eye (Lond) 22(11):1373-7
- 58.) Sandner A, Kösling S, Heider C, Bloching MB (2007): [Secondary amaurosis after infraorbital injury with a wooden foreign body]. HNO 55(6):481-4
- 59.) Schlolaut KH, Krahe T, Leipner N, Steudel A, Köster O (1990): Zur Computer-tomographie beim Trauma der Orbita. Röfo 152(2):147-53
- 60.) Shelsta HN, Bilyk JR, Rubin PA, Penne RB, Carrasco JR (2010): Wooden intraorbital foreign body injuries: clinical characteristics and outcomes of 23 patients. Ophthal Plast Reconstr Surg 26(4):238-44
- 61.) Shiver SA, Lyon M, Blaivas M (2005): Detection of metallic ocular foreign bodies with handheld sonography in a porcine model. J Ultrasound Med 24(10):1341-6
- 62.) Specht CS, Varga JH, Jalali MM, Edelstein JP (1992): Orbitocranial wooden foreign body diagnosed by magnetic resonance imaging. Dry wood can be isodense with air and orbital fat by computed tomography. Sury Ophthalmol 36(5):341-4
- 63.) Terai N, SandnerD, Kissner A, Pillunat LE (2011): [Siderosis bulbi after injury by an intraocular metal foreign body]. Ophthalmologe 108(1):60-3
- 64.) Thornbury JR (1994): Clinical efficacy of diagnosis imaging: love it or leave it. Am J Roentgenol 162(1):1-8
- 65.) Trommer G, Kösling S, Nerkelun S, Gosch D, Klöppel R (1997): [Detection of orbital foreign bodies by CT: are plain radiographs of foreign bodies still useful?]. Röfo 166(6):487-92
- 66.) Wickham L, Xing W, Bunce C, Sulivan P (2006): Outcomes of surgery for posterior segment intraocular foreign bodies--a retrospective review of 17 years of clinical experience. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 244(12):1620-6
- 67.) Wilhelm JL, Zakov ZN, Weinstein MA, Berlin LA, Zegarra H, Gutman FA (1981): Localization of suspected intraocular foreign bodies with a modified Delta 2020 scanner. Ophthalmic Surg 12(9):633-41
- 68.) Woodcock MG, Scott RA, Huntbach J, Kirkby GR (2006): Mass and shape as factors in intraocular foreign body injuries. Ophthalmology 113(12):2262-9
- 69.) Wu TT, Kung YH, Sheu SJ, Yang CA (2009): Lens siderosis resulting from a tiny missed intralenticular foreign body. J Chin Med Assoc 72(1):42-4
- 70.) Yamashita K, Noguchi T, Mihara F, Yoshiura T, Togao O, Yoshikawa H, Honda H (2007): An intraorbital wooden foreign body: description of an case and a variety of CT appearances. Emerg Radiol 14(1):41-3

71) Yeh S, Colyer MH, Weichel ED (2008): Current trends in the management of intraocular foreign bodies. *Curr Opin Ophthalmol* 19(3):225-33

## **11. Anhang**

### **11.1 Danksagung**

Herrn Prof. Dr. med. K. Hauenstein und Prof. Dr. med. R. Guthoff möchte ich für die Überlassung des Themas danken. Ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. V. Hingst, der mir diese Arbeit ermöglichte. Ohne seine Anleitung, konstruktiven Ratschläge und unendliche Geduld wäre eine Fertigstellung sicher nicht möglich gewesen.

Bei Herrn Prof. Dr. G. Kundt möchte ich mich für die Hilfestellung bei der statistischen Analyse bedanken.

Weiterhin geht mein Dank an die Mitarbeiter der Augenklinik und des Instituts für Diagnostische und Interventionelle Radiologie der Universität Rostock, die mich bei meiner Arbeit unterstützt haben. Es sind zu viele, um sie namentlich zu erwähnen.

Besonderer Dank gilt weiterhin meiner Familie und Freunden für die Unterstützung und Ermutigung.

## **11.2 Lebenslauf**

Aus datenschutzrechtlichen Gründen und zum Personenschutz  
ist der Lebenslauf online nicht verfügbar.