# Reduktion der Strahlendosis im Verlauf bei einem neuen interventionellen Verfahren am Beispiel der Prostataarterienembolisation (PAE)

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Medizin (Dr. med.)

an der

Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von

Rabea Maria Wentz

aus

Mainz

2026

Betreuer:in / Gutachter:in der Dissertation: Prof. Dr. Christian R. Habermann

Gutachter:in der Dissertation: PD Dr. Malte Kriegs

Vorsitz der Prüfungskommission: PD Dr. Malte Kriegs

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Peter Bannas

Mitglied der Prüfungskommission: Prof. Dr. Cordula Petersen

Datum der mündlichen Prüfung: 05.08.2026

# Inhaltsverzeichnis

**1. Arbeitshypothese ..... 5**

**2. Einleitung ..... 6**

*2.1 Einführung ..... 6*

*2.2 Medikamentöse Therapie ..... 10*

2.2.1 Alpha- Blocker ..... 10

2.2.2 5-Alpha-Reduktase-Inhibitoren ..... 10

2.2.3 Phosphordiesterase-5-Inhibitoren ..... 11

2.2.4 Kombinationstherapie ..... 11

*2.3 Chirurgische Therapie ..... 12*

2.3.1 TUR-P ..... 12

2.3.2 Adenomenukleation der Prostata ..... 13

2.3.3 Transurethrale Enukleationsverfahren ..... 14

2.3.3.1 HoLEP (Holmiumlaser-Enukleation der Prostata) ..... 14

2.3.3.2 ThuLEP (Thuliumlaser-Enukleation der Prostata) ..... 14

2.3.3.3 BipolEP (Bipolare Enukleation der Prostata) ..... 15

*2.4 Prostataarterienembolisation - geschichtlicher Hintergrund ..... 16*

*2.5 PAE Prozedurbeschreibung ..... 17*

*2.6 Patientenauswahl vor PAE ..... 18*

**3. Material und Methoden ..... 20**

*3.1 Prozedere ..... 20*

*3.2 Outcome und Dosisparameter ..... 24*

*3.3 Statistik ..... 24*

**4. Ergebnisse ..... 26**

*4.1 Patienten ..... 26*

*4.2 Technischer Erfolg ..... 27*

*4.3 Gründe für den technischen Misserfolg ..... 27*

*4.4 Dosisparameter ..... 28*

*4.5 Einflussfaktoren der Strahlenexposition ..... 31*

**5. Diskussion ..... 33**

**6. Zusammenfassung ..... 37**

**7. Literaturverzeichnis ..... 38**

**8. Abkürzungsverzeichnis ..... 42**

**9. Abbildungsverzeichnis ..... 44**

**10. Tabellenverzeichnis ..... 44**

**11. Erklärung des Eigenanteils..... 45**

**12. Eidesstattliche Erklärung..... 46**

**13. Danksagung ..... 47**

# 1. Arbeitshypothese

Das Ziel dieser Studie bestand darin, die Strahlenexposition bei Patienten, welche sich in einem Schwerpunktversorgungszentrum mit steigend mehr als 100 Patienten pro Jahr behandeln lassen, herauszuarbeiten und insbesondere die Faktoren, welche den Haupteinfluss der Strahlenexposition während einer Prostataarterienembolisation ausmachen, zu detektieren, um diese für zukünftige Eingriffe auf ein Minimum verringern zu können.

# 2. Einleitung

## 2.1 Einführung

Die Prostata stellt eines der wichtigsten Organe im männlichen Reproduktionssystem dar, das eine Schlüsselrolle bei der sexuellen Gesundheit und Funktion spielt (1). Sie befindet sich unterhalb der Harnblase und umgibt den oberen Teil der Harnröhre, den Kanal, der den Urin aus der Blase leitet, wodurch es ihr ermöglicht wird direkt auf den Urinfluss sowie auf die Ejakulation zu wirken (2). Diese Drüse hat ungefähr die Größe einer Walnuss, wobei ihr Umfang mit dem Alter zunehmen und zu Veränderungen wie der benignen Prostatahyperplasie (BPH) führen kann (2).

Die BPH ist eine weltweit häufige Erkrankung, die sich durch die Vergrößerung der Prostata auszeichnet und vorwiegend bei älteren Männern auftritt (3).

Hierbei kommt es zu einer Vergrößerung der Drüse durch eine gutartige Zunahme der Anzahl sowohl der epithelialen, als auch der fibromuskulären Anteile in der Transitionalzone der Prostata sowie zu einer Hyperplasie des periurethralen Stromas (3, 4). Diese Vergrößerung kann vor allem den Harnfluss beeinträchtigen und zu verschiedenen Harnwegssymptomen sowie einem hohen Leidensdruck führen (5, 6).

In Bezug auf die Epidemiologie zeigt sich, dass BPH eine der vorherrschenden Erkrankungen bei Männern über 50 Jahren darstellt (3). Untersuchungen sowie Studien legen nahe, dass rund die Hälfte aller Männer in ihren Sechzigern und bis zu 90% der Männer über 70 Jahren Anzeichen einer BPH zeigen können oder von ihr betroffen sind (1, 3) . Die zugrundeliegenden Ursachen der BPH sind zwar noch nicht gänzlich bekannt, doch werden der altersbedingt hormonellen Veränderungen und der Vaskulopathie eine große Rolle in der Pathogenese zugeschrieben (7).

Die Entwicklung der BPH-Symptome erfolgt schrittweise und kann sich mit der Zeit verschlechtern, wobei zu den üblichen Anzeichen ein verstärkter Harndrang, insbesondere nachts, Startschwierigkeiten bei Beginn der Miktion, ein abgeschwächter Harnstrahl, das Gefühl der unvollständigen Blasenentleerung bzw. des Restharns nach dem Urinieren sowie eine plötzliche Dringlichkeit, urinieren zu müssen, gehört (3, 8). In fortgeschrittenen Stadien kann BPH zu ernsteren Problemen, wie rezidivierenden Harnwegsinfektionen, der Bildung von Blasensteinen und sogar zum Nierenversagen, führen (9).

Die Diagnose der BPH setzt sich aus einer Kombination aus Anamnese, körperlicher Untersuchung und spezifischen Tests zusammen (3).
Die Anamnese zielt darauf ab, die Symptome, deren Schweregrad und Dauer sowie den Einfluss auf die Lebensqualität und den Alltag des Patienten zu erfassen. Hierfür kann der Arzt den International Prostate Symptom Score (IPSS) nutzen, einen Fragebogen, der hilft, die Schwere der Symptome und ihren Einfluss auf das tägliche Leben zu quantifizieren (10).

MARIEN KRANKENHAUS

**I-PSS + Lebensqualitätsindex**

Fragebogen vor Prostataoperationen

| Patientenetikett | Datum | |
|---|---|---|

**Alle Fragen beziehen sich auf die letzten 4 Wochen!**
**Bitte kreuzen Sie das Zutreffende an!**

| | **I-PSS** | → Liste A | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1.** | Wie oft hatten Sie das Gefühl, dass die Blase nach dem Wasserlassen nicht ganz entleert war? | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **2.** | Wie oft mussten Sie innerhalb von 2 Stunden ein zweites Mal Wasserlassen? | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **3.** | Wie oft mussten Sie beim Wasserlassen mehrmals aufhören und wieder neu beginnen? | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **4.** | Wie oft hatten Sie Schwierigkeiten, das Wasserlassen hinauszuzögern? | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **5.** | Wie oft hatten Sie einen schwachen Strahl beim Wasserlassen? | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| **6.** | Wie oft mussten Sie pressen oder sich anstrengen, um mit dem Wasserlassen zu beginnen? | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

| | **I-PSS** | → Liste B | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **7.** | Wie oft sind Sie im Durchschnitt nachts aufgestanden, um Wasser zu lassen? Maßgebend ist der Zeitraum vom Zubettgehen bis zum Aufstehen am Morgen. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

| | **Lebensqualität** | → Liste C | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **L** | Wie würden Sie sich fühlen, wenn sich Ihre jetzigen Beschwerden beim Wasserlassen künftig nicht mehr ändern würden? | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

| **Liste A** | | **Liste B** | | **Liste C** | |
|---|---|---|---|---|---|
| **0** | niemals | **0** | niemals | **0** | ausgezeichnet |
| **1** | seltener als in einem von fünf Fällen | **1** | einmal | **1** | zufrieden |
| **2** | seltener als in der Hälfte der Fälle | **2** | zweimal | **2** | überwiegend zufrieden |
| **3** | ungefähr in der Hälfte der Fälle | **3** | dreimal | **3** | teils zufrieden, teils unzufrieden |
| **4** | mehr als in der Hälfte der Fälle | **4** | viermal | **4** | überwiegend unzufrieden |
| **5** | fast immer | **5** | fünfmal und mehr | **5** | unglücklich |
| | | | | **6** | sehr schlecht |



*Figure 1 IPSS_Fragebogen vor PAE, gemäß Barry et. al (10)*

Bei der körperlichen Untersuchung steht die digitale rektale Untersuchung (DRU) im Mittelpunkt. Dabei tastet der Arzt/die Ärztin die Prostata über den Enddarm, um Größe, Form und Konsistenz bzw. etwaige Unregelmäßigkeiten der Prostata zu beurteilen und Anzeichen einer Verhärtung, die auf Prostatakrebs hinweisen könnte, zu erkennen (11).
Zusätzliche, diagnostische Tests setzen sich zusammen aus Urinanalysen, um Harnwegsinfektionen auszuschließen bzw. zu identifizieren, sowie Bluttests, einschließlich der Bestimmung des Prostata-spezifischen Antigens (PSA), um das mögliche Vorliegen eines Prostatakarzinoms auszuschließen. Obwohl ein erhöhter PSA-Wert auch bei BPH vorkommen kann, hilft er zusammen mit anderen Befunden, zwischen BPH und Prostatakrebs zu unterscheiden (11).
Die Uroflowmetrie, ein Test zur Messung der Stärke und Menge des Urinstrahls, kann zur Bewertung der Beeinträchtigung des Harnflusses eingesetzt werden (3). Ein schwacher Urinstrahl oder Unterbrechungen können auf eine Obstruktion und deren Ausmaß durch eine vergrößerte Prostata hinweisen (11).
Um den Grad der Obstruktion und mögliche Auswirkungen auf die Blasenfunktion zu beurteilen und somit weitere Hinweise für den Schweregrad der BPH zu detektieren, kann in einigen Fällen eine Ultraschalluntersuchung der Prostata und der umliegenden Organe durchgeführt werden, um die Größe der Prostata zu bestimmen und den Restharn in der Blase nach dem Urinieren zu messen (11).
Diese diagnostischen Schritte bzw. die Kombination dieser Verfahren ermöglichen es dem Arzt/der Ärztin eine genaue Diagnose zu stellen und den Schweregrad der BPH zu bestimmen, was für die Auswahl einer angemessenen Behandlungsstrategie entscheidend ist (3). Die Behandlung kann von einfachen Lebensstilanpassungen und Medikamenten bis hin zu verschiedenen operativen oder minimalinvasiven Verfahren reichen, je nachdem, wie stark die Symptome sind und wie sehr sie die Lebensqualität des Patienten beeinträchtigen (11).

## 2.2 Medikamentöse Therapie

Die medikamentöse Behandlung der BPH zielt darauf ab, die Symptome zu lindern und die Lebensqualität der Betroffenen zu verbessern. Sie ist eine bevorzugte Option bei Patienten mit milden bis moderaten Beschwerden und stellt eine Alternative zu invasiveren Verfahren dar, wobei die Auswahl der Medikamente auf der individuellen Symptomatik, dem Gesundheitszustand des Patienten und potenziellen Nebenwirkungen basiert (12).

### 2.2.1 Alpha- Blocker

Eine häufig verschriebene Medikamentenklasse zur Behandlung der BPH stellen die Alpha-Blocker dar, die die Muskelspannung in der Prostata sowie der Blase reduzieren und somit den Urinfluss erleichtern (12). Beispiele hierfür sind Tamsulosin, Alfuzosin und Doxazosin, die häufig eine schnelle Linderung der Symptome erwirken können (11). Mögliche Nebenwirkungen wie die retrograde Ejakulation, die die Zeugungsfähigkeit beeinflussen kann, spielt insbesondere bei jüngeren Männern eine Rolle und sollte in die Therapieentscheidung mit einfließen (13).

### 2.2.2 5-Alpha-Reduktase-Inhibitoren

5-Alpha-Reduktase-Inhibitoren, wie Finasterid und Dutasterid, zielen auf eine langfristige Verkleinerung der Prostata ab (14). Sie wirken, indem sie die Umwandlung von Testosteron in Dihydrotestosteron, ein Hormon, welches das Wachstum der Prostata anregt, blockieren und so das Fortschreiten der BPH verlangsamen und das Risiko von Harnretention und der Notwendigkeit chirurgischer Eingriffe reduzieren (15).
Dies gilt als Standardtherapie bei leichten oder moderaten „lower urinary tract symtoms“ (LUTS), wobei in diesem Krankheitsstadium Symptome wie nächtliches Wasserlassen, inkomplette Blasenentleerung oder akuter Harnverhalt, aber auch erektile Dysfunktion oder ein chronischer Beckenbodenschmerz bestehen (14).

Im Falle rezidivierender Harnverhalte und Harnwegsinfekte oder Harnblasensteine und -divertikel, stellen diese jedoch eine absolute Operationsindikation dar (16).

### 2.2.3 Phosphordiesterase-5-Inhibitoren

Phosphodiesterase-5-Inhibitoren, wie Tadalafil, gehören zu den neueren Therapieoptionen, die zu einer Erhöhung des zyklischen Guanosinmonphosphates führen, die glatte Muskulatur im unteren Harntrakt, einschließlich der Prostata entspannen und sich so auch positiv auf BPH-Symptome auswirken (14, 17). Sie sind ursprünglich zur Behandlung der erektilen Dysfunktion entwickelt worden, haben aber auch eine Verbesserung bei Symptomen der unteren Harnwege gezeigt (11). Aufgrund des Risikos einer signifikanten Hypotension sind sie jedoch bei der gleichzeitigen Einnahme von organischen Nitraten wie Nitroglycerin kontraindiziert (18).

### 2.2.4 Kombinationstherapie

Die Kombinationstherapie, bei der Alpha-Blocker mit 5-Alpha-Reduktase-Inhibitoren kombiniert werden, kann bei Patienten mit größeren Prostatae (>30-40ml) und schwereren Symptomen effektiver sein als die Monotherapie, indem die komplementären Wirkmechanismen der beiden Substanzen genutzt werden (14). Hierdurch wird die glatte Muskulatur der Prostata und der Harnröhre entspannt, was den Harnfluss verbessert sowie ebenfalls die Umwandlung von Testosteron in Dihydrotestosteron gehemmt, was dem Wachstum der Drüse entgegenwirkt (19) . Diese Kombinationsstrategie kann die Symptome signifikant verbessern und das Risiko von Komplikationen verringern (14, 19).
Die Auswahl der geeigneten medikamentösen Behandlung hängt von einer sorgfältigen Bewertung der individuellen Patientensituation ab, wobei regelmäßige Nachsorgeuntersuchungen notwendig sind, um die Wirksamkeit der Therapie zu bewerten und falls erforderlich Anpassungen vorzunehmen (14).

## 2.3 Chirurgische Therapie

Eine chirurgische Therapie kann in Betracht gezogen werden, falls eine Behandlung mit Medikamenten nicht die gewünschte Linderung der Symptome erbringt oder wenn der Patient die medikamentöse Behandlung nicht wünscht (wobei dies eine relative Indikation für einen operativen Eingriff darstellt) (14). Des Weiteren ist eine Operation angezeigt bei Vorliegen von wiederholtem oder hartnäckigem Harnverhalt, einer Überlaufblase, anhaltender, schwerer Blutung im Urin, die auf Medikamente nicht anspricht, Dilatation der Harnwege mit oder ohne begleitende Nierenfunktionsstörung, wiederkehrenden Harnwegsinfektionen, Blasensteinen oder Blasendivertikeln (diese Bedingungen gelten als absolute Indikationen für einen chirurgischen Eingriff) (20).

### 2.3.1 TUR-P

Die transurethrale Resektion der Prostata (TUR-P) gilt als Goldstandard in der chirurgischen Behandlung der BPH bei Prostatavolumina bis 80ml, wobei diese Methode darauf abzielt, die durch die vergrößerte Prostata verursachten Harnwegsobstruktionen und Symptome zu lindern (21). Im Laufe der Jahre hat sich die TUR-P aufgrund ihrer Effektivität und relativen Sicherheit als bevorzugte Behandlungsoption etabliert (20, 21).

Die TUR-P ist ein minimal-invasives Verfahren, das unter Vollnarkose oder Spinalanästhesie durchgeführt wird. Während dieser Prozedur wird ein Resektoskop durch die Harnröhre in die Prostata eingeführt, wobei dann ein elektrischer Schneideloop am Ende des Resektoskops schichtweise das überschüssige Prostatagewebe entfernt, das die Harnröhre blockiert (21). Anschließend wird das abgetragene Gewebe zur pathologischen Untersuchung gesendet, was zusätzlich den Vorteil bietet, eventuell vorhandenen Prostatakrebs auszuschließen oder diesen frühzeitig zu erkennen (22).

Die Vorteile der TUR-P umfassen eine signifikante Verbesserung der Harnflussrate und eine Reduktion der Symptome der unteren Harnwege, wobei die Patienten häufig über eine deutliche Verbesserung der nachfolgenden Lebensqualität nach dem Eingriff berichten (21). Darüber hinaus bietet die TUR-P den Vorteil, dass keine äußeren Schnitte erforderlich sind, was zu einer kürzeren

Erholungszeit und geringeren Schmerzen im Vergleich zu anderen, offenen chirurgischen Verfahren führt (21, 23).
Trotz der Vorteile ist die TUR-P nicht ohne Risiken. Zu den möglichen Komplikationen gehören Blutungen, Infektionen, Harnwegsinfektionen, retrograde Ejakulation (Samenflüssigkeit gelangt in die Blase statt nach außen) und in seltenen Fällen eine TUR-Syndrom genannte Wasserintoxikation, die durch die Absorption von Spülflüssigkeit während des Eingriffs verursacht wird (21, 22). Moderne Techniken und Ausrüstungen haben jedoch dazu beigetragen, das Risiko dieser Komplikationen zu minimieren (24).

### 2.3.2 Adenomenukleation der Prostata

Ein häufig als offene Prostatektomie bezeichneter Eingriff ist die Adenomenukleation, die ebenfalls eine chirurgische Therapie der BPH darstellt und vor allem für Patienten mit einem erheblich vergrößerten Volumen der Drüse über 80ml eine Behandlungsoption offeriert (20).
Dieses Verfahren wird typischerweise bei Patienten angewandt, deren Prostatagröße oder die Komplexität ihrer Symptome eine weniger invasive Behandlung, wie die TUR-P, ungeeignet macht (25, 26). Während des Eingriffes erfolgt ein Schnitt in der unteren Bauchregion, um Zugang zur Prostata zu erhalten und nachfolgend das überschüssige Prostatagewebe schrittweise von der chirurgischen Kapsel zu trennen und entfernen, wobei die äußere Schicht der Drüse und die Harnröhrenpassage erhalten bleiben (20). Da die Prozedur unter Vollnarkose durchgeführt wird, erfordert sie in der Regel einen Krankenhausaufenthalt von mehreren Tagen (21, 22).
Verglichen mit weniger invasiven Verfahren wie der TUR-P kann die Erholungszeit länger dauern, bietet jedoch für Patienten mit großen Prostatavolumina oder bei denen das Risiko für Komplikationen bei alternativen Verfahren zu hoch ist, eine effektive Lösung (20, 26).
Die Vorteile der Adenomenukleation umfassen eine langanhaltende Linderung der Harnwegssymptome und des Urinflusses, eine deutliche Verbesserung der Lebensqualität und eine geringe Wahrscheinlichkeit einer erneuten Behandlung (11, 20, 27). Allerdings ist das Verfahren mit Risiken, darunter Blutungen,

Infektionen und Probleme mit der sexuellen Funktion verbunden und birgt die Gefahr bzw. Komplikation einer längerfristigen Harninkontinenz (20).
Trotz der Fortschritte in diversen minimal-invasiven Techniken bleibt die Adenomenukleation eine wichtige Behandlungsoption für ausgewählte Patienten mit BPH (26).

### 2.3.3 Transurethrale Enukleationsverfahren

#### 2.3.3.1 HoLEP (Holmiumlaser-Enukleation der Prostata)

Eine fortschrittliche, minimal-invasive chirurgische Technik für die Behandlung der BPH repräsentiert die Holmiumlaser-Enukleation (HoLEP) der Prostata (28) . Diese Methode nutzt die präzise Schneide- und Koagulationsfähigkeit des Holmiumlasers, um prostatisches Adenomgewebe effektiv zu resezieren, wobei gleichzeitig eine exzellente Hämostase gewährleistet werden kann (29). Hierbei wird ein gepulster Laser genutzt um das hyperplastische Gewebe aus der Kapsel herauszulösen, nachfolgend in der Blase zu zerkleinern und abzusaugen (28, 30). Im Gegensatz zu traditionellen, chirurgischen Verfahren ermöglicht die HoLEP die Entfernung von Prostatagewebe unabhängig von der Prostatagröße, was sie zu einer vielseitig einsetzbaren Methode macht (29, 30).
Klinische Studien haben eine signifikante Verbesserung der miktionsbezogenen Symptome und eine hohe Patientenzufriedenheit postoperativ aufgezeigt (30). Darüber hinaus ist die HoLEP mit einer geringeren Rate an perioperativen Komplikationen, einer verkürzten Katheterisierungszeit und einem kürzeren Krankenhausaufenthalt assoziiert, was die Effizienz und Sicherheit der HoLEP als Goldstandard in der chirurgischen Behandlung der BPH unterstreicht (28-30).

#### 2.3.3.2 ThuLEP (Thuliumlaser-Enukleation der Prostata)

Ein weiteres minimal-invasives, chirurgisches Verfahren zur Behandlung der BPH, das einen ähnlichen Vorgangsweg wie der HoLEP nutzt, stellt die Thuliumlaser-Enukleation (ThuLEP) der Prostata dar, die zunehmend an Bedeutung gewinnt (31).

Durch die Anwendung des Thuliumlasers ermöglicht diese Behandlungsweise mit einem kontinuierlichen Laserstrahl eine präzise Abtragung des vergrößerten Prostatagewebes (31). Hervorzuheben ist die hohe Absorptionsrate des Lasers in Wasser, was zu einer effizienten und kontrollierten Gewebeablation bei gleichzeitiger Minimierung von Blutungsrisiken führt (27). Eine verbesserte Hämostase und die Möglichkeit, selbst bei größeren Prostatavolumina eingesetzt werden zu können stellen signifikante Vorteile der ThuLEP im Vergleich zu anderen Laserverfahren dar (31). Die präzise Schnittführung des Thuliumlasers erlaubt eine sorgfältige Entfernung des obstruierenden Prostatagewebes, während die umliegenden Strukturen geschont werden, was zu einer schnellen Erholung der Blasenfunktion und einer Reduktion der postoperativen Beschwerden führt (27, 31).
Besonders bei Patienten mit mittleren bis großen Prostatavolumina gilt die ThuLEP als eine sichere und effektive Alternative zur TUR-P oder der offenen Prostatektomie, da eine Verbesserung der Symtome des LUTS und der Lebensqualität sowie niedrige Reoperationsraten und eine hohe langfristige Erfolgsrate durch zahlreiche Studien belegt wurde (27, 31, 32).

#### 2.3.3.3 BipolEP (Bipolare Enukleation der Prostata)

Eine weitere endoskopische, inzwischen häufig angewandte und mittlerweile etablierte Methode zur Behandlung der BPH ist die bipolare Enukleation der Prostata (BipolEP) (33). Durch den Einsatz bipolarer Energie ermöglicht diese Methode über elektrische Energie eine effiziente Abtragung des vergrößerten Prostatagewebes, während gleichzeitig die Blutstillung durch die Koagulationsfähigkeit der bipolaren Energie gewährleistet wird (28, 33).
Die BipolEP zeichnet sich, ähnlich wie die beiden zuletzt aufgeführten Verfahren, durch ihre Fähigkeit aus, selbst bei großen Prostatavolumina effektiv und sicher eingesetzt zu werden, wobei insbesondere die Reduktion des Risikos für Blutungen und eine schnelleren Erholungsphase im Vergleich zu traditionellen Methoden hervorzuheben ist (33, 34).
Durch eine ähnliche Technik der TUR-P, ist dieses Verfahren mit einer kürzeren Lernkurve, wenn bereits Erfahrungen mit TUR-P vorhanden sind, verbunden, was

sie durch eine schneller erlernbare Routine und einer kürzeren Lernkurve als sichere Alternative zu ThuLEP und HoLEP macht (35).

## 2.4 Prostataarterienembolisation - geschichtlicher Hintergrund

Die Geschichte der Prostataarterienemboliation (PAE) beginnt in den frühen 2000er Jahren, als Forscher begannen, die Prozedur zu erkunden, die arterielle Blutzufuhr zur Prostata selektiv zu blockieren, um so die Größe der Prostata zu reduzieren und die Symptome der BPH zu lindern. Die ersten dokumentierten Fälle von PAE zur Behandlung der BPH wurden 2000 von DeMeritt et al. vorgestellt, die zeigten, dass die Embolisation der Prostataarterien eine potenzielle nicht-chirurgische Behandlungsoption für Patienten mit BPH darstellen könnte (36).

Im Jahr 2010 kam es durch eine Studie von Carnevale et al. zu einem Wendepunkt, indem sie die Sicherheit und Wirksamkeit der PAE bei der Reduktion des Prostatavolumens und der Verbesserung von Symptomen des LUTS herausarbeiteten und beweisen konnten (37). Diese Studie gilt als Meilenstein und ebnete den Weg für weitere Forschung und die allmähliche Akzeptanz der PAE als Behandlungsoption für BPH (16, 38).

Im Laufe der Jahre hat die technologische Entwicklung, insbesondere in Bezug auf Katheter und Embolisierungsmaterialien, die Präzision und Sicherheit der PAE verbessert (39) . Moderne Bildgebungstechniken wie die Cone-Beam-CT (CBCT) haben die Visualisierung der Prostataarterien und die gezielte Embolisation erleichtert, was zu höheren Erfolgsraten und einer weiteren Reduzierung von Nebenwirkungen geführt hat (16, 40).

Studien haben die PAE mit traditionelleren Behandlungsmethoden wie der TUR-P und der offenen Prostatektomie verglichen. Während TUR-P und Prostatektomie effektiv die Symptome der BPH reduzieren, sind sie mit einem höheren Risiko für Komplikationen verbunden, einschließlich Blutungen, sexueller Dysfunktion und Harninkontinenz (8, 11, 20, 38, 39, 41). Die PAE bietet somit eine vielversprechende Alternative zu den bisherig etablierten Behandlungsverfahren, indem sie ein geringeres Risiko dieser Komplikationen bei vergleichbarer Symptomlinderung bietet (39, 42, 43).

Durch eine stetig weiter zunehmende Anzahl an Studien, die ihre Wirksamkeit und Sicherheit belegen, ist die Akzeptanz der PAE über die Jahre inzwischen weltweit gewachsen, sodass Organisationen wie die Society of Interventional Radiology (SIR) und die European Society of Radiology (ESR) Leitlinien und Trainingsprogramme entwickelt haben, um die Qualität der PAE-Behandlung sicherzustellen und ihre Anwendung weiter zu fördern (4, 8, 39).
Zukünftige Forschungen konzentrieren sich auf die Optimierung der PAE-Technik, die Erweiterung der Indikationen für ihre Anwendung und die Langzeitergebnisse der Behandlung.

## 2.5 PAE Prozedurbeschreibung

Der Prozess der PAE beginnt nach lokaler Anästhesie mit der Einführung eines Katheters in eine Femoralarterie am Oberschenkel unter bildgebender Führung, üblicherweise mithilfe von Röntgenstrahlen (44). Der Interventionalist navigiert nachfolgend den Katheter durch das Gefäßsystem bis zu den Arterien, die die Prostata versorgen (37). Die genaue Lokalisation dieser Arterien ist entscheidend für den Erfolg des Eingriffs und erfordert detaillierte anatomische Kenntnisse sowie den Einsatz fortschrittlicher Bildgebungstechniken, wie der digitalen Subtraktionsangiografie (DSA), um eine präzise Visualisierung der Arterien und den Vorgang der superselektiven Embolisation zu erreichen (16).
Sobald der Katheter korrekt positioniert ist, wird ein Gemisch aus Kontrastmittel und mikroskopisch kleinen Embolisationspartikeln durch den Katheter in die Prostataarterien unter Durchleuchtung bis zur vollständigen Stase des zur Kontrolle der Embolisation injizierten Röntgenkontrastmittels injiziert als Nachweis des vollständigen Gefäßverschlusses (45). Diese Partikel blockieren gezielt die Blutzufuhr zum hyperplastischen Prostatagewebe, was längerfristig zu einer Schrumpfung des von der Blutversorgung abgetrennten Prostatagewebes und hierdurch zu einer Verbesserung der klinischen Symptome wie bspw. der Harnentleerungsstörung führt (39). Die Auswahl der Partikelgröße und des Materials ist entscheidend, um eine effektive Embolisation zu gewährleisten und das Risiko von Nebenwirkungen zu minimieren (16, 39, 44).
Die gesamte Therapie dauert in der Regel zwischen 1 bis 3 Stunden, abhängig von der Komplexität der Prostataarterienanatomie sowie dem Zustand der großen

Arterien, je nach dem Grad der arteriosklerotischen Veränderungen mit konsekutiven Stenosen und dem dadurch bedingten, deutlich elongierten Verlauf, dem sogenannten Kinking und der Erfahrung des behandelnden Arztes (39, 45, 46). Vor der Prozedur wird ein Blasenkatheter gelegt, welcher nach der Behandlung noch ein bis zwei Tage verbleibt, bzw. bis der Patient das Krankenhaus verlässt, da die Prostata nach der Embolisation als physiologische Reaktion auf diese gering anschwellen kann (47).

## 2.6 Patientenauswahl vor PAE

Für das Ergebnis eine PAE ist eine vorherig adäquate Patientenauswahl von entscheidender Bedeutung (48).

Hauptindikationen für PAE:

1. Männlich
2. > 40 Jahre
3. Prostatavolumen > 30 cm
4. BPH-Diagnose mit moderaten LUTS (IPSS >18; QoL> 3)
5. Mind. 6 Monate erfolglose medikamentöse Therapie, bzw. akuter Harnverhalt trotz medikamentöser Therapie

Hauptkontraindikationen für PAE:

1. Nachgewiesene Malignität
2. Große Blasendivertikel/ -steine, Detrusorinsuffizienz, chronische Niereninsuffizienz
3. Fortgeschrittene Arteriosklerose der Iliakal- oder Prostatagefäße

Da es sich bei der BPH um eine gutartige Erkrankung handelt, muss neben der Zielsetzung die klinische Beschwerdesymptomatik zu verbessern auch ein Augenmerk auf die Strahlenexposition, die dieser Eingriff mit sich führt, gelegt werden. Diese kann insbesondere durch die Durchführung von CBCTs sowie auch durch die zeitaufwändige Durchleuchtungszeit (FZ), die DSA und Spezialaufnahmen (oblique und Vergrößerungsbilder) zu einer relevanten

Strahlenexposition führen. In einer Studie von Andrade et. al. machte die DSA 71,5 % des Dosisflächenproduktes aus, gefolgt von der Durchleuchtungszeit mit 19,9% und der Anwendung von Cone-Beam CT's 8,6% (49). In dieser Arbeit lag die mittlere Durchleuchtungszeit bei 30,9 ±9,5 min, mit 463,5±110,7 Bildern der DSA (entsprechend 659,9±90,6 mA) und 400,1 ±2,4 Bildern (entsprechend 349,7±34,5 mA) bei den Cone-Beam CT's, sodass die SE (Strahlenexposition) einen nicht zu vernachlässigenden Faktor dieses Eingriffes darstellt (49).
Auch die unterschiedlichen anatomischen Varianten der Prostataarterie, ein schmaler Gefäßdurchmesser und das Ziel, die Arterien auf beiden Seiten zu behandeln, kann den radiologischen Therapeuten vor eine große Herausforderung stellen (4, 50). Intraprozedurales CBCT wird verwendet um die Katheternavigation zu perfektionieren und zu erleichtern, wenn der Hauptversorgungsast und/oder kleine Kollateralen der Arterie schwierig zu finden sind, wobei die Anwendung dieser Bildgebung mit einer hohen SE verknüpft ist (51).

# 3. Material und Methoden

Diese Studienretrospektive wurde von der zuständigen Ethik-Kommission genehmigt (Ethikvotum Nr: WF-040/18) und in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki sowie den einschlägigen internationalen und nationalen Richtlinien durchgeführt.
Eingeschlossen wurden 300 Patienten zwischen Januar 2017 und November 2018 mit BPH, welche im Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie am katholischen Marienkrankenhaus Hamburg mittels PAE behandelt wurden. Alle Patienten waren 50 Jahre und älter und wurden mindestens 6 Monate erfolglos medikamentös behandelt. Der initiale IPSS zeigte einen moderaten bis schweren LUTS, welcher durch einen Score von 8 oder höher und einen QoL (quality of life index) >3 repräsentiert wurde.
Bei den Patientendaten belief es sich auf ein Alter von 70,7± 9,0 Jahre (49,9-92,4 Jahre), ein Gewicht von 84,0 Kg ± 13,4 Kg (50,0-150,0 Kg), eine Körpergröße von 1,77m ± 0,06m(1,60-1,94m), sowie ein BMI (Body Mass Index) von 26,6 ± 3,7 (17,5-44,8ml).
Ausschlusskriterien waren Patienten mit einem Malignom, großen Blasendivertikeln oder Blasensteine. Diese wurden nicht mittels PAE behandelt.

## 3.1 Prozedere

Alle PAEs wurden mittels eines ceiling mounted uniplanar flat planel angiographic system (Artis Zee, Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland) unter Zuhilfenahme eines CBCT-Technologie (syngo Dyna CT, Siemens Healthineers,Erlangen, Deutschland) durchgeführt.
Die Embolisation wurde mittels bereits etablierter Verfahren wie durch Carnevale et al. (8) umgesetzt, wenn möglich in PErFecTED-Technik (37). Unter Lokalanästhesie wurde ein transfemoraler (A. femoralis communis), arterieller 5F Zugang eingebracht, üblicherweise in die rechte Leiste. Die iliakale Strombahn wurde mittels eines 5F Drahtes (Glidecath ™, Non-taper angle Type T90, Terumo, Tokyo, Japan) selektiert in ipsilateral-oblique (35°-40°) und caudo-cranialer Angulation (15°-20°) mittels nichtionischen, jodhaltigen Kontrastmittel (Ultravist® 300mg iodine/ml, Bayer Vital, Leverkusen, Deutschland). Für die Katheterisierung

der prostatischen Gefäße wurden beidseits ein 2.4F Renegade™ oder ein Direxion™ Mikrokatheter (Boston Scientific, Marlborough, Massachusetts, USA) und ein 0.016-inch Glidewire GT (Terumo, Tokyo, Japan) verwendet.
Für die Embolisation wurden sphärische Mikropartikel (100-300 µm und/oder 300-500 µm Embospheres®, Merit Medical, Eschborn, Deutschland) bis zur vollständigen Stase injiziert. Um eine Fehlembolisation zu verhindern, wurde bei jeder Prozedur vor Gabe der Embospheren sowie, wenn zur absolut sicheren Visualisierung der versorgenden Gefäße erforderlich, ein CBCT durchgeführt. Soweit möglich, erfolgte die Embolisaton beidseits.

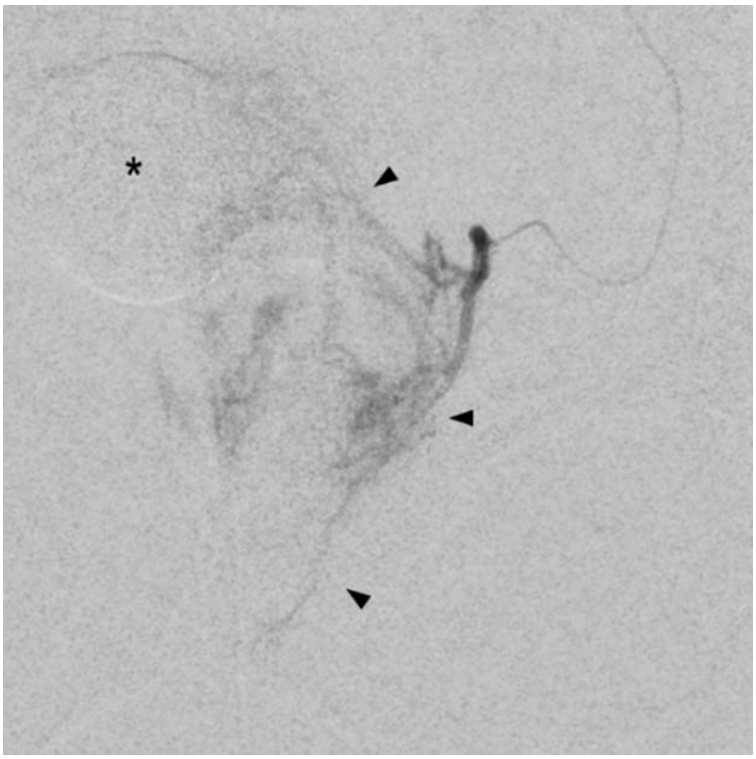

*Figure 2 DSA vor Embolisation*

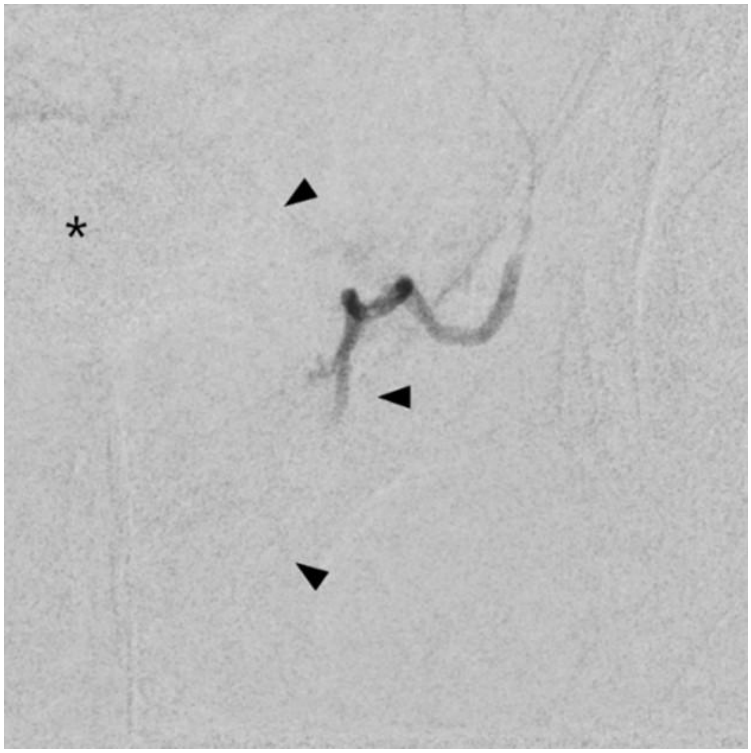

*Figure 3 DSA nach Embolisation*

*Figure 2+3: Digitale Subtraktionsangiografie des distalen, linksseitigen Prostataperfusionsterritoriums (Pfeilspitzen) und der Ballon des Blasenkatheters (Asterix) welche als anatomische Landmarke verwendet wird; vor (Figure 2) und nach (Figure 3) Embolisation.*

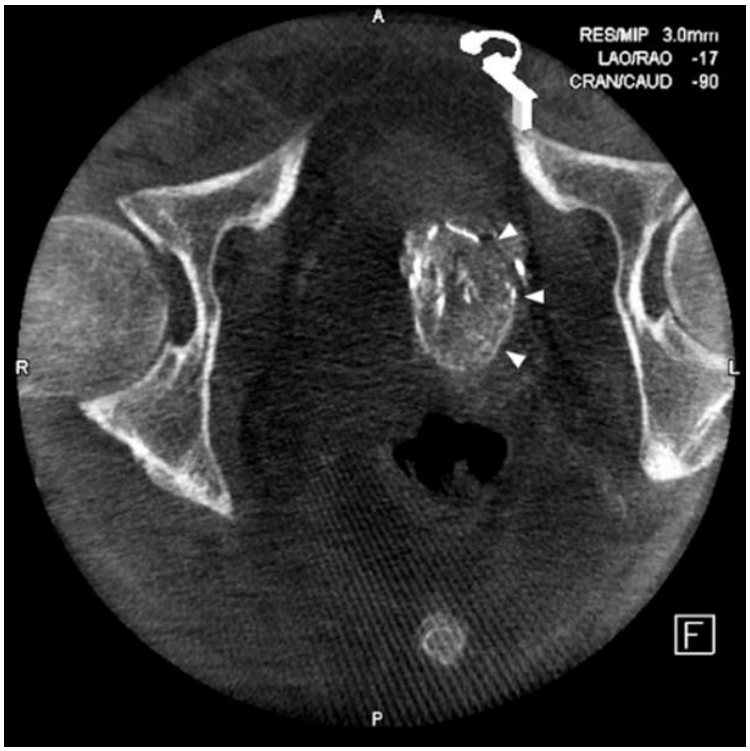


*Figure 4 CBCT axial*

*Figure 5 CBCT coronal*

*Figure 4+5:* Dreidimensionale Darstellung des Prostataperfusionsterritoriums durch Cone-Beam Computertomographie; axial (*Figure 4)* und coronal (*Figure 5)* vor der Embolisation.

Das CBCT wurde mit einem Bildausschnitt (field of view; FOV) von 48 cm oder 42 cm durchgeführt mit einer Rotationszeit von 6 Sekunden und mit der Aquirierung von Einzelbildern nach jeweils 0,5 Grad mit insgesamt 396 Einzelbildern pro CBCT und einer Stromstärke von 125kVp bei ungefähr 0.36 µGy. CBCT Aquisition und Rekonstruktion erfolgte mittels Artis zee (VC21C) und syngo Workplace (VB21N) Software an einer Leonardo Arbeitsstation (alle Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland). Wenn dies benötigt wurde, war eine dreidimensionelle Darstellung ebenfalls zu berechnen (Embolization Guidance, Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland).

## 3.2 Outcome und Dosisparameter

Der technische Erfolg (TE) wurde definiert als komplette Stase mindestens einer Prostataarterie. Die Fluoroskopiezeit (FT, in Minuten), das Dosisflächenprodukt (DAP, in Gy*cm$^2$) und die Anzahl an verwendeten CBCTs (No_CBCT) wurde aus dem Dosisreport des Bildarchivierungs- und Kommunikationssystems (PACS, GE centricity universal viewer, Version 6.0) entnommen. Anteiliges DAP für die Fluoroskopie (DAP_fluo), DSA (DAP_DSA) und CBCT (DAP_CBCT) wurden separat erhoben. Des Weiteren wurden insgesamt drei Subgruppen hinsichtlich des technischen Erfolgs berücksichtigt und für jeden Patient wurde der durchführende, radiologische Interventionalist als Schnittpunkt/Intercept (IR1) aufgeführt.

## 3.3 Statistik

Für alle statistischen Präsentationen wurde SPSS Statistics version 27 (IBM Corporation, Armonk, NY, USA) zur Kalkulation verwendet. Die Datenverteilung der absoluten Strahlungsexposition (DAP_all) wurde untersucht durch Mittelwerte von Histogrammen und Boxplots. Die Variable DAP_all wurde nachfolgend in den natürlichen Logarithmus umgeformt, da die Datenverteilung rechtsschief war. Für die deskriptive Statistik wurden der Mittelwert, Minimum- und Maximumwerte sowie die Standardabweichung (SD) berechnet. Korrelationen zwischen den Variablen wurden mittels Spearman’s Rho Koeffizient bemessen. Lineare

gemischte Modelle wurden eingepasst in die umgewandelten Datenwerte der abhängigen Variablen DAP-all (SPSS routine MIXED), unter Verwendung des Alters, des BMI‘s, der fortlaufenden Patientenzahl (PtNO) und der Durchleuchtungszeit (DZ) als eine kontinuierliche Kovariante, technischer Erfolg als eine kategorisch unabhängige Variable, sowie der durchführende, radiologische Interventionalist (IR1) als eine zufällige Auswirkung. Bezüglich des technischen Erfolgs wurde eine bilaterale Embolisation als kategorische Referenz gewählt.

# 4. Ergebnisse

## 4.1 Patienten

In dieser Studie wurden 300 aufeinanderfolgende Patienten, bei denen zwischen Januar 2017 und November 2018 eine PAE durchgeführt wurde, eingeschlossen. Die Kohorte bestand dabei aus männlichen Patienten mit einem Durchschnittsalter von 70.7 $\pm$ 9.0 Jahren (Spannweite 49.9 – 92.4 Jahren) und einem BMI von 26.6 $\pm$ 3.7 Kg/m$^2$ (Spannweite 17.5 – 44.8 Kg/m$^2$), wobei lediglich 33% einen normalen BMI aufwiesen; 43.3% waren übergewichtet, wobei 16.3% ein Übergewicht Grad I oder höher mit einem BMI von 30 Kg/m$^2$ oder mehr aufzeigten *(Table 1 Gewichtsverteilung der Patienten).* Diese Graduierungen wurden entsprechend der 2019 veröffentlichten Richtlinien der Adipositas Prävalenz durch die globale Adipositasbeobachtungsstelle angepasst.

Table 1 Gewichtsverteilung der Patienten

| **Kategorie** | **BMI** | **Patienten (%)** |
|---|---|---|
| Untergewicht | < 18.5 | 2 (0.7%) |
| Normal | 18.5-24.9 | 99 (33.0%) |
| Übergewicht | 25-29.9 | 133 (43.3%) |
| Adipositas I | 30-34.9 | 43 (14.3%) |
| Adipositas II | 35-39.9 | 5 (1.7%) |
| Adipositas III | > 40 | 1 (0.3%) |
| Fehlendes Gewicht | n/a | 17 (5.7%) |

**Anmerkung:** Gesamtzahl der Patienten in jeder Kategorie mit Prozentangaben in den Klammern. Bei 27 Patienten konnten die Gewichtsdaten retrospektiv nicht mehr erhoben werden. BMI in kg/m².

**Abkürzungen:** BMI, Body mass index

## 4.2 Technischer Erfolg

Technischer Erfolg wurde bei 95.3% erreicht, wobei eine bilaterale Embolisation bei 67.3% und eine unilaterale bei 28.0% erlangt werden konnte. Bei 4.7% (14 Patienten) verlief die PAE auf beiden Seiten frustran, dies wurde als technischer Misserfolg festgehalten wurde *(Table 2 Verteilung des technischen Erfolges und technischen Misserfolges).*

### Table 2 Verteilung des technischen Erfolges und technischen Misserfolges

| **Kategorie** | **Subkategorie** | **PA erfolgreich embolisiert** | **Patient (%)** | **No_CBCT** |
|---|---|---|---|---|
| Technischer Erfolg | Bilaterale Embolisation | 2 | 202 (67.3%) | 1.6 |
| | Unilaterale embolisation | 1 | 84 (28.0%) | 2.1 |
| Technischer Misserfolg | Keine Seite embolisiert | 0 | 14 (4.7%) | 2.5 |

**Anmerkung:** Die Nummer in den Klammern repräsentiert Prozentpunkte in dieser Studie

**Abkürzungen:** PA; Prostataarterie

## 4.3 Gründe für den technischen Misserfolg

Die Hauptursache für eine bilateral fehlgeschlagene Embolisation war bei 64.3% eine schwere Atherosklerose der A. iliaca interna. Eine detaillierte Liste der Gründe für einen technischen Misserfolg sind in *Table 3 Liste der Gründe für technischen Misserfolg* aufgeführt.

Table 3 Liste der Gründe für technischen Misserfolg

| **Gründe für technischen Misserfolg** | **Patientennummer (Anzahl PAs)** |
|---|---|
| Starke Arterienelongation | 2 (4) |
| Unmöglichkeit der Selektierung der PA | 3 (4) |
| Starke Atherosklerose der AII und/oder PA | 9 (16) |
| Embolisation mit Beeinträchtigung von Kollateralen von Nicht-Zielläsionen (Blase,Penis) | 2 (4) |

**Anmerkung:** 14 Patienten mit technischem Misserfolg, wobei mehrere Gründe pro Patient möglich waren.

**Abkürzungen:** PA, Prostataarterie; AII Arteria iliaca interna

## 4.4 Dosisparameter

Die mittlere FZ betrug 49.3 $\pm$ 23.2 min wobei die mittlere DAP_all 98.51 $\pm$ 49.34 Gy*cm$^2$ betrug. Das mittlere DFP wurde am wenigsten durch die DSA beeinflusst mit 20.48Gy*cm$^2$, 20.8%, gefolgt von der Fluoroskopie mit 22.08 Gy*cm$^2$, 22.4% und am höchsten durch das CBCT 56.93 Gy*cm$^2$, 57.8%.
Insgesamt wurden 681 CBCT Serien in unserer Kohorte von 300 Patienten mit einem Durchschnitt von 2.3 CBCTs pro Patient aufgezeichnet. Die durchschnittliche Strahlendosis pro CBCT Serie lag bei 24.41 $\pm$ 9.65 Gy*cm$^2$, was 24.8% des Gesamtdosisflächenproduktes pro Eingriff ausmacht. Box plots des Dosisflächenproduktes (DAP) und der Fluoroskopiezeit (FZ) sowie eine detaillierte Gliederung der partiellen/einzelnen Dosisflächenprodukte (DAPs) werden in *Table 4 Dosisparameter* und *Figure 5/6* dargestellt.

Table 4 Dosisparameter

| Dosisparameter | N | Mittelwert | SD | Minimum | Maximum |
|---|---|---|---|---|---|
| FZ [min] | 300 | 49.3 | 23.2 | 4.1 | 138.6 |
| DAP_all [Gy*cm²] | 294 | 98.51 | 49.34 | 5.58 | 328.91 |
| DAP_fluo [Gy*cm²] | 283 | 22.07 | 15.42 | 1.66 | 93.72 |
| DAP_DSA [Gy*cm²] | 285 | 20.48 | 26.41 | 0.43 | 184.44 |
| DAP_CBCT [Gy*cm²] | 292 | 56.93 | 30.17 | 0 | 190.89 |
| No_CBCT | 295 | 2.3 | 1.1 | 1 | 6 |
| Dosis pro CBCT Serie [Gy*cm²] | 681 | 24.41 | 9.65 | 5.89 | 55.26 |

**Anmerkung:** Fehlende Datensätze, die aufgrund eines technischen Fehlers während des Überwachungszeitraumes aus beschädigten Archiven stammen.

**Abkürzungen:** N, Anzahl der Datensätze; SD, Standardabweichung; FZ, Fluoroskopiezeit; DAP, dose area product/Dosisflächenprodukt; DAP_all, Gesamt-DAP/Dosisflächenprodukt; DAP_fluo, DAP der Fluoroskopieserien; DAP_DSA, DAP der digitalen Subtraktionsangiografieserien; DAP_CBCT, DAP des cone-beam CTs; No_CBCT, Anzahl an CBCT Serien pro Patient.

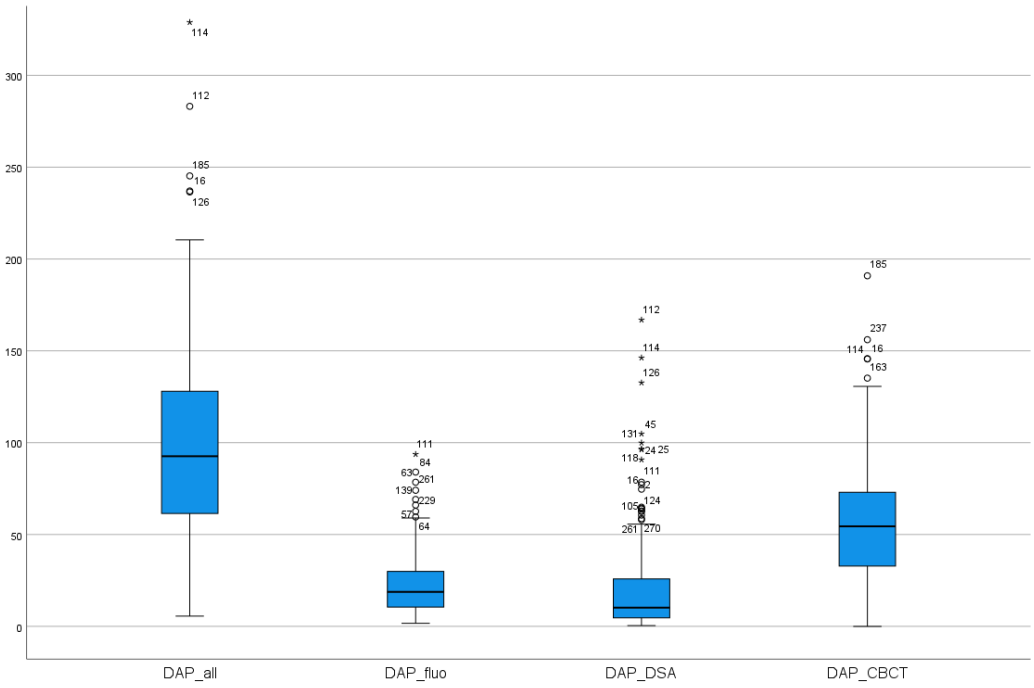


*Figure 6 Box Plots DAP*

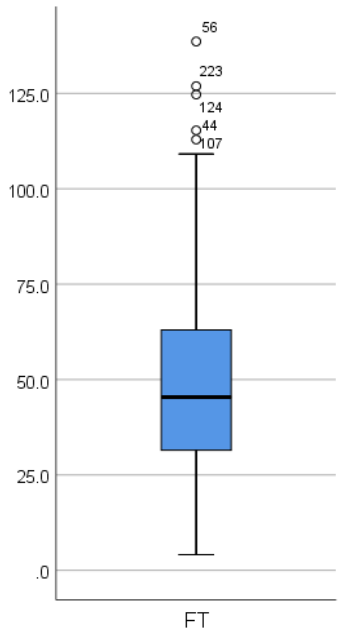


*Figure 7 Box Plot FT*

*Figure 6+7:* Box plots des totalen und partiellen Dosisflächenproduktes (DAP) und der Fluoroskopiezeit (FT).

**Anmerkung:** alle DAPs sind angegeben in Gy*cm², FT in Minuten

**Abkürzungen:** DAP, Dosisflächenprodukt; DAP_all, totales DAP; DAP_fluo, DAP der Fluososkopieserien; DAP_DSA, DAP der digitalen Subtractionsangiografieserien; DAP_CBCT, DAP der cone-beam Computertomographien; FT, Fluoroskopiezeit

Beim Vergleich der Patientengruppen in Bezug zu den CBCT Serien pro Patient in Abhängigkeit zum technischen Erfolg zeichneten wir eine hohe Differenz zwischen bilateraler Embolisation (2.5) sowie beiderseits unilateraler Embolisation (2.1) und technischem Misserfolg (technical failure) (1.6; p=0.04 und p=0.009, jeweils) auf. Unter dieser Berücksichtigung gab es keine signifikante Differenz zwischen der Gruppe des technischen Misserfolges und der unliateralen Embolisation (p=0.379).

## 4.5 Einflussfaktoren der Strahlenexposition

In einer mixed model multifaktoriellen Regressionsanalyse stellte sich das Patientenalter nicht als Einflussfaktor bzgl. des Gesamtdosisflächenproduktes (DAP_all) dar, während BMI, FZ und PtNo (steigende Patientennummer) eigenständige Einflusswerte mit einem signifikanten Level waren. Institutionserfahrung, gemessen durch die PtNo zeigte eine mittlere Dosisreduktion von 0.26 Gy*cm$^2$ pro Fall. Bei adipösen Patienten steigt die Strahlenexposition durch ein höheres Dosisflächenprodukt um 3.35 Gy*cm$^2$ pro zusätzlichem BMI-Punkt. Darüber hinaus wurde eine längere FZ mit einer Erhöhung der Dosis um 0.77 Gy*cm$^2$ pro Minute verzeichnet. Bezüglich des technischen Outcomes der PAE beeinflussten eine unilaterale Embolisation sowie der technische Misserfolg individuell die Strahlenexposition (SE). Hierbei kam es zu einer Reduktion des Mittelwertes bei einseitiger PAE um 12.84 Gy*cm$^2$ und einer Reduktion um 22.47 Gy*cm$^2$, wenn keine Embolisation durchgeführt werden konnte. Der Einfluss des interventionellen Radiologen (IR1) als ein Schnittpunkt/Intercept war statistisch nicht relevant, während die Interceptabweichung hoch war (*Table 5 Mixed model Analyse der Einflussfaktoren auf das Gesamtdosisflächenprodukt*).

Table 5 Mixed model Analyse der Einflussfaktoren auf das Gesamtdosisflächenprodukt

| | | | 95% CI [cGy*cm²] | |
|---|---|---|---|---|
| **Variable** | **b [Gy*cm²]** | **p** | **Untergrenze** | **Obergrenze** |
| Intercept | 31.95 | 0.258 | -23.50 | 87.399 |
| Technischer Misserfolg | -22.47 | 0.044 | -44.32 | -0.617 |
| Unilaterale Embolisation | -12.84 | 0.020 | -23.66 | -2.019 |
| Alter | -0.31 | 0.231 | -0.82 | 0.198 |
| BMI | 3.35 | < 0.001 | 2.12 | 4.58 |
| PtNo | -0.26 | < 0.001 | -0.31 | -0.20 |
| FT | 0.77 | < 0.001 | 0.55 | 1.00 |
| Zufällige Interceptvarianz (IR1) | 19733.53 | 0.169 | 47.44 | 82087.78 |

**Anmerkungen:** DAP_all wurde als abhängige Variable bestimmt. Eine bilaterale Embolisation wurde als Referenz für den technischen Erfolg gewählt. Die Kalkulation wurde unter Berücksichtigung des Einflusses von IR1 als möglicher Achsenabschnitt korrigiert.

**Abkürzungen:** Alter, Patientenalter; BMI, Patienten Body mass index; PtNo, steigende Patientennummer, FZ, Fluoroskopiezeit, DAP_all, Gesamtstrahlenexposition; IR1 durchführender Interventionalist.

# 5. Diskussion

Das Ziel dieser Kontrollstudie war es die beeinflussenden Faktoren, die maßgeblich zur Strahlenexposition (SE) und Erfolgsrate der Prostataarterienembolisation (PAE) beitragen herauszuarbeiten. Im Vergleich zur transurethralen Prostataresektion (TUR-P) bietet die PAE weniger intra- und postprozedurale Risiken, bringt jedoch eine signifikante SE mit sich (41). Aufgrund der bislang limitierten Datenlage bzgl. der Behandlungsmethode einer PAE bei lower urinary-tract-sympotms (LUTS) sowie nachfolgend der benignen Prostatahyperplasie (BPH), erfordert es die weitere Notwendigkeit der Erforschung dieser Maßnahme.

In der hier vorgelegten Studie betrug der Durschnitts-DFP-Wert pro Prozedur 98,51 Gy*cm$^2$, mit Werten zwischen 5,58 – 328,91 Gy*cm$^2$, welcher im Vergleich zu den Resultaten der UK-ROPE Studie, die einen Durchschnittswert von 178,92 (113,0-309,05) Gy*cm$^2$ betrugen, beträchtlich niedriger war (41). Die niedrigsten Werte wurden bislang von Schott et al. (2019) beschrieben, welcher ebenfalls bilaterale PAE's durchführte und einen Durschnitts-DFP von 134,4 Gy*cm$^2$ pro Eingriff benötigte (46). Auch im Vergleich zu den Resultaten von Kovacs et al. (2017), bei dem die meisten PAE's unilateral durchgeführt wurden und einen Durchschnittswert von 121 Gy*cm$^2$ betrugen, zeigten unsere Endergebnisse dagegen eine deutliche Reduktion der SE (16). Eine Studie von Andrade et al., welche sich ebenfalls exklusiv der SE widmete, zeigte ebenfalls sehr hohe DFP-Werte von 450,7 (248,3-791,73) Gy*cm$^2$ pro Eingriff, was einer 4,5 mal höheren SE als in der hier vorgelegten Arbeit entspricht (49).

Es gibt viele Faktoren, die vorgestellten, eigenen DFP erklären könnten. Während die DSA verantwortlich für die Hauptstrahlenexposition in den Studien von Schott et al. und Andrade et al. mit 43,3% bzw. 71,5% war, führte in der vorgestellten Arbeit die Verwendung der Cone-Beam CT's (CBCT) mit 57,8% zur Hauptstrahlenexposition, gefolgt von der Fluoroskopiezeit (FZ) mit 22,4% und der digitalen Subtraktionsangiografie (DSA) mit 20,8% (46, 49).

Dies impliziert jedoch nicht, dass die Strahlung aufgrund der Verwendung von CBCT's ungewöhnlich hoch war, vielmehr dass DSA's im eigenen Kollektiv sparsam und vor allem nur für den Nachweis der Hauptgefäße sowie Kollateralen während der Partikelinjektion verwendet wurde. Eine weitere Begründung beinhaltet die Tatsache, dass optimierte Protokolle für die Verwendung der DSA

und der Durchleuchtung in den verwendeten Geräten implementiert wurden. Hierdurch kam es in der hier vorgestellten Studie zu einem Durchschnitts-DFP von 20,48 Gy*cm$^2$, begründet durch die zurückhaltende Verwendung von DSA's (Schott et al.: 58,2 Gy*cm$^2$ (46), Andrade et al.: 322,3 Gy*cm$^2$ (49)).
Eine der größten PAE Veröffentlichungen von Pisco et al., welche 630 Patienten einschloss, bei denen eine CT-Angiografie (CTA) vor der Embolisation angefertigt wurde, kam zwar auf niedrige Durchleuchtungszeiten mit 19,5 min, jedoch trotzdem auf ein DFP von 241,5 Gy*cm$^2$ (44). Mit einer durchschnittlichen Durchleuchtungszeit von 49,3 min, sind die hier aufgezeigten Resultate zwar nicht so niedrig wie in anderen Studien, bspw. Andrade et al. oder Schott et al. mit je 30,9 min (46, 49), jedoch begründet durch vorgenommene, technische Einstellungen mit bspw. einer niedrigeren Pulsrate von 2 Bildern/Sekunde, erzielten wir eine beachtlich niedrige Strahlendosis (22,08 Gy*cm$^2$), obwohl ein Vergleich diesbezüglich erschwert ist, begründet durch die Tatsache, dass bei Schott et al. außer einer Strahlendosis von 35,5 Gy*cm$^2$ und einer DZ von 30,9 min keine technischen Details erläutert werden, wohingegen Andrade eine Pulsrate von 15 Bildern/Sekunde als einzig technisches Detail erwähnt, welche ebenfalls unsere Einstellparameter hervorhebt.
Folglich war in unserer Kohorte mit niedriger SE die Katheternavigation deutlich anspruchsvoller und zeitlich aufwändiger (DAP_all, 98,51 Gy*cm$^2$; DAP_fluo, 22,08 Gy*cm$^2$).
Eine retrospektive Vergleichsstudie des katholischen Marienkrankenhauses Hamburgs, in der die Hälfte eines Patientenkollektivs vor Durchführung der PAE eine CTA erhielt, zeigte mit einer mittleren FT von 49.27 ± 22.97 min im Vergleich zur Patientengruppe ohne vorherige CTA mit 44.32 ± 17.82 min keine niedrigere SE (52), so auch die Ergebnisse einer italienischen Arbeitsgruppe, die vor jeder PAE eine CTA durchführten um die Gefäßanatomie der Zielregion vorab darzustellen (53) und mit im Durchschnitt 69 min keine erniedrigte DZ erhielten (51). Daher scheint als kritische Diskussion eine CTA vor PAE die DZ nicht signifikant zu erniedrigen.
Eine prospektiv randomisierte Studie von Alizadeh et al., bei der die Durchführung einer digitalen Varianzangiographie (DVA) zu einer Dosisreduktion um bis zu 80% sowie Verbesserung der Bildqualität im Vergleich zur DSA führte, eröffnet

diesbezüglich einen neuen Optimierungsweg, der sich jedoch erst noch in weiteren Studien beweisen muss (54).
Ein CBCT wurde in der vorgelegten Arbeit routinemäßig in jedem Eingriff für jede Seite durchgeführt, unmittelbar vor der Embolisation, zur Bestätigung der richtigen Identifikation der Prostataarterie (PA) und um eine Embolisation von Risikogewebe, wie Rektum, Harnblase, Penis oder Samenblasen auszuschließen. Dies ist in unserem Institut obligat, unterstützt die exakte Bestimmung der PA und ist der DSA diesbezüglich deutlich überlegen (51, 55). In Fällen, in denen wir durch DSA die PA nicht exakt zuordnen konnten, wurde in unserem Zentrum ebenfalls ein CBCT durchgeführt. Folglich konnten zusätzliche DSA Serien zur Detektion der PA vermieden und resultierend hieraus niedrigere DSA-Strahlenexpositionswerte erreicht werden. Auf der anderen Seite jedoch war die SE durch CBCTs mit 56,93 Gy*cm$^2$ geringfügig höher, verglichen mit kürzlich veröffentlichten Studien, die CBCTs gezielt verwendeten (16, 46, 49).
In der hier vorgelegten Studie verzeichneten wir bei zunehmenden Eingriffen einen sinkenden Durchschnittswert des DFP pro Intervention. Das DFP korrelierte hierbei negativ mit der konsekutiv steigenden Patientennummer (PtNo). Dies deutet darauf hin, dass die wachsende Erfahrung des interventionell tätigen Radiologen und der Institution zu einer deutlich strahlungsärmeren Prozedur führt und unterstreicht die Bedeutung der Lernkurve des durchführenden Radiologen sowie befürwortet die Entstehung spezialisierter, PAE durchführender Zentren um eine niedrige SE zu erreichen. Der Einfluss der Erfahrung des Interventionalisten und das klinische Outcome nach einer PAE Behandlung wurde in unserer Studie nicht untersucht, sollte jedoch in zukünftigen Studien validiert werden.
Wie zu erwarten, korrelierte der BMI mit dem Gesamt-DFP, da ein größeres Körpervolumen zu einer höheren Strahlenabsorption führt. Erstaunlich ist, dass das Patientenalter nicht mit dem DFP korrelierte, wobei das Alter einen Risikofaktor bzgl. möglich vorliegender Gefäßpathologien darstellt, sodass eine Katheterisierung der Zielläsion deutlich anspruchsvoller ist.
In unserer Studie gibt es verschiedene Einschränkungen; zunächst erforschten wir das klinische Ergebnis nach PAE nicht. Auch wenn wir Faktoren detektierten, die zu einer Einsparung der SE führten, untersuchten wir deren Einfluss auf den technischen Erfolg und ferner den klinischen Nutzen nicht. Hinzukommend, untersuchten wir den Einfluss auf das DFP durch den Variantentyp der PA,

definiert durch De Assis et al., nicht (56) und das Prostatavolumen wurde nicht als Einflussfaktor hinzugezogen. Auch dies sollte eine Aufgabe weiterführender Analysen sein.
Schlussfolgernd zeigen unsere Ergebnisse, dass der Hauptanteil der Strahlenexposition bei PAE durch die Verwendung von CBCTs entsteht und die limitierte Verwendung von DSAs zu einem deutlich geringeren Gesamt-DFP führen kann. Demzufolge sollte im Fokus der Strahlenexposition die Reduzierung der Verwendung von CBCTs stehen bzw. noch weiter untersucht werden. Ferner heben unsere Ergebnisse die Relevanz der Lernkurve bei der PAE hinsichtlich Reduzierung der SE hervor, mit der Empfehlung der Entstehung von spezialisierten Zentren speziell für die PAE. Da die Lernkurve und eine nachfolgende Reduktion der SE eine Steigerung der technischen Erfolgsrate und des klinischen Outcomes bedeutet, verbleibt dies als wichtiges Thema für zukünftige Studien.

# 6. Zusammenfassung

Diese Studie analysiert retrospektiv Daten von 300 Patienten, die zwischen Januar 2017 und November 2018 mittels Prostataarterienembolisation (PAE) behandelt wurden. Die Patientenselektion basierte auf spezifischen Kriterien wie Alter über 40 Jahre, signifikante Symptome einer benignen Prostatahyperplasie (BPH) trotz medikamentöser Therapie, einem internationalen Prostata Symptom Score (IPSS) > 8 Punkte, und/oder einem Quality of Life Index (QoL) > 3 und ein Prostatavolumen über 30 $cm^3$. Ein wesentlicher Fokus der Studie lag auf der Evaluation der Strahlenexposition während der PAE, die als Nachteil des Verfahrens gilt. Das Dosisflächenprodukt (DFP) pro Eingriff betrug 98,51 Gy*cm, wobei die Durchführung von cone-beam Computertomographien (CBCT)s den höchsten Einfluss auf das DFP pro Eingriff (57,8%) beinhaltete, gefolgt von der Durchleuchtung (22,4%) und der digitalen Subtraktionsangiografie (DSA) (20,8%), was die Bedeutung optimierter Bildgebungsprotokolle sowie der Erfahrung des Interventionalisten zur Reduktion der Strahlenexposition betont und die technische Expertise und die fortlaufende Optimierung der Verfahrenstechnik eine Notwendigkeit weiterer Forschung zur Langzeitwirksamkeit der PAE und zur weiteren Minimierung der Strahlenexposition darlegt.

The study retrospectively analyzes data from 300 patients who were treated with prostate artery embolization (PAE) between January 2017 and November 2018. Patient selection was based on specific criteria such as age over 40 years, significant benign prostatic hyperplasia (BPH) symptoms despite medical therapy, an international prostate symptom score (IPSS) > 8 and/or a quality of life index (QoL) > 3 and a prostate volume over 30 $cm^3$. A major focus of the study is on the evaluation of radiation exposure during PAE, which is considered a disadvantage of the procedure. The mean dose area product (DAP) per procedure was 98.51 Gy*$cm^2$. Cone beam computed tomography (CBCT) took the highest proportion of overall DAP per procedure (57.8%), followed by fluoroscopy (22.4%) and digital subtraction angiography (DSA); (20.8%).Hence this highlights the importance of the experience of the performing interventionalist and supports the formation of specialized centers to reduce overall radiation exposure.

# 7. Literaturverzeichnis


1. Pisco J, Campos Pinheiro L, Bilhim T, Duarte M, Rio Tinto H, Fernandes L, et al. Prostatic arterial embolization for benign prostatic hyperplasia: short- and intermediate-term results. Radiology. 2013;266(2):668-77.
2. Verze P, Cai T, Lorenzetti S. The role of the prostate in male fertility, health and disease. Nat Rev Urol. 2016;13(7):379-86.
3. Langan RC. Benign Prostatic Hyperplasia. Prim Care. 2019;46(2):223-32.
4. Bilhim T, Pisco JM, Rio Tinto H, Fernandes L, Pinheiro LC, Furtado A, et al. Prostatic arterial supply: anatomic and imaging findings relevant for selective arterial embolization. J Vasc Interv Radiol. 2012;23(11):1403-15.
5. Dobrek L, Thor PJ. Benign prostatic hyperplasia - progress in pathophysiology and management. Pol Merkur Lekarski. 2015;39(233):263-70.
6. Mordasini L, Hechelhammer L, Diener PA, Diebold J, Mattei A, Engeler D, et al. Prostatic Artery Embolization in the Treatment of Localized Prostate Cancer: A Bicentric Prospective Proof-of-Concept Study of 12 Patients. J Vasc Interv Radiol. 2018;29(5):589-97.
7. Napal Lecumberri S, Insausti Gorbea I, Saez de Ocariz Garcia A, Solchaga Alvarez S, Cebrian Lostal JL, Monreal Beortegui R, et al. Prostatic artery embolization versus transurethral resection of the prostate in the treatment of benign prostatic hyperplasia: protocol for a non-inferiority clinical trial. Res Rep Urol. 2018;10:17-22.
8. Carnevale FC, Moreira AM, de Assis AM, Antunes AA, Cristina de Paula Rodrigues V, Srougi M, et al. Prostatic Artery Embolization for the Treatment of Lower Urinary Tract Symptoms Due to Benign Prostatic Hyperplasia: 10 Years' Experience. Radiology. 2020;296(2):444-51.
9. Michel MC, Goepel M. Treatment satisfaction of patients with lower urinary tract symptoms: randomised controlled trials vs. real life practice. Eur Urol. 2000;38 Suppl 1:40-7.
10. Barry MJ, Fowler FJ, Jr., O'Leary MP, Bruskewitz RC, Holtgrewe HL, Mebust WK, et al. The American Urological Association symptom index for benign prostatic hyperplasia. The Measurement Committee of the American Urological Association. J Urol. 1992;148(5):1549-57; discussion 64.
11. Lerner LB, McVary KT, Barry MJ, Bixler BR, Dahm P, Das AK, et al. Management of Lower Urinary Tract Symptoms Attributed to Benign Prostatic Hyperplasia: AUA GUIDELINE PART I-Initial Work-up and Medical Management. J Urol. 2021;206(4):806-17.
12. Nickel JC, Nickel DJ. Medical therapy for BPH: expanding our treatment paradigm? Prostate Cancer Prostatic Dis. 1999;2(S1):34-8.
13. Kaplan SA. Side Effects of alpha-Blocker Use: Retrograde Ejaculation. Rev Urol. 2009;11(Suppl 1):S14-8.
14. Silva J, Silva CM, Cruz F. Current medical treatment of lower urinary tract symptoms/BPH: do we have a standard? Curr Opin Urol. 2014;24(1):21-8.
15. McVary KT, Roehrborn CG, Avins AL, Barry MJ, Bruskewitz RC, Donnell RF, et al. Update on AUA guideline on the management of benign prostatic hyperplasia. J Urol. 2011;185(5):1793-803.
16. Kovacs A. [Prostate artery embolization (PAE) : Technique and results]. Radiologe. 2017;57(8):641-51.
17. Herlemann A, Gratzke C, Andersson KE, Sievert KD. [Medicinal therapy of benign prostate syndrome with phosphodiesterase-5 inhibitors]. Urologe A. 2013;52(2):204-11.

18. Kloner RA. Pharmacology and drug interaction effects of the phosphodiesterase 5 inhibitors: focus on alpha-blocker interactions. Am J Cardiol. 2005;96(12B):42M-6M.
19. McConnell JD, Roehrborn CG, Bautista OM, Andriole GL, Jr., Dixon CM, Kusek JW, et al. The long-term effect of doxazosin, finasteride, and combination therapy on the clinical progression of benign prostatic hyperplasia. N Engl J Med. 2003;349(25):2387-98.
20. Miernik A, Gratzke C. Current Treatment for Benign Prostatic Hyperplasia. Dtsch Arztebl Int. 2020;117(49):843-54.
21. Baazeem A, Elhilali MM. Surgical management of benign prostatic hyperplasia: current evidence. Nat Clin Pract Urol. 2008;5(10):540-9.
22. Reich O, Gratzke C, Stief CG. Techniques and long-term results of surgical procedures for BPH. Eur Urol. 2006;49(6):970-8; discussion 8.
23. Becker J, Moch H. [Pathology and Pathophysiology of BPH and Relevant Incidental Findings in TUR-P]. Ther Umsch. 2023;80(3):147-57.
24. Pompe RS, Leyh-Bannurah SR, Preisser F, Salomon G, Graefen M, Huland H, et al. Radical prostatectomy after previous TUR-P: Oncological, surgical, and functional outcomes. Urol Oncol. 2018;36(12):527 e21- e28.
25. Autorino R, Zargar H, Mariano MB, Sanchez-Salas R, Sotelo RJ, Chlosta PL, et al. Perioperative Outcomes of Robotic and Laparoscopic Simple Prostatectomy: A European-American Multi-institutional Analysis. Eur Urol. 2015;68(1):86-94.
26. Gravas S, Gacci M, Gratzke C, Herrmann TRW, Karavitakis M, Kyriazis I, et al. Summary Paper on the 2023 European Association of Urology Guidelines on the Management of Non-neurogenic Male Lower Urinary Tract Symptoms. Eur Urol. 2023;84(2):207-22.
27. Kyriazis I, Swiniarski PP, Jutzi S, Wolters M, Netsch C, Burchardt M, et al. Transurethral anatomical enucleation of the prostate with Tm:YAG support (ThuLEP): review of the literature on a novel surgical approach in the management of benign prostatic enlargement. World J Urol. 2015;33(4):525-30.
28. Gilling P. Holmium laser enucleation of the prostate (HoLEP). BJU Int. 2008;101(1):131-42.
29. Gilling PJ, Williams AK. Holmium laser enucleation of the prostate is the single best treatment for benign prostatic hyperplasia refractory to medication. J Endourol. 2008;22(9):2113-5; discussion 21, 25.
30. Humphreys MR, Miller NL, Handa SE, Terry C, Munch LC, Lingeman JE. Holmium laser enucleation of the prostate--outcomes independent of prostate size? J Urol. 2008;180(6):2431-5; discussion 5.
31. Raber M, Buchholz NNP, Vercesi A, Hendawi NA, Inneo V, Di Paola G, et al. Thulium laser enucleation of the prostate (ThuLEP): Results, complications, and risk factors in 139 consecutive cases. Arab J Urol. 2018;16(4):411-6.
32. Bozzini G, Berti L, Maltagliati M, Besana U, Calori A, Muller A, et al. Ejaculation-sparing thulium laser enucleation of the prostate (ES-ThuLEP): outcomes on a large cohort. World J Urol. 2021;39(6):2029-35.
33. Ryang SH, Ly TH, Tran AV, Oh SJ, Cho SY. Bipolar enucleation of the prostate-step by step. Andrologia. 2020;52(8):e13631.
34. Habib E, Abdallah MF, ElSheemy MS, Badawy MH, Nour HH, Kamal AM, et al. Holmium laser enucleation versus bipolar resection in the management of large-volume benign prostatic hyperplasia: A randomized controlled trial. Int J Urol. 2022;29(2):128-35.

35. Shoma AM, Ghobrial FK, El-Tabey N, El-Hefnawy AS, El-Kappany HA. A randomized trial of holmium laser vs thulium laser vs bipolar enucleation of large prostate glands. BJU Int. 2023;132(6):686-95.
36. DeMeritt JS, Elmasri FF, Esposito MP, Rosenberg GS. Relief of benign prostatic hyperplasia-related bladder outlet obstruction after transarterial polyvinyl alcohol prostate embolization. J Vasc Interv Radiol. 2000;11(6):767-70.
37. Carnevale FC, Antunes AA, da Motta Leal Filho JM, de Oliveira Cerri LM, Baroni RH, Marcelino AS, et al. Prostatic artery embolization as a primary treatment for benign prostatic hyperplasia: preliminary results in two patients. Cardiovasc Intervent Radiol. 2010;33(2):355-61.
38. Kim EH, Larson JA, Andriole GL. Management of Benign Prostatic Hyperplasia. Annu Rev Med. 2016;67:137-51.
39. Teichgraber U, Aschenbach R, Diamantis I, von Rundstedt FC, Grimm MO, Franiel T. Prostate Artery Embolization: Indication, Technique and Clinical Results. Rofo. 2018;190(9):847-55.
40. Wang MQ, Duan F, Yuan K, Zhang GD, Yan J, Wang Y. Benign Prostatic Hyperplasia: Cone-Beam CT in Conjunction with DSA for Identifying Prostatic Arterial Anatomy. Radiology. 2017;282(1):271-80.
41. Ray AF, Powell J, Speakman MJ, Longford NT, DasGupta R, Bryant T, et al. Efficacy and safety of prostate artery embolization for benign prostatic hyperplasia: an observational study and propensity-matched comparison with transurethral resection of the prostate (the UK-ROPE study). BJU Int. 2018;122(2):270-82.
42. Zumstein V, Betschart P, Vetterlein MW, Kluth LA, Hechelhammer L, Mordasini L, et al. Prostatic Artery Embolization versus Standard Surgical Treatment for Lower Urinary Tract Symptoms Secondary to Benign Prostatic Hyperplasia: A Systematic Review and Meta-analysis. Eur Urol Focus. 2019;5(6):1091-100.
43. McWilliams JP, Bilhim TA, Carnevale FC, Bhatia S, Isaacson AJ, Bagla S, et al. Society of Interventional Radiology Multisociety Consensus Position Statement on Prostatic Artery Embolization for Treatment of Lower Urinary Tract Symptoms Attributed to Benign Prostatic Hyperplasia: From the Society of Interventional Radiology, the Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe, Societe Francaise de Radiologie, and the British Society of Interventional Radiology: Endorsed by the Asia Pacific Society of Cardiovascular and Interventional Radiology, Canadian Association for Interventional Radiology, Chinese College of Interventionalists, Interventional Radiology Society of Australasia, Japanese Society of Interventional Radiology, and Korean Society of Interventional Radiology. J Vasc Interv Radiol. 2019;30(5):627-37 e1.
44. Pisco JM, Bilhim T, Pinheiro LC, Fernandes L, Pereira J, Costa NV, et al. Medium- and Long-Term Outcome of Prostate Artery Embolization for Patients with Benign Prostatic Hyperplasia: Results in 630 Patients. J Vasc Interv Radiol. 2016;27(8):1115-22.
45. Mathevosian S, Plotnik AN, McWilliams JP. Prostate Artery Embolization for Giant Prostatic Enlargement: Short-Term Efficacy and Safety. J Vasc Interv Radiol. 2019;30(11):1820-3.
46. Schott P, Katoh M, Fischer N, Freyhardt P. Radiation Dose in Prostatic Artery Embolization Using Cone-Beam CT and 3D Roadmap Software. J Vasc Interv Radiol. 2019;30(9):1452-8.
47. Dias US, Jr., de Moura MRL, Viana PCC, de Assis AM, Marcelino ASZ, Moreira AM, et al. Prostatic Artery Embolization: Indications, Preparation,

Techniques, Imaging Evaluation, Reporting, and Complications. Radiographics. 2021;41(5):1509-30.
48. J AP, Bilhim T, Duarte M, Rio Tinto H, Fernandes L, Martins Pisco J. Patient selection and counseling before prostatic arterial embolization. Tech Vasc Interv Radiol. 2012;15(4):270-5.
49. Andrade G, Khoury HJ, Garzon WJ, Dubourcq F, Bredow MF, Monsignore LM, et al. Radiation Exposure of Patients and Interventional Radiologists during Prostatic Artery Embolization: A Prospective Single-Operator Study. J Vasc Interv Radiol. 2017;28(4):517-21.
50. Bilhim T, Pisco J, Rio Tinto H, Fernandes L, Campos Pinheiro L, Duarte M, et al. Unilateral versus bilateral prostatic arterial embolization for lower urinary tract symptoms in patients with prostate enlargement. Cardiovasc Intervent Radiol. 2013;36(2):403-11.
51. Isaacson AJ, Burke LM. Utility of Pelvic Computed Tomography Angiography Prior to Prostatic Artery Embolization. Semin Intervent Radiol. 2016;33(3):224-30.
52. Steffen P, Wentz R, Thaler C, Habermann CR, Zeile M. Single-Center Retrospective Comparative Study Evaluating the Benefit of Computed Tomography Angiography Prior to Prostatic Artery Embolization. Cardiovasc Intervent Radiol. 2022;45(7):1019-24.
53. Grosso M, Balderi A, Arno M, Sortino D, Antonietti A, Pedrazzini F, et al. Prostatic artery embolization in benign prostatic hyperplasia: preliminary results in 13 patients. Radiol Med. 2015;120(4):361-8.
54. Alizadeh LS, Vogl TJ, Rafi W, Caruso M, Elek R, Osvath S, et al. Digital variance angiography enables up to 80% reduction in stationary acquisition radiation dose during prostatic artery embolization: a prospective randomized trial. Eur Radiol. 2026.
55. Bagla S, Rholl KS, Sterling KM, van Breda A, Papadouris D, Cooper JM, et al. Utility of cone-beam CT imaging in prostatic artery embolization. J Vasc Interv Radiol. 2013;24(11):1603-7.
56. de Assis AM, Moreira AM, de Paula Rodrigues VC, Harward SH, Antunes AA, Srougi M, et al. Pelvic Arterial Anatomy Relevant to Prostatic Artery Embolisation and Proposal for Angiographic Classification. Cardiovasc Intervent Radiol. 2015;38(4):855-61.

# 8. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| A | Arteria |
| AII | Arteria iliaca interna |
| BipolEP | Bipolare Enukleation der Prostata |
| BMI | Body mass index |
| BPH | benigne Prostatahyperplasie |
| CBCT | Cone-Beam CT |
| CT | Computertomographie |
| CTA | Computertomographie in arterieller Phase |
| DAP | dose area product; Dosisflächenprodukt |
| DAP_all | Gesamt DAP der Prozedur |
| DAP_CBCT | DAP in Abhängigkeit des CBCT |
| DAP_DSA | DAP in Abhängigkeit der DSA |
| DAP_fluo | DAP in Abhängigkeit der Fluoroskopie |
| DFP | Dosisflächenprodukt |
| DRU | Digitalerektale Untersuchung |
| DSA | digitale Subtraktionsangiographie |
| DVA | digitale Varianzangiographie |
| DZ | Durchleuchtungszeit |
| ESR | European society of Radiology |
| FOV | field of view; Sichtfeld |
| FZ | Fluoroskopiezeit/Durchleuchtungszeit |
| HoLEP | Holmiumlaser-Enukleation der Prostata |
| IPSS | internationaler Prostata Symptom Score |
| IR1 | PAE durchführender Radiologe |
| LUTS | lower urinary-tract-symptoms |

| | |
|---|---|
| No_CBCT | Anzahl von cone-beam CT’s |
| PA | Prostataarterie |
| PACS | picture archiving and communication system |
| PAE | Prostataarterienembolisation |
| PErFecTED | proximal embolization first, then embolized distal |
| PSA | Prostata-spezifisches Antigen |
| PtNo | konsekutiv steigende Patientennummer |
| QoL | quality of life; Lebensqualitätsindex |
| RE | radiation exposure; Strahlenbelastung |
| SB | Strahlenbelastung |
| SD | Standardabweichung |
| SE | Strahlenexposition |
| SIR | Society ov interventional Radiology |
| TE | technischer Erfolg |
| ThuLEP | Thuliumlaser-Enukleation der Prostata |
| TUR-P | transurethrale Prostataresektion |

# 9. Abbildungsverzeichnis

Figure 1 IPSS_Fragebogen vor PAE, gemäß Barry et. al (10) ..... 8
Figure 2 DSA vor Embolisation ..... 22
Figure 3 DSA nach Embolisation ..... 22
Figure 4 CBCT axial ..... 23
Figure 5 CBCT coronal ..... 23
Figure 6 Box Plots DAP ..... 30
Figure 7 Box Plot FT ..... 30

# 10. Tabellenverzeichnis

Table 1 Gewichtsverteilung der Patienten ..... 26
Table 2 Verteilung des technischen Erfolges und technischen Misserfolges ..... 27
Table 3 Liste der Gründe für technischen Misserfolg ..... 28
Table 4 Dosisparameter ..... 29
Table 5 Mixed model Analyse der Einflussfaktoren auf das Gesamtdosisflächenprodukt ..... 32

# 11. Erklärung des Eigenanteils

Die Entwicklung der Fragestellung lag vorrangig in der Hand von Herrn Prof. Dr. med. Christian R. Habermann. Ergänzend hierzu brachte ich eigene Ideen mit ein. Die Akquisition der gesamten Daten, d.h. das Beschaffen der richtigen Patientenakten, das Durchsuchen der medizinischen Datenbank Medico, PACS und RIS und das Erheben dieser Daten wurde durch mich durchgeführt. Die Auswertung der Daten erfolgte durch mich mit der Hilfe von Herrn Dr. med. Martin Zeile sowie Prof. Dr. med. Christian R. Habermann. Die statistische Auswertung wurde insbesondere durch Hr. Dr. Hans Pinnschmidt (UKE) durchgeführt. Die Abbildungen erstellte ich unter der Mithilfe von Herrn Dr. med. Martin Zeile. Bei der Erstellung des Manuskriptes war Hr. PD Dr. med. Christian Thaler (UKE) ergänzend unterstützend. Alle Co-Autoren steuerten Anregungen bei, führten eine kritische Analyse des Manuskriptes durch und unterstützten somit das Projekt bis zur erfolgreichen Promotionseinreichung.

# 12. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, insbesondere ohne entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- und Beratungsdiensten, verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Das gilt insbesondere auch für alle Informationen aus Internetquellen.
Soweit beim Verfassen der Dissertation KI-basierte Tools („Chatbots“) verwendet wurden, versichere ich ausdrücklich, den daraus generierten Anteil deutlich kenntlich gemacht zu haben. Die „Stellungnahme des Präsidiums der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Einfluss generativer Modelle für die Text- und Bilderstellung auf die Wissenschaften und das Förderhandeln der DFG“ aus September 2023 wurde dabei beachtet.
Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.
Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

28.02.2026
Datum

Unterschrift

# 13. Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Christian R. Habermann, meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Seine fachliche Expertise, seine konstruktiven Anregungen und seine kontinuierliche Unterstützung, insbesondere zuletzt, während meiner Elternzeit, haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Besonders schätze ich das Vertrauen, das er mir während der gesamten Promotionszeit entgegengebracht hat, sowie die Freiheit, eigene Ideen zu entwickeln und zu verfolgen.

Mein tief empfundener Dank gilt ebenso meinen Eltern, Siegfried und Susanne. Sie haben mich auf meinem gesamten Bildungsweg mit unermüdlicher Unterstützung, Geduld und Zuspruch begleitet. Ohne ihre beständige Ermutigung und ihren Glauben an mich wäre dieser Weg und letztlich diese Promotion nicht möglich gewesen.

Von Herzen danke ich meinem Mann Felix. Seine Geduld, sein Verständnis und seine liebevolle Unterstützung – gerade in herausfordernden Phasen der Promotion – haben mir Kraft und Zuversicht gegeben. Er war stets mein stärkster Rückhalt.

Eine ganz besondere Bedeutung hat für mich mein inzwischen geborener Sohn Lion. Seine Ankunft hat diese intensive Lebensphase auf wunderbare Weise bereichert und mir gezeigt, was wirklich zählt. Ihm widme ich diese Arbeit in Liebe.

Allen, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben, sei ebenfalls herzlich gedankt.