

Aus der Klinik und Poliklinik für Radiologie
Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorstand: Prof. Dr. med. Jens Ricke

**Computertomographie beim Body-Packing:
Differenzierung von Drogengebunden mittels
Dual-Energy-Computertomographie**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Ramona Manuela Wudy

aus

Rosenheim

2019

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:

Prof. Dr. med. Dr. rer. biol. hum. Dipl. inform. MBA Stefan Wirth

Mitberichterstatter:

Prof. Dr. rer. nat. Frank Mußhoff

PD Dr. med. Dorothea Hermle

Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:

Dr. med. Michael Scherr

Dekan:

Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Tag der mündlichen Prüfung:

02.05.2019

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Intrakorporaler Drogentransport	5
1.2	Arten von intrakorporalem Drogentransport.....	5
1.3	Body-Packs – Inhalt und Intoxikation	6
1.4	Klinisches Management von asymptomatischen und symptomatischen Body-Packern	7
1.5	Rolle der Radiologie im Management von Body-Packern.....	8
1.5.1	Detektion intrakorporaler Packs	8
1.5.2	Differenzierung intrakorporaler Packs	10
1.6	Ziel dieser Arbeit.....	12
2	Material und Methoden	13
2.1	Physikalische und technische Grundlagen	13
2.1.1	Single-Energy-Computertomographie	13
2.1.2	Dual-Energy-Computertomographie.....	14
2.2	Experimente und Kasuistik.....	19
2.2.1	Experimente zur Differenzierung von Substanzen mittels Dual-Energy- Computertomographie	19
2.2.1.1	Kompressionsversuch – Proben und Versuchsaufbau	19
2.2.1.1.1	Versuchsaufbau vor Kompression der lockeren Proben.....	19
2.2.1.1.2	Versuchsaufbau nach Kompression der lockeren Proben	20
2.2.1.2	Schweinemodell – Proben und Versuchsaufbau	21
2.2.1.2.1	Versuchsaufbau der experimentellen Packs ex-vivo	21
2.2.1.2.2	Versuchsaufbau der experimentellen Packs am Schweinemodell.....	22
2.2.1.3	Kasuistik aus dem Innenstadtlinikum der Universität München – Päckchen und Verlauf	23
2.2.1.3.1	Ex-vivo-Analyse der Originalpacks nach Defäkation	23
2.2.1.3.2	In-vivo-Analyse der Originalpacks am Patientenfall.....	24
2.2.2	Detektion der Originalpacks mittels Dual-Energy-Computertomographie – In-vivo-Analyse von Stuhl am Patientenfall.....	24
2.3	Scanprotokolle, Dosisberechnung und Datenauswertung	25
3	Ergebnisse.....	28
3.1	Ergebnisse der Differenzierung von Substanzen mittels Dual-Energy- Computertomographie	28
3.1.1	Ergebnisse des Kompressionsversuchs.....	28
3.1.1.1	Ergebnisse vor Kompression der lockeren Proben.....	28

3.1.1.2	Ergebnisse nach Kompression der lockeren Proben	30
3.1.2	Ergebnisse des Schweinmodells	33
3.1.2.1	Ex-vivo-Ergebnisse der experimentellen Packs.....	33
3.1.2.2	In-situ-Ergebnisse der experimentellen Packs am Schweinmodell	35
3.1.3	Ergebnisse der Kasuistik aus dem Innenstadt-klinikum der Universität München	39
3.1.3.1	Ex-vivo-Ergebnisse der Originalpacks nach Defäkation	39
3.1.3.2	In-vivo-Ergebnisse der Originalpacks am Patientenfall.....	42
3.2	Ergebnisse der Detektion der Originalpacks mittels Dual-Energy- Computertomographie – In-vivo-Ergebnisse von Stuhlanalysen am Patientenfall	47
4	Diskussion.....	48
4.1	Differenzierung von Substanzen mittels Dual-Energy-Computertomographie	48
4.1.1	Kompressionsversuch – eine Analyse der Grundlagen zur Stoffdifferenzierung mittels Dual-Energy-Computertomographie	48
4.1.2	Schweinmodell – ein Vergleich ex-vivo/in-situ	53
4.1.3	Kasuistik aus dem Innenstadt-klinikum der Universität München – Analysen am realen Fall.....	55
4.2	Detektion der Originalpacks am Patientenfall mittels Dual-Energy- Computertomographie – ein Vergleich mit Stuhlanalysen	58
4.3	Strahlenbelastung und Dosisreduktion	60
4.4	Dual-Energy-Computertomographie im Management von Body-Packern.....	62
4.5	Limitationen dieser Arbeit und Ausblick.....	64
5	Zusammenfassung	66
6	Quellenverzeichnis	68
7	Abbildungsverzeichnis	81
8	Tabellenverzeichnis	85
9	Abkürzungsverzeichnis	86

1 Einleitung

1.1 Intrakorporaler Drogentransport

Ein Mann sucht aufgeregt die Notaufnahme des Klinikums der Universität München in der Innenstadt auf. Er beklagt extremes Herzrasen sowie ausgeprägtes Unwohlsein. Wie sich schließlich anamnestisch herausstellt, hatte er einige Zeit zuvor eine hohe Anzahl an mit Suchtmitteln befüllten Päckchen, sogenannte „Body-Packs“, geschluckt, um diese über die Grenze zu schmuggeln. Über die genaue Zahl sowie den Inhalt konnte oder wollte er jedoch keine Informationen geben. Dies ist eine typische Situation, wie Kuriere nach Inkorporation von Drogen zu Patienten werden können. Vor allem in Universitätskliniken in der Nähe von Flughäfen erfolgt die Vorstellung aufgrund eines Inkorporationsverdachtes ohne Symptomatik, also aus strafrechtlichen Gründen, noch häufiger¹⁻⁴.

Allein am Standort Innenstadt des Klinikums der Universität München erfolgte von 2011 bis 2016 19-mal eine Abklärung im Zusammenhang mit „intrakorporalem Drogenschmuggel“, welcher sich bei 13 Personen bestätigte. Der intrakorporale Drogenschmuggel ist zudem kein rein deutsches Problem, auch andere europäische sowie außereuropäische Staaten werden regelmäßig und gerade in den letzten Jahren vermehrt mit dieser Thematik konfrontiert, was zum Teil (z.T.) auch durch verstärkte Kontrollen bedingt sein kann^{1,5-12}. Die Dunkelziffer der Personen, welchen unbemerkt von Zoll und Polizei auf diese Weise die Überführung der Suchtmittel gelingt, ist nur schwer abzuschätzen, dürfte jedoch weitaus höher liegen^{12,13}.

1.2 Arten von intrakorporalem Drogentransport

Es werden drei Arten von intrakorporalem Drogentransport unterschieden.

Body-Packer, auch Mules genannt, fungieren als Kuriere und schlucken eine variable Anzahl, in Einzelfällen bis zu 200, an circa (ca.) zwei Zentimeter (cm) bis vier cm großen, mit Suchtmitteln befüllten Päckchen^{1-4,7,14-18}. Während diese Pakete früher beispielsweise aus Alufolie oder Gummihandschuhen hauptsächlich von Hand gefertigt wurden, überwiegt heute die maschinelle, robustere, mehrlagige Ummantelung, wofür häufig Latex verwendet wird^{1,7,14,16,17,19-23}.

Body-Pusher fungieren ebenfalls als Drogenkuriere. Für den Transport werden die Päckchen rektal oder vaginal eingeführt. Die Umhüllung der Päckchen ist derjenigen beim Body-Packing vergleichbar, aber die Anzahl der Päckchen ist geringer und diese sind größer^{3,4,7,17,18,24}.

Body-Stuffer sind Drogendealer oder -konsumenten und damit eine Sonderform, da deren Ingestion der Päckchen nicht zum Zwecke des Schmuggels erfolgt, sondern zur Verschleierung dient, wie das bei einem plötzlichen Auftauchen der Polizei häufig der Fall ist ^{3,7,15,25-27}. Dementsprechend ist die Verpackung wesentlich variabler. Oft befinden sich die Suchtstoffe lediglich in normalen Plastiktütchen oder Alufolie oder sind sogar vollkommen unverpackt ²⁶.

Die typischen Drogenkuriere sind in der Regel (i.d.R.) junge Männer, oft südländischer oder asiatischer Herkunft ^{1,7,10,12,16,17,28-34}. Allerdings sind mittlerweile auch Fälle bekannt, in denen schwangere Frauen oder Kinder mittels Body-Packing Drogen schmuggelten ^{3,35-37}.

1.3 Body-Packs – Inhalt und Intoxikation

In der Mehrzahl der Fälle handelt es sich bei den geschmuggelten Packs um Heroin oder Kokain, seltener Haschisch ^{1,4,10,18,21,28,34,38-44}. Andere Substanzen, wie beispielsweise Amphetamine kommen gerade in den letzten Jahren zwar vermehrt vor, sind in der westlichen Welt dennoch eher selten ^{18,28,38,45-49}. Die Suchtmittel liegen üblicherweise nicht als Reinstoffe vor, sondern werden für gewöhnlich mit diversen Substanzen wie beispielsweise Koffein, Theophyllin, Lokalanästhetika und einer Reihe von Analgetika gestreckt ^{4,14,44,48,50-57}. Außerdem ist zu beachten, dass ein einzelnes Pack unter Umständen (u.U.) bereits ein Vielfaches der letalen Dosis des Suchtmittels enthalten kann, sodass eine Ruptur oder Leckage nicht nur Symptome einer Überdosierung hervorrufen, sondern durchaus Lebensgefahr für den Drogenkurier bedeuten kann ^{3,4,7,11,14,16,21,55,58-64}.

Kokain fungiert als hochpotentes Sympathomimetikum ^{65,66}. Eine Intoxikation präsentiert sich durch eine Vielzahl an möglichen Symptomen wie zum Beispiel (z.B.) Agitation, Halluzinationen, Krampfanfälle, Hyperthermie und Schwitzen, hypertone Krisen mit Tachyarrhythmien sowie Spasmen der koronaren und cerebralen Gefäße und entsprechender Problematik wie beispielsweise Angina-pectoris-Beschwerden ⁶⁵⁻⁶⁸.

Bei *Heroin* handelt es sich um ein chemisch hergestelltes Opiatderivat, welches intracerebral seine Wirkung an den Opioidrezeptoren entfaltet. Auch die Metabolite der Abbaukaskade können an die Rezeptoren binden und als Agonisten fungieren, was die hohe Toxizität dieses Suchtstoffes erklärt ^{65,66}. Der Symptomkomplex im Falle einer Intoxikation setzt sich aus Koma, Atemdepression, Miosis, Bradykardie, Hypothermie, Rhabdomyolyse sowie Lungenödem und Aspirationspneumonie zusammen ^{65-67,69}.

Der Symptomkomplex einer *Haschischintoxikation* besteht unter anderem (u.a.) aus Koordinations- und Gedächtnisstörungen, Euphorie, Tachykardie und Bindehautrötung. Zusätzlich kommen gelegentlich psychotische Zustände mit Horrortrips sowie Panikattacken vor ^{65,66}.

Für die Kuriere sind lebensbedrohliche Situationen durch die Aufnahme von Haschisch aus Packs bisher nicht bekannt.

1.4 Klinisches Management von asymptomatischen und symptomatischen Body-Packern

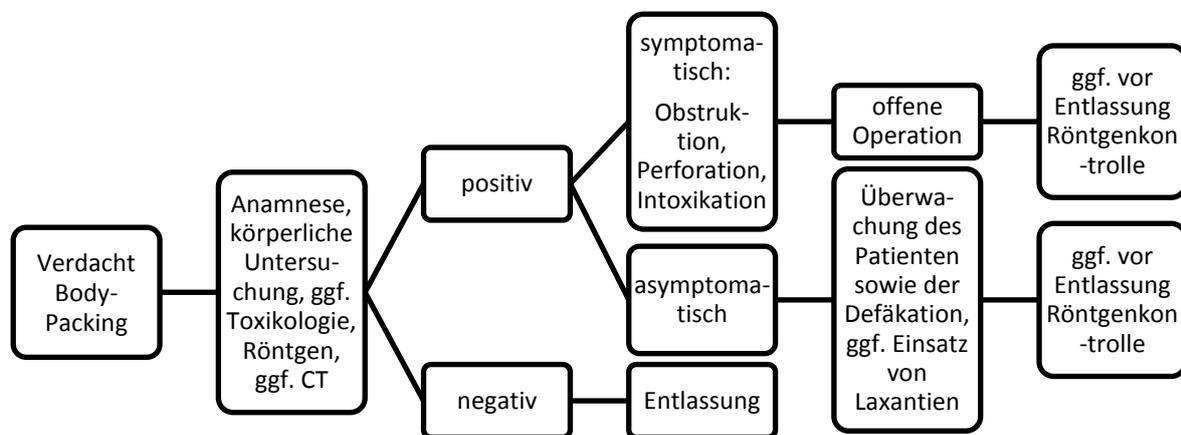
Vor allem (v.a.) Notaufnahmen werden in zwei grundsätzlichen Fällen mit Drogenkurieren konfrontiert. Die erste Gruppe stellen asymptomatische Personen dar. Verdächtige Personen werden von der Polizei oder dem Zoll am Flughafen, der Grenze oder am Bahnhof aufgegriffen und zur Überprüfung des Verdachts und bei positivem Befund gegebenenfalls (ggf.) zu einer anschließenden Überwachung in eine Klinik eingewiesen^{6,7,13,14,25,28,70,71}. Darüber hinaus ereignen sich immer wieder Fälle, in denen sich Drogenkuriere aus Angst vor möglichen Komplikationen auch selbst stellen^{6,7,13,71}. Die zweite Gruppe sind symptomatische Personen, die im Gegensatz zur ersten Gruppe dadurch zu Patienten werden. Das Aufsuchen einer Klinik erfolgt entweder aus eigenem Antrieb oder durch Passanten getriggert, mit dem Notarzt und/oder in Begleitung der Polizei^{6,7,13,25,27,28,38,71}. Die klinische Symptomatik ist vielfältig und reicht von Zeichen einer Obstruktion oder Darmwandperforation über Intoxikationserscheinungen unterschiedlicher Ausprägung^{7,8,41,55,58,72}.

Über das richtige Management von Body-Packern herrscht, wie die Existenz unterschiedlicher Algorithmen zeigt, noch immer Uneinigkeit. Der erste Schritt bei Einweisung einer suspekten Person stellt eine gründliche körperliche Untersuchung einschließlich rektaler und vaginaler Abtastung dar^{7,10,21,30,36,39,70}. Ggf. können toxikologische Analysen des Urins ergänzt werden, wobei deren Nutzen umstritten ist^{3,7,10,16,19,21,30,39,57,64,70,73,74}. Zusätzlich kommen i.d.R. bildgebende Verfahren zur Anwendung, welche häufig aus einer Röntgenaufnahme des Abdomens bestehen. Im Zweifel erfolgt dann nach ärztlicher Einschätzung noch eine zusätzliche Computertomographie (CT)^{2-4,7,10,11,16,19,21,25,35,36,39,57,70,75-77}. Bestätigt sich der anfängliche Verdacht des intrakorporalen Drogenschmuggels, so ist die klinische Symptomatik für den weiteren Verlauf richtungsweisend (*Abbildung 1*).

Bei asymptomatischen, stabilen Patienten wird konservativ vorgegangen. Das bedeutet eine Überwachung der Vitalparameter sowie das Abwarten einer Defäkation zur Ausscheidung der Packs, welche dann sicherzustellen sind^{3,7,11,21,29,38,39,52,70,78}. Der zusätzliche Gebrauch von Laxantien sowie weiterer Abführmaßnahmen ist umstritten, da die Wirkstoffe möglicherweise die Päckchenhülle angreifen und eine Intoxikation herbeiführen könnten^{7,11,21,25,29,36,39,77,79-82}. Der Endpunkt dieser „Therapie“ ist erreicht, wenn alle Pakete ausgeschieden wurden. Als Anhaltspunkt hierfür gelten mehrere paketfreie Stühle^{1,7,21,29,34,36,39,70}. Manche Autoren empfehlen eine erneute radiologische Kontrolle^{3,7,21,29,36,39,70}. Wenn auch

hier keine Fremdkörper mehr nachgewiesen werden, kann die Entlassung des Patienten erfolgen (*Abbildung 1*).

Bei symptomatischen Patienten im Sinne einer Obstruktion, Perforation oder Intoxikation wird unabhängig von der geschmuggelten Substanz eine offene, operative Entfernung aller Päckchen empfohlen (*Abbildung 1*)^{11,14,16,38,39}. Dies beinhaltet entweder multiple Inzisionen des Darmes oder wenige Inzisionen mit Ausstreichen des Darmes in Richtung der Inzision^{7,10,13,22,29,30}. Die häufigsten Komplikationen sind hierbei Wundinfektionen und Anastomosensuffizienzen^{11,30,39}. Die alternativen endoskopischen Interventionen oder laparoskopischen Verfahren gelten als umstritten und konnten sich bisher nicht durchsetzen^{3,21,70,83,84}.



*Abbildung 1: Ein Beispiel für einen Algorithmus zum Management von Body-Packern*³⁹.

1.5 Rolle der Radiologie im Management von Body-Packern

1.5.1 Detektion intrakorporaler Packs

Die Anwendung bildgebender Verfahren nimmt eine zentrale Rolle im Umgang mit Body-Packern ein und dient insbesondere dem Zweck der Detektion, das heißt (d.h.) der Bestätigung intrakorporaler Packs sowie der Bestimmung deren Anzahl und Lokalisation.

Sowohl die Sonographie als auch die Magnetresonanztomographie (MRT) konnten sich bisher aufgrund eingeschränkter Untersuchungsbedingungen bei Darmgasüberlagerung oder langer Untersuchungszeiten in diesem Kontext nicht bewähren^{2,4,7,21,42,50,85}.

Aktuell nimmt das Röntgen im radiologischen Management von Body-Packern die zentrale Rolle ein. Aufnahme der Wahl ist die Abdomenübersicht im Stehen oder in Rückenlage^{2,4,18,21,22,29,39,70,86}. Die Packs präsentieren sich als runde oder ovale Strukturen variabler Dich-

te (Abbildung 2). Weitere mögliche radiologische Zeichen für ein Paket sind das double-condom-sign, eine schmale Luftsichel zwischen den Latexschichten handgefertigter Packs, sowie das Rosettenzeichen, gefangene Luft im Knoten eines handgefertigten Packs, das tic-tac-sign, die einheitliche, ovale Form mechanisch gefertigter Packs, sowie der Parallelismus, die parallele Ausrichtung der ovalen Packs im Magen-Darm-Trakt^{2,53,87}. Mit einer Sensitivität von 85% bis 90% für das Vorhandensein von Päckchen handelt es sich bei der Röntgen-Diagnostik um ein nur mäßig gutes Verfahren und es ereignen sich immer wieder Fälle falsch negativer oder falsch positiver Beurteilung^{1,14,21,76,88,89}. Eine Aussage über die Anzahl und exakte Lokalisation ist aufgrund von Überlagerungen und teils radiotransparenten Päckchen oft nur eingeschränkt möglich^{41,90}.



Abbildung 2: Röntgenaufnahme eines Body-Packers nach Ingestion von Kokainpacks mit Lokalisation der röntgendichten, ovalären Packs im Colonrahmen.

Das konventionelle Röntgen ist zwar derzeit die am häufigsten eingesetzte Methode, die CT mit einer Sensitivität von annähernd 100% jedoch wesentlich genauer^{5,17,28,32,39,91-95}. Fehler bilden die Ausnahme^{7,27,71}. Vorteile der CT-Diagnostik bestehen in der überlagerungsfreien Abbildung und den besser sichtbaren Kontrastunterschieden sowohl innerhalb der Päckchen als auch zu deren Umgebung (Abbildung 3)^{28,94}. Dies kann durch die geeignete Einstellung der Fensterung noch zusätzlich optimiert werden^{17,91}. Typische Hinweise sind das sogenannte air-ring-sign, Luftansammlungen bei Kontakt von Päckchen oder Kontakt zur Darmwand, das onion-sign, ringförmige Dichteunterschiede des Päckcheninhalts, sowie eine einheitliche Form der Päckchen¹⁷. Trotz dieser Vorteile nimmt die CT-Diagnostik mit Ausnahme von Ungarn, Schweden und teilweise auch Dänemark in den aktuellen Algorithmen lediglich eine Randposition ein, indem die CT i.d.R. als Zusatzdiagnostik bei unklarem Röntgenbefund eingesetzt wird^{4,11,33,39,50,96}. Die Ursache für den zurückhaltenden Einsatz einer CT-Untersuchung ist die Kombination aus in der Regel jungen Patienten, strahlensensiblen Organen und gleichzeitig hoher Strahlenbelastung^{2,18,50}. Derzeit wird versucht, mittels

Dosisreduktion die CT als Low-dose-CT-Untersuchung zu gestalten. In ersten Studien wird über vielversprechende Erfolge berichtet^{31,44,50,51,97-99}.

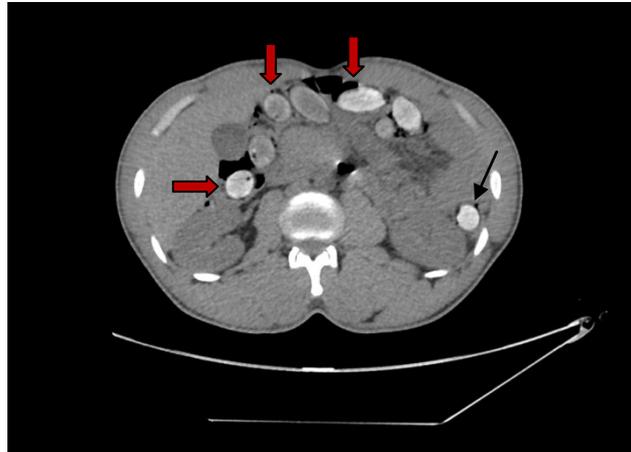


Abbildung 3: Low-dose-CT-Aufnahme eines Body-Packers in der axialen Rekonstruktion im Weichteilfenster mit überlagerungsfreier Darstellung der ovalären Kokainpacks im Colon transversum (⇒) sowie eines Packs im Colon descendens (→).

1.5.2 Differenzierung intrakorporaler Packs

Neben der Detektion eine auch klinisch wichtige Fragestellung an bildgebende Verfahren wäre die In-vivo-Differenzierung der sich im gastrointestinalen Trakt befindlichen Drogenpakete im Hinblick auf deren Inhalt.

Eine solche nicht-invasive Identifikation der Art der potentiell freisetzbaren oder bereits freigesetzten Substanz wäre im Falle von Patienten, also bei einer Leckage oder Ruptur, richtungsweisend für deren adäquate Therapie. Den derzeitigen Goldstandard bei jeglicher Art von Intoxikationserscheinungen stellt, wie bereits eingangs erwähnt, meist die operative Intervention mit sofortiger Entfernung aller Packs dar^{11,16,38,39}. Bei manchen Substanzen, wie z.B. Heroin, wäre eine Intoxikation medikamentös mittels Antidot Naloxon sowie intensivmedizinischer Überwachung behandelbar und eine Operation damit entweder sicherer durchführbar oder ganz vermeidbar^{3,7,21,54,100}. Dieser konservative Therapieansatz ist bereits in einigen Algorithmen zum Management von Body-Packern berücksichtigt worden, findet aber in der Praxis bis auf Ausnahmen keine gute Durchdringung^{7,21}.

Wenngleich der Ansatz einer non-invasiven In-vivo-Klassifikation inkorporierter Drogen vielversprechend erscheint, so gibt es bislang keine eindeutigen Kriterien, anhand derer eine solche Differenzierung erfolgen könnte. Die Kommunikation mit den Patienten selbst kann intoxikationsbedingt oder aufgrund mangelnder Einsicht oder Kenntnis oder aber auch auf-

grund vorhandener Sprachbarrieren schwierig bis unmöglich sein ^{6,21,38,41,60,100-103}. Aus diesen Gründen wäre eine von der Patientenkooperation unabhängige Methode wünschenswert. Hilfreich können hierbei Hinweise anhand bereits aufgetretener Intoxikationserscheinungen sein. Allerdings können Zusatzfaktoren existieren, die das klassische Bild solcher Intoxikationserscheinungen beeinflussen, wie z.B. die Einnahme von Parasympatholytika bzw. Spasmolytika zur Hemmung der Darmmotilität, ein zusätzlicher Drogenkonsum oder die Verwendung von Streckmitteln ^{7,8,12,18,22,38,39,51,56,100}. Auch der Nachweis eines Suchtmittels im Urin, Speichel oder Schweiß ist möglich. Meist ist dies nicht kurzfristig verfügbar und falls doch, so bergen diese Verfahren vergleichbare Fehlerpotenziale im Falle eines zusätzlichen Drogenkonsums, was die Abgrenzung zwischen transportierter und konsumierter Substanz zumindest erschwert ^{7,8,12,16,39,48}. Besonders problematisch sind dabei Fälle, in denen Body-Packer verschiedene Substanzen transportieren ^{8,30}. Eine dritte Option zur Stoffdifferenzierung bieten möglicherweise bildgebende Verfahren, die i. d. R. ohnehin im Rahmen des Managements zur Anwendung kommen. Erste Ansätze diesbezüglich existieren bereits sowohl für die Röntgen- als auch die CT-Darstellung. Bisher galt die These, es können anhand der abgebildeten Dichtewerte, speziell in der CT in Hounsfield-Einheiten (HU), Rückschlüsse auf den Päckcheninhalt gezogen werden ⁴. Aufgrund der variablen Herstellung der Packs bzgl. Inhalt und Verpackung ist aber eine sehr große Bandbreite hinsichtlich der Dichtewerte zu erwarten ^{4,18,28,50,51}.

Einen potentiellen Lösungsansatz bietet die Dual-Energy-CT (DECT). Hierbei werden CT-Schnittbilder unter Verwendung zweier Spannungslevel generiert. Da das Absorptionsverhalten von Röntgenstrahlen nicht nur von der Dichte sondern auch von der Ordnungszahl enthaltener Atome, oder genauer gesagt deren Hülle, abhängt, stellt die Methode eine zusätzliche Differenzierungsmöglichkeit hinsichtlich der Bestandteile durchstrahlter Masse in Aussicht ¹⁰⁴⁻¹⁰⁶. Für die Substanztanalyse von z.B. Nieren- oder Gallensteinen ist dies bereits möglich und auch im Kontext Body-Packing wurden erste positive Ergebnisse berichtet ^{56,106-112}.

1.6 Ziel dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, die DECT als Methode bei der Differenzierung von Drogengebunden beim Body-Packing zu überprüfen.

Erstens gilt es, in einem Ex-vivo-Experiment festzustellen, inwieweit eine Differenzierung von für Body-Packing typischen Drogen mittels DECT auch bei Verwendung unterschiedlicher Streckmittel sowie unterschiedlicher Kompression und unterschiedlicher Konzentration möglich ist.

Zweitens wird ein In-vivo-Fall in-situ am Schweinemodell simuliert, um festzustellen, inwiefern die Ex-vivo-Ergebnisse auf die Realität, also die intrakorporale Lokalisation der Packs, übertragbar sind. Zudem wird retrospektiv ein Fall aus dem Innenstadt-Klinikum der Universität München aufgearbeitet.

Drittens sollen aus diesen Ergebnissen Empfehlungen für das Management symptomatischer Body-Packer abgeleitet werden.

2 Material und Methoden

2.1 Physikalische und technische Grundlagen

2.1.1 Single-Energy-Computertomographie

Die Single-Energy-CT (SECT) erlaubt aufgrund einer breiten Verfügbarkeit, einer kurzen Untersuchungszeit von wenigen Sekunden und einer Auflösung bis in den Submillimeterbereich in allen Raumebenen gerade auch bei Notfällen das schnelle Stellen präziser Diagnosen. Die SECT ist etabliert und entspricht der gängigen CT mit einer Röntgenröhre und einem gegenüberliegenden Detektorsystem ¹¹³.

Während einer SECT-Untersuchung wird ein fächerförmiger Strahl emittiert, dessen Durchdringungsstärke von der Spannung der Röntgenröhre abhängt. Bei der Durchdringung von Geweben verliert der Röntgenstrahl an Intensität und wird nach dem Verlassen des untersuchten Objekts vom Detektorsystem in Form von elektrischen Signalen registriert. Durch die kontinuierliche Drehung von Röhre und gegenüberliegendem Detektorsystem entsteht so ein Schwächungsprofil mit Projektionen in sehr vielen Richtungen ^{105,113,114}. Die Schwächung selbst erfolgt exponentiell und komplexe mathematische Berechnungen erlauben eine Rückwärtsermittlung von Schwächungsverteilungen in Dichtewerte einzelner Volumenelemente (= Voxel) ¹⁰⁵. Diese wiederum werden auf dem Betrachtungsmonitor durch einen Bildpunkt (= Pixel) repräsentiert ¹¹⁴. Die verschiedenen Pixel werden durch unterschiedliche Grautöne dargestellt, was anhand einer in sogenannten Hounsfield Units (HU) vorliegenden Dichtewerttabelle erfolgt ¹⁰⁵. Eine HU-Skala ist notwendig, um eine Eichung vornehmen zu können. Da es sich um eine lineare Skala handelt, genügen zwei Punkte zur Definition einer Geraden. Diese zwei Punkte sind aufgrund der immer gegebenen Verfügbarkeit Luft und Wasser, wobei Luft willkürlich -1000 HU und Wasser 0 HU zugeordnet werden. Der lokale Schwächungskoeffizient μ eines Pixels errechnet sich dabei nach der unten stehenden Formel ^{105,113-115}.

$$HU(\text{Objekt}) = \frac{\mu(\text{Objekt}) - \mu(\text{Wasser})}{\mu(\text{Wasser})} \times 1000$$

Die HU-Werte von Wasser und Luft sind als Fixpunkte per Definition gegeben, während die Werte für andere Gewebe u.a. von der angelegten Spannung abhängen ^{104,113,114}. Die HU-Skala reicht von -1024 HU bis 3071 HU und umfasst damit $2^{12} = 4096$ Werte ¹¹³. Da aber das menschliche Auge bestenfalls 30 Graustufen unterscheiden kann, muss eine Verteilung der stetigen Dichtewerte auf diskrete Graustufen erfolgen, um Kontraste sichtbar zu machen. Sicherheitshalber beschränkt man sich hierbei auf 16 Graustufen, damit diese auch bei nicht ganz perfekter Sehstärke von allen Menschen als Kontrastsprünge wahrgenommen werden können ¹¹³. Zur weiteren Steigerung der Bildkontraste werden die 16 Graustufen nur in dem

Teil der HU-Skala linear verteilt, auf dem der Fokus bei der Betrachtung liegt. Hiervon leitet sich auch der Begriff des Fensters ab. Sicht auf die Dichte besteht bei Blick durch das Fenster. Werte unterhalb der Fenstergrenze sind im Bild immer schwarz, Werte darüber immer weiß dargestellt. Relativ zur Mitte des gewählten Fensters werden Pixel mit hohen HU-Werten aufgrund ihrer helleren Grautöne als hyperdens bezeichnet, Pixel mit niedrigeren HU-Werten erscheinen dagegen dunkler und werden dementsprechend als hypodens beschrieben ^{105,114}. Pixel gleicher Dichte werden als isodens bezeichnet ^{105,114}. In der Konsequenz bedeutet die Fensterung einerseits eine Optimierung der Bildkontraste bei der Bildbetrachtung, andererseits für eine vollständige Bewertung aber auch die Notwendigkeit, mehrere solcher Fenster desselben Bildes zu betrachten (*Abbildung 4*) ^{113,114}.

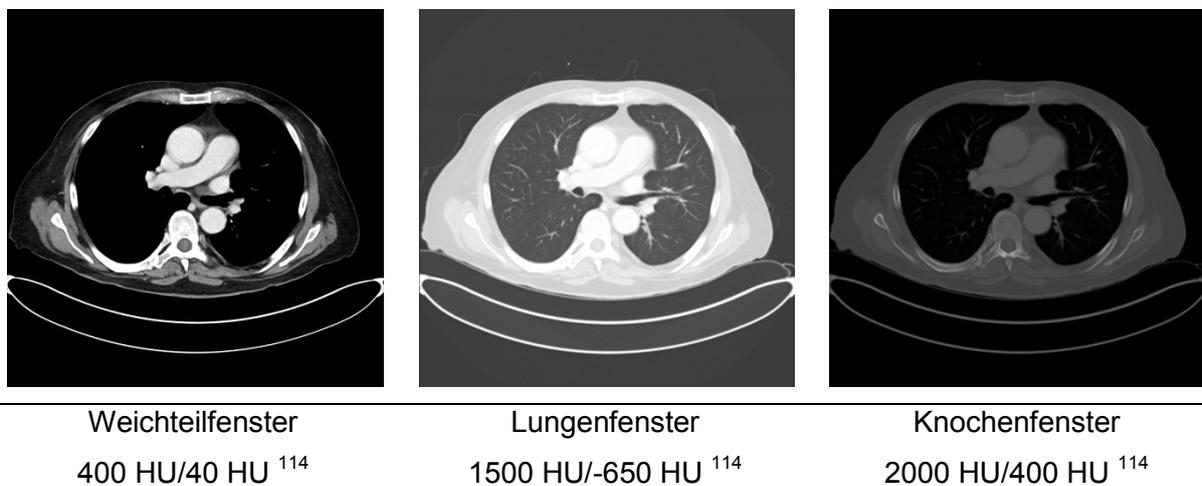


Abbildung 4: Darstellung einer Einzelschicht eines CT-Thorax nach intravenöser Kontrastmittelapplikation in verschiedenen Fensterungen unter Angabe der Fensterbreite sowie der Fenstermitte in HU. In Abhängigkeit der Fensterung ist entweder das mediastinale Weichgewebe, das lufthaltige Lungengewebe oder das dichte Skelett gut zu beurteilen ¹¹⁴.

Um den exakten HU-Wert einer gewünschten Bildfläche zu bestimmen, wird ein Messkreis, eine sogenannte Region of Interest (ROI), an der entsprechenden Stelle platziert und nur die darin enthaltenen Pixel ausgewertet.

Die Ermittlung und der Vergleich der HU-Werte kann u.a. eine Hilfestellung bei der Analyse von Stoffen wie beispielsweise Fett, Knochen, Muskulatur, Blut oder auch Wasser und Luft bieten, bei Mischungen oder Substanzen ähnlicher Dichte kann sich die Unterscheidung jedoch oftmals schwierig gestalten ^{105,108,114,116-119}.

2.1.2 Dual-Energy-Computertomographie

Für die Stoffunterscheidung kann die SECT nur die Absorption bei definierter Energie nutzen. DE-Daten erweitern diese Aussagekraft um eine zusätzliche Dimension, indem Informa-

tion über die Absorption bei unterschiedlichen Energien verfügbar ist, was ein Maß für die atomare Zusammensetzung darstellt ¹²⁰.

DE spielt aufgrund der geringeren Verfügbarkeit in der klinischen Diagnostik bisher im Gegensatz zu SE-Untersuchungen lediglich eine untergeordnete Rolle. Das Prinzip des DE basiert auf der Verwendung zweier Energieniveaus, i.d.R. 80 kVp und 140 kVp Röhrensorgung, die im Rahmen einer einzigen CT-Untersuchung gleichzeitig generiert werden können ^{108-110,121,122}.

Den Hintergrund zur Verwendung zweier unterschiedlicher Energieniveaus bildet die Tatsache, dass die Schwächung der Strahlung und damit die Höhe der HU im untersuchten Gewebe neben der physikalischen Dichte auch in Abhängigkeit von der Stoffart und damit der atomaren Ordnungszahl (Z_{eff}) sowie dem verwendeten Spannungslevel steht ¹⁰⁴. Die physikalische Grundlage hierzu bilden der Photoeffekt sowie die Compton-Streuung bei der Interaktion zwischen Röntgenstrahlung und Materie ^{105,114}.

Beim Photoeffekt kommt es zu einer Interaktion zwischen einem einfallenden Photon und einem Hüllenelektron eines Atoms. Das Photon überträgt dabei seine gesamte Energie auf das Elektron, welches hierdurch aus der Schale gelöst wird. Ein Elektron aus der nächsthöheren Energiestufe, d.h. einer äußeren Schale, nimmt dessen Position ein. Der Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je größer die Ordnungszahl des Atoms und je geringer die verwendete Energie ist. Ist die Energie des Photons nur wenig größer als die Bindungsenergie des Elektrons, so erscheint der Photoeffekt besonders ausgeprägt (K-edge/K-Kante) ^{105,114,122,123}.

Bei der Compton-Streuung gibt ein einfallendes Photon einen Teil seiner Energie an ein Hüllenelektron ab. Ist die übertragene Energie hoch genug, so wird das Elektron aus der Schale gelöst, das Photon selbst wird in seiner Richtung abgelenkt. Die Stärke der Compton-Streuung ist von der Höhe der atomaren Ordnungszahl sowie der verwendeten Energie weitgehend unabhängig ^{105,114,122,123}.

Derzeit kommen verschiedene Ansätze zur Generierung von DE-Daten zur Anwendung. Beim sogenannten Rapid-kVp-Switching handelt es sich um den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Ansatz. Das Gerät besteht wie bei den SE-Geräten aus einer Röntgenröhre und dem gegenüberliegenden Detektorsystem. Die angelegte Röhrensorgung wechselt während der Rotation innerhalb eines Bruchteils einer Millisekunde zwischen zwei Energieniveaus, wodurch zwei Datensätze mit unterschiedlicher Spannung erzeugt werden ^{105,124-128}.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Gerät handelt es sich um ein 64-Zeilen-Multidetektor-CT-Gerät (MDCT) (CT 750 HD Discovery, GE Healthcare, Waukesha, Milwaukee). Dieses

Gerät wird im Rahmen der täglichen Routine- sowie Notfalldiagnostik im Innenstadt-Klinikum der Universität München verwendet und bietet die Möglichkeit, Daten sowohl im SE- als auch im DE-Modus zu erheben. Bei der hier verwendeten Software zur Verarbeitung der DE-Daten handelt es sich um Gemstone Spectral Imaging™ (GE Healthcare, Waukesha, Milwaukee). Hierbei existieren, basierend auf den beiden verwendeten Spannungsniveaus, verschiedene Varianten, die DE-Daten bzw. Möglichkeiten der Stoffdifferenzierung zu visualisieren.

a) Spektrale Kurven

Spektrale Kurven bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit. Gemstone Spectral Imaging (GSI) erlaubt u.a. die Berechnung monochromatischer Bilder aus dem DE-Rohdatensatz für alle beliebigen Kiloelektronenvoltstufen (keV) zwischen 40 keV und 140 keV. Hieraus kann anschließend durch die Software anhand einer ROI neben der Dichte in HU für die vorgegebenen keV auch die entsprechende spektrale Kurve für den gewählten Bildausschnitt ermittelt werden¹²⁰. Diese zeigt die Dichte in HU (= y-Achse) in Abhängigkeit von der Spannung zwischen 40 keV und 140 keV (= x-Achse). Das spektrale Verhalten einer Substanz ist ein Zusammenspiel aus deren atomarer Zusammensetzung sowie deren physikalischer Dichte. Viele Stoffe zeigen hierbei ein charakteristisches Muster und lassen sich anhand dessen identifizieren bzw. als Komponente einer Substanz nachweisen (*Abbildung 5*)^{126,128,129}.

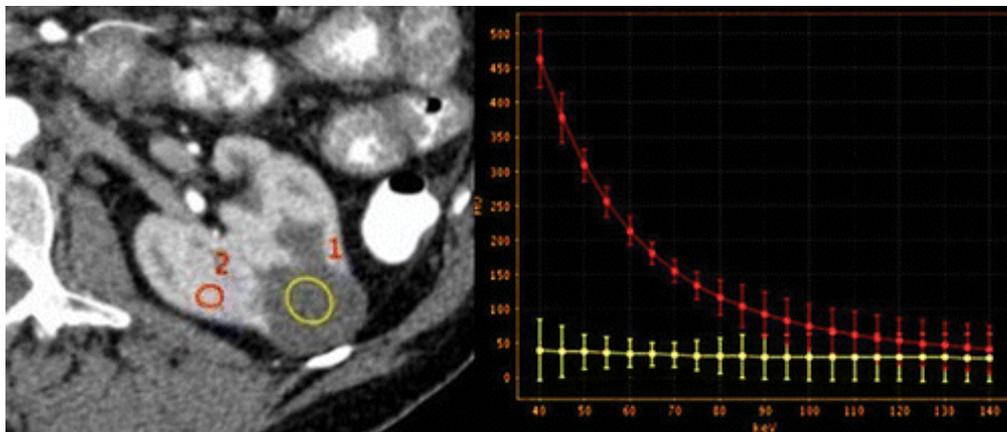


Abbildung 5: Die spektrale Kurve zeigt das spannungsabhängige (x-Achse in keV) Absorptionsverhalten (y-Achse in HU) einer Substanz. Das kräftig, Kontrastmittel anreichernde Nierengewebe weist beispielsweise eine hohe Spannungsabhängigkeit auf, dargestellt durch den steilen Verlauf der roten Kurve. Die blande Nierenzyste hingegen zeigt kein spannungsabhängiges Absorptionsverhalten, dargestellt durch den flachen Verlauf der gelben Kurve.

(aus Agrawal MD, Pinho DF, Kulkarni NM, Hahn PF, Guimares AR, Sahani DV, Oncologic applications of dual-energy CT in the abdomen. Radiographics, 2014, Volume 34, Pages 589-612 mit Genehmigung der Radiological Society of North America¹³⁰)

b) Subtraktionsbasierte bzw. gewichtete Aufnahmen

Des Weiteren ist es mittels DE möglich, auf der Subtraktion bzw. Gewichtung verschiedener Stoffe basierende Bildsätze zu generieren. Die Berechnungen erfolgen bei GSI basierend auf der Dekomposition der Voxel in zwei Substanzen, deren energieabhängiges Spannungsverhalten bekannt ist ^{130,131}. Hierfür müssen durch den Benutzer lediglich die beiden gewünschten Substanzen bei Betrachtung der DE-Bilddatensätze aus einer Maske am Befundungsmonitor ausgewählt werden. Klinisch häufig vorkommende Substanzen wie Jod, Wasser oder Calcium sind automatisch hinterlegt ¹²⁰. Zusätzlich gewünschte Substanzen können außerdem über den Hersteller eingespeist werden. Der Algorithmus ist nicht zugänglich. Bildbereiche, welche die gewichtete Substanz enthalten, stellen sich hierbei hyperdens, Bildbereiche, welche die subtrahierte Substanz darstellen, hingegen hypodens im Vergleich zur ursprünglichen Aufnahme dar (Abbildung 6) ^{120,130,132-134}.

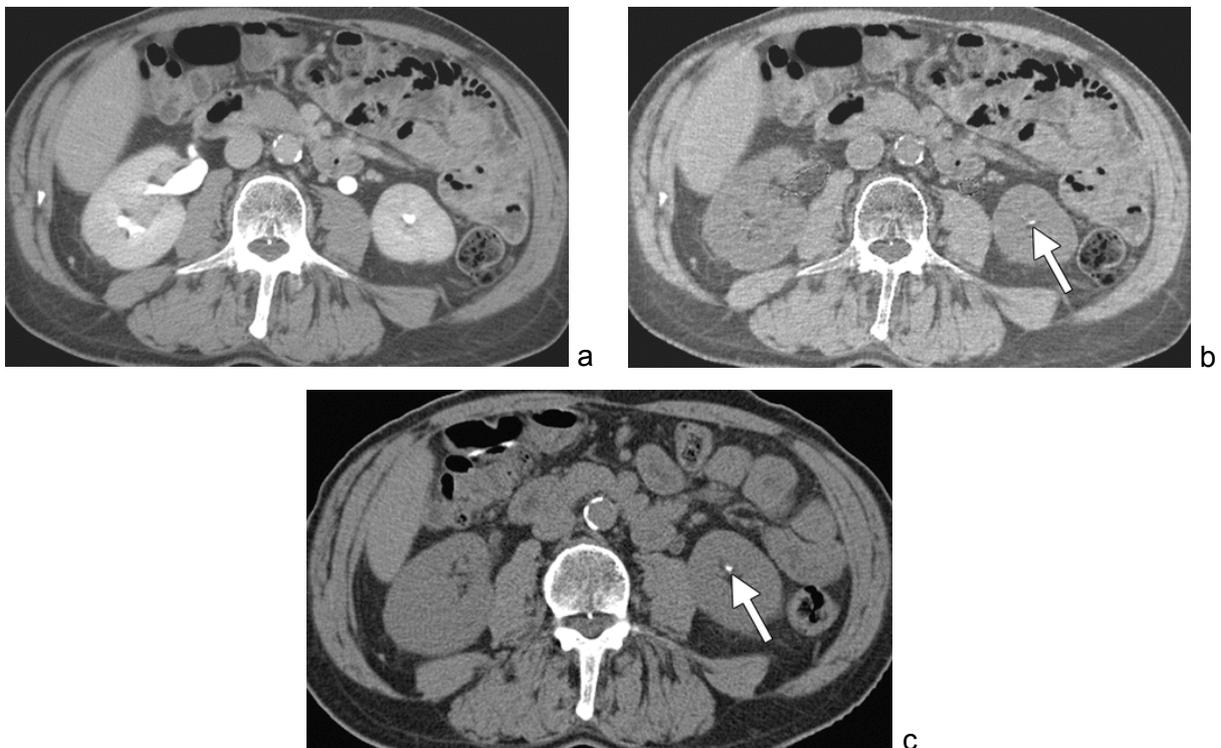


Abbildung 6: DECT mit hyperdensem, jodhaltigem Kontrastmittel im Nierenbeckenkelchsystem beidseits, wodurch Konkremente maskiert werden (a). Aus dem DE-Datensatz berechnete, virtuelle Nativaufnahme mit Subtraktion des jodhaltigen Kontrastmittels mit Darstellung eines Konkrements im Kelchsystem der linken Niere (b). Bestätigung des vorliegenden Konkrements in einer reellen Nativaufnahme ohne intravenöse Kontrastmittelgabe (c).

(aus Silva AC, Morse BG, Hara AK, Paden RG, Hongo N, Pavlicek W, Dual-energy (spectral) CT: applications in abdominal imaging. Radiographics, 2011, Volume 31, Pages 1031-46 mit Genehmigung der Radiological Society of North America ¹²⁸)

c) Ordnungszahlen

Wie unter den physikalischen Aspekten zum DE-Prinzip bereits erwähnt, spielen die atomaren Ordnungszahlen die tragende Rolle beim spannungsabhängigen Verhalten der HU-Werte verschiedener Substanzen^{120,135,136}. Ermitteln lassen sich die zu Grunde liegenden Ordnungszahlen über die Positionierung einer ROI an der gewünschten Stelle. Angegeben wird der Mittelwert der Ordnungszahlen der eingeschlossenen Pixel.

d) Dichtewerte

Bereits mehrmals wurden im Zusammenhang mit DE die Begriffe „monochromatisch“ sowie „keV“ verwendet. Dies besagt, dass eine Aufnahme durch eine Energiequelle/Spannung definierter Frequenz erzeugt wird¹²⁰. Hierbei handelt es sich jedoch um ein rechnerisches Ideal. In der Realität sind Energie-/Spannungsquellen polychromatisch, d.h. sie umfassen ein Spektrum verschiedener Energien mit definiertem Maximum¹²⁰. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die HU-Werte eines vorgegebenen keV-Levels im monochromatischen DE-Bild nicht mit einer polychromatischen SE-Aufnahme und dem entsprechenden Kilovolt-Level (kV) gleichzusetzen sind (*Abbildung 7*)^{120,126,137}. Die Dichtewerte bei ca. 70 - 78 keV entsprechen den Dichtewerten bei 100 - 120 kV, dem Standard einer abdominalen CT-Untersuchung^{17,31,32,51,70,116,119,120,126,131,138,139}. Die Ermittlung der Dichtewerte erfolgt über die Platzierung einer ROI an der gewünschten Stelle. Angegeben wird der Mittelwert der eingeschlossenen Pixel.

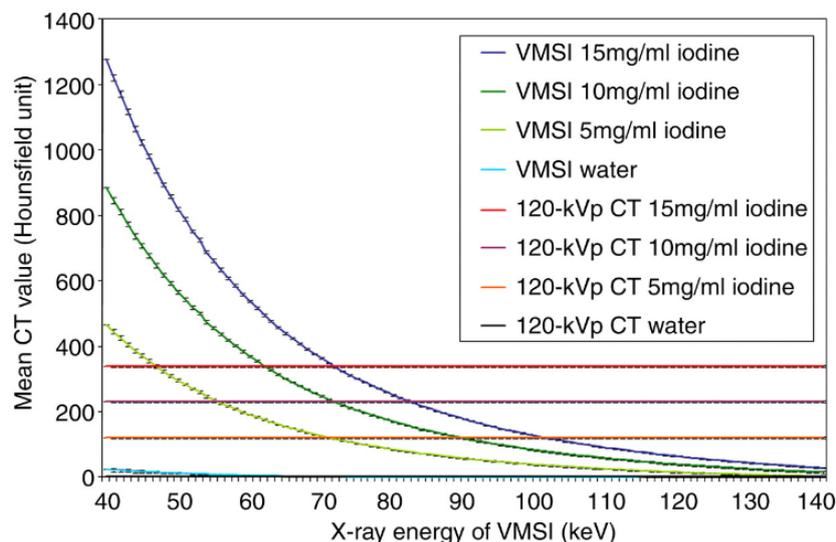


Abbildung 7: Vergleich der HU-Werte virtuell monochromatischer Aufnahmen (VMSI) sowie polychromatischer Aufnahmen mit 120 kVp für verschiedene Konzentrationen von Jod sowie für Wasser. Identische HU-Werte ergeben sich jeweils bei ca. 70 keV.

(aus Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT. Radiology, 2011; Volume 259, Pages 257-62 mit Genehmigung der Radiological Society of North America¹²⁶)

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass noch weitere Optionen zur Generierung eines DE-Datensatzes existieren. Zu nennen sind hierbei die Dual-Source-Technik, welche mit zwei um 90° versetzten Röhren-Detektor-Systemen und zwei unterschiedlich angelegten Spannungen arbeitet, sowie energiesensitive Detektoren, welche die eintreffende Strahlung in hochenergetische und niedrigenergetische Anteile trennen^{105,107,108,110,121,122,140}. Beide Modalitäten arbeiten in der Regel mit dem sogenannten Dual-Energy-Index (DEI), der die Abhängigkeit der HU-Werte eines Objekts von der verwendeten Energie zeigt¹⁰⁷.

$$DEI = \frac{HU(80\text{ kVp}) - HU(140\text{ kVp})}{HU(80\text{ kVp}) + HU(140\text{ kVp}) + 2000}$$

Eine automatische Generierung dieses Index ist an dem hier verwendeten Gerät nicht möglich. Die Erstellung spektraler Kurven sowie monochromatischer Bilder hingegen ist wiederum eine GE-spezifische Option. Beide Varianten, sowohl der DEI als auch die spektralen Kurven, basieren jedoch auf den gleichen physikalischen Grundprinzipien.

Unabhängig von den Möglichkeiten der Stoffdifferenzierung kann anhand des DE-Bilddatensatzes für die gewünschte keV-Zahl zwischen 40 keV und 140 keV eine standardmäßige Schnittbildbefundung der untersuchten Region erfolgen¹²⁰. Rekonstruktionen sind in allen Raumebenen möglich. Auch zwischen den üblichen Fensterungen kann variiert werden.

2.2 Experimente und Kasuistik

2.2.1 Experimente zur Differenzierung von Substanzen mittels Dual-Energy-Computertomographie

2.2.1.1 Kompressionsversuch – Proben und Versuchsaufbau

2.2.1.1.1 Versuchsaufbau vor Kompression der lockeren Proben

Die Kompressionsexperimente bildeten chronologisch betrachtet den Abschluss unserer Untersuchungen, sollen jedoch zum besseren Verständnis vorgezogen werden.

Bei allen Proben handelte es sich um gerade verfügbare, originale Schmuggelware und Vorzeigeasservate, welche durch die Polizei bzw. den Zoll bzgl. ihrer Inhaltsstoffe chemisch analysiert und für die Versuche zur Verfügung gestellt worden waren. Die Mehrzahl der hier verwendeten Proben war auch Bestandteil weiterer Scans. Insgesamt wurden 15 Proben analysiert, darunter mehrere Kokainhydrochloridproben (Kokain-HCl), eine Kokainbase sowie zwei Heroinbasen (*Tabelle 1*).

Tabelle 1: Übersicht über die analysierten Proben mit Angabe der Suchtmittelkonzentration sowie der verwendeten Streckmittel.

Probe	Streckmittel
Kokain-HCl 78%	Keine analysierbaren Substanzen
Kokain-HCl 77% (urspr. feucht)	Levamisol
Kokain-HCl 77%	Levamisol
Kokain-HCl 69% (urspr. feucht)	Lidocain, Levamisol, Mehl, Natriumhydrogencarbonat
Kokain-HCl 37%	Lidocain, Levamisol, Procain, Phenacetin, Weinstein
Kokain-HCl 36%	Mannit, Diltiazem, Levamisol
Kokain-HCl 21%	Mannit, Phenacetin, Procain
Kokainbase 85%	Keine analysierbaren Substanzen
Heroinbase 38%	Paracetamol, Koffein
Heroinbase 20%	Paracetamol, Koffein
Paracetamol/Koffein	Keine
Koffein	Keine
Luft	Keine
Mannit	Keine
Wasser	Keine

Für die Kompressionsreihe wurden alle 15 Proben getrocknet und pulverisiert, in runden, standardisierten Polycarbonat-Hochdruck-Spritzen (CCSB911, Merit Medical, South Jordan, Utah) mit einem Innendurchmesser von 1,55 cm und einer berechneten Fläche von 1,9 cm² in gleicher Höhe abgefüllt und diese anschließend zeitgleich untersucht. Es gilt anzumerken, dass sich im Strahlengang keinerlei Metallgegenstände befanden.

2.2.1.1.2 Versuchsaufbau nach Kompression der lockeren Proben

Im Anschluss an den Scan der 15 in den Spritzen befindlichen, lockeren Substanzen wurden die Proben nacheinander in eine Holzvorrichtung eingespannt und elektrisch kontrolliert über eine Schraube manuell bis zu 1000 Newton (N) komprimiert (*Abbildung 8*). Eine höhere Kompression war an der verwendeten Vorrichtung nicht möglich. Der auf die Proben ausgeübte Druck wurde entsprechend der nachfolgenden Formel berechnet und betrug 5260 kPa = 52,6 bar = 526 N/cm², wobei Pa = Pascal, und N = Newton ¹⁴¹.

$$Druck [Pa] = \frac{Kraft [N]}{Fläche [cm^2]} \times 10000$$

Diskrepanzen zu der vorliegenden Arbeit gehörigen Publikation von Grimm et al. bzgl. des ausgeübten Drucks basierten auf einem Berechnungsfehler der Spritzenfläche, wodurch fälschlicherweise ein Druck von 33,83 bar statt der tatsächlichen 52,6 bar angenommen wurde ¹⁴².

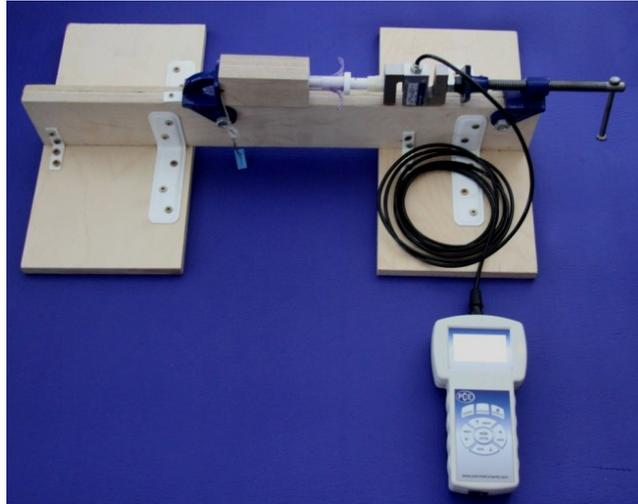


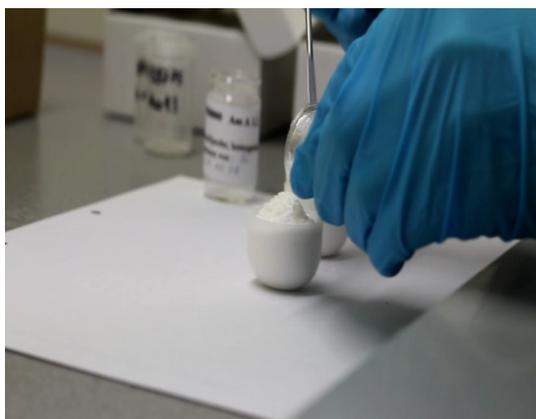
Abbildung 8: Kompressionsvorrichtung mit eingespannter Spritze sowie angeschlossenem Messsystem zur Druckmessung.

Im Anschluss an den Kompressionsschritt wurden alle 15 Proben entsprechend des Versuchs vor Kompression erneut zeitgleich in DE gescannt.

2.2.1.2 Schweinemodell – Proben und Versuchsaufbau

2.2.1.2.1 Versuchsaufbau der experimentellen Packs ex-vivo

Für die Experimente wurden alle Proben im Labor der Polizei in ovale Plastikbehälter von ca. 4 cm Länge und 3 cm Durchmesser mit größtenteils manueller aber auch mechanischer Kompression gefüllt, versiegelt (Abbildung 9) und gescannt. Untersucht wurden u.a. Kokain-HCl, verschiedene Heroinbasen sowie Haschisch (Tabelle 2).



a



b

Abbildung 9: Manuelles Befüllen (a) und Verschließen (b) der Plastikbehälter mit den pulverartigen Sucht- sowie Streckmitteln bei der Herstellung der experimentellen Packs ⁹⁸.

Tabelle 2: Übersicht über die analysierten Proben mit Angabe der Suchtmittelkonzentration, der verwendeten Streckmittel sowie der Probenkompression.

Hauptkomponente	Streckmittel	Kompression
Kokain-HCl 78%	Keine analysierbaren Substanzen	dicht*
Kokain-HCl 36%	Mannit, Diltiazem, Levamisol	dicht*
Kokain-HCl 21%	Mannit, Phenacetin, Procain	dicht*
Heroinbase 38%	Paracetamol, Koffein	Ziegel**
Heroinbase 38%	Paracetamol, Koffein	dicht*
Heroinbase 38%	Paracetamol, Koffein	locker*
Heroinbase 20%	Paracetamol, Koffein	dicht*
Haschisch	Keine analysierbaren Substanzen	Ziegel**
Paracetamol/Koffein	keine	dicht*
Wasser	keine	Keine
*manuell komprimiert		
**mechanisch komprimiert		

2.2.1.2.2 Versuchsaufbau der experimentellen Packs am Schweinemodell

Als In-situ-Modell diente ein neun Monate altes männliches Schwein.

„Das Tier war am Morgen des Experimentes zur Produktion von Fleisch- und Wurstwaren geschlachtet worden, somit entfiel die Notwendigkeit einer Anzeige bzw. Genehmigung gemäß Tierschutzgesetz.“⁹⁸

Für die Versuchsreihe wurde der Kadaver aus hygienischen Gründen in widerstandsfähige Folie gepackt und in Bauchlage auf dem CT-Tisch positioniert. Lediglich im Bereich des Rektums war ein Zugang möglich.

Für die Untersuchungen kamen die 10 bereits im Ex-vivo-Versuch analysierten Proben zur Anwendung (*Tabelle 2*). Aus hygienischen Gründen wurden zunächst alle mit den Substanzen gefüllten Plastikbehälter mit einem Gummiüberzug versehen und anschließend manuell ca. 9 cm tief im Rektum des Schweins nacheinander jeweils einzeln positioniert und mittels DE untersucht (*Abbildung 10*).



Abbildung 10: Schweinemodell mit rektaler Probe und sichtbarem Gummiüberzug ⁹⁸.

2.2.1.3 Kasuistik aus dem Innenstadt-klinikum der Universität München – Päckchen und Verlauf

2.2.1.3.1 Ex-vivo-Analyse der Originalpacks nach Defäkation

Bei der Kasuistik handelte es sich um den eingangs beschriebenen Fall aus dem Innenstadt-klinikum der Universität München, bei dem ein junger Mann im Rahmen des intrakorporalen Drogenschmuggels Intoxikationserscheinungen entwickelt hatte (*Gliederungspunkt 1.1*). Nachdem im Laufe des stationären Aufenthalts alle 73 Päckchen geborgen worden waren, wurden diese zunächst gereinigt. Optisch handelte es sich bei den Packs um einheitlich aussehende, gelblich-beige und ovale, ca. 2 cm x 4 cm große Fremdkörper, deren Hüllmaterial aus Latex aufgebaut war (*Abbildung 11*). Für die Analysen wurden alle gereinigten Päckchen zeitgleich mittels DE untersucht. In einer anschließenden chemischen Analyse wurden vier verschiedene Päckchengruppen ermittelt, wobei ausschließlich Kokain zu verzeichnen war (*Tabelle 3*).



Abbildung 11: Exemplarische Originalpacks nach Defäkation und Reinigung.

Tabelle 3: Übersicht über die Anzahl, den Inhalt (Suchtmittel, Konzentration, Streckmittel) und den Zustand der Packs der Kasuistik nach Defäkation.

Anzahl	Hauptkomponente	Streckmittel	Zustand
53	Kokain-HCl 77%	Levamisol	feucht/defekt
10	Kokain-HCl 77%	Levamisol	trocken
9	Kokainbase 85%	keine	trocken
1	Kokain-HCl 69% (=Sondermischung*)	Lidocain, Levamisol, Mehl, Natriumhydrogencarbonat	feucht/defekt
* Als einziges Pack mit dieser inhomogenen Streckung wird die Probe als Sondermischung bezeichnet.			

2.2.1.3.2 In-vivo-Analyse der Originalpacks am Patientenfall

Da der Patient im Rahmen des intrakorporalen Drogenschmuggels deutliche Intoxikationssymptome entwickelt hatte, welche trotz Ausscheidung einiger Packs anhielten, wurde eine DECT-Aufnahme als Hilfestellung bzgl. des weiteren Therapieverlaufs bei dem mittlerweile intensivpflichtigen und teils psychotischen Patienten durchgeführt. Das Protokoll war dabei angelehnt an das Protokoll einer CT-Angiographie zur Detektion von Endoleaks nach Stentimplantation mit Betonung von Jod, die applizierte Dosis innerhalb der vom Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlichten Richtwerte für eine Abdomenuntersuchung¹⁴³. Es erfolgte keine intravenöse, orale oder rektale Kontrastmittelapplikation. Zum Zeitpunkt des Scans hatte der junge Mann bereits 29 Päckchen ausgeschieden, wobei es sich ausschließlich um Kokain-HCl 77% handelte. Es wurden in der DECT-Untersuchung jedoch noch weitere 44 Packs im Magen-Darm-Trakt detektiert.

Da die Patientenuntersuchung nicht primär einem systematischen Erkenntnisgewinn, sondern zu rein diagnostischen Zwecken durchgeführt wurde und die dabei erhobenen Patientendaten und das Bildmaterial bzw. dessen Aufarbeitung als Kasuistik unter Wahrung der Anonymität erfolgte, bestätigte die lokale, angefragte Ethikkommission, dass keine Beratungsnotwendigkeit besteht und insbesondere daher auch kein förmliches Ethikvotum notwendig ist.

2.2.2 Detektion der Originalpacks mittels Dual-Energy-Computertomographie – In-vivo-Analyse von Stuhl am Patientenfall

Weil sich die Abgrenzung der Packs von den umgebenden Fäzes im soeben beschriebenen Patientenfall teils schwierig gestaltete, wurde als Nebenaspekt zusätzlich untersucht, inwiefern DE hierbei eine Hilfestellung bieten kann. Hierzu wurden neben den intrakorporalen Body-Packs zusätzlich insgesamt 20 Darmabschnitte mit Stuhl in den DE-Aufnahmen des vorliegenden Patientenfalls analysiert.

2.3 Scanprotokolle, Dosisberechnung und Datenauswertung

Die Parameter der im Rahmen der Experimente sowie der Kasuistik aus dem Innenstadtklinikum der Universität München verwendeten Scanprotokolle sind in *Tabelle 4* aufgelistet.

Tabelle 4: Scanparameter im Rahmen der Experimente sowie der Kasuistik aus dem Innenstadtklinikum der Universität München.

Modus	Proben vor und nach Kompression	Experimentelle Packs ex-vivo	Experimentelle Packs in-situ am Schweinmodell	Originalpacks ex-vivo	Originalpacks am Patientenfall
Röhrenspannung	80/140 kVp (DE-Modus)				
Stromstärke	60 mA	630 mA			
Rotationszeit	1,0 s	0,5 s		0,6 s	0,5 s
Schichtdicke	1,25 mm				
Schichtabstand	1,25 mm				
Scanlänge	10 cm	10,4 cm	42,8 cm	36,5 cm	52,25 cm
Pitch	1,375:1				
<i>kVp=Röhrenspannung mA=Milliampere s=Sekunde mm=Millimeter</i>					

Die effektive Dosis (E_{eff}) zur Abschätzung der Strahlenbelastung am Schweinmodell sowie am Patienten wurde entsprechend der nachfolgenden Formel berechnet, bei der es sich um ein Produkt aus dem Dosis-Längen-Produkt (DLP) sowie einem hinsichtlich der Dosis organbezogenen Konversionsfaktor (κ) für das Abdomen und Becken handelt ¹⁰⁵.

$$E_{\text{eff}} [mSv] = DLP \times \kappa \left[\frac{mSv}{mGy \times cm} \right] = CTDI_{\text{vol}} [mGy] \times \text{Scanlänge} [cm] \times \kappa \left[\frac{mSv}{mGy \times cm} \right]$$

Das DLP errechnet sich über den CT-Dosis-Index ($CTDI_{\text{vol}}$) sowie die Scanlänge. Alle drei Faktoren können dem Dosisbericht der CT-Konsole entnommen werden. Der organbezogene Faktor κ beträgt $0,017 \text{ mSv/mGy} \times 1/\text{cm}$, wobei $\text{mSv} = \text{Millisievert}$ und $\text{mGy} = \text{Milligray}$ ¹¹³.

Die Auswertung erfolgte an einer Picture Archiving and Communication System (PACS)-Workstation (Syngo Studio V36, Siemens Healthcare, Erlangen).

Es ist anzumerken, dass in dieser Arbeit nicht alle der ursprünglich verwendeten und teils in den Aufnahmen abgebildeten Proben analysiert wurden, da die Experimente auch die Basis zweier weiterer Dissertationen mit anderem Fokus bilden ^{98,144}.

Laut Hersteller entsprechen monochromatische Bilder bei 77 keV einer Aufnahme mit 120 kV ¹²⁰. Zur Auswertung wurden jedoch monochromatische Bilder bei 70 keV aufgrund des niedrigen Bildrauschens mit einer rekonstruierten Schichtdicke von 5 mm, wie sie im Rahmen der

CT-Diagnostik beim Body-Packer in der Literatur verwendet wird, gewählt 17,31,32,51,70,71,120,125,126,131,145. Die Auswertungen erfolgten im Weichteilfenster.

Zunächst wurden für alle Versuche bzw. für die Kasuistik gewichtete Bilder mit Betonung von Heroinbase bzw. Kokain-HCl im Vergleich zu Wasser erzeugt, um Bildbereiche, welche das entsprechende Suchtmittel enthielten, optisch hervorzuheben. Wasser wird in der Literatur häufig aufgrund der geringen Schwächung als zweite Komponente gewählt¹³⁰. Als Beispiel sind hier kontrastmittelgewichtete Aufnahmen zu nennen¹³¹. Bei den Analysen der Kasuistik wurden zusätzlich wassergewichtete Aufnahmen erstellt. Die zur Berechnung dieser Bilder erforderlichen Daten für die Suchtmittel waren zuvor vom Hersteller ins System eingespeist worden. Wasser war bereits in der Auswahlmaske vorhanden.

Daraufhin wurden, mit Ausnahme der Aufnahmen des Patienten, bei dem aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der Packs im Körper lediglich eine Messung pro Probe erfolgte, in jeder Probe zehn Messungen in unterschiedlichen Schichten durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, kein Hüllmaterial in die Messungen einzuschließen. Die ROI-Größe variierte je nach Probengröße zwischen 35 mm² und 205 mm².

Anschließend wurde über jede ROI die atomare Ordnungszahl sowie der HU-Wert bei 70 keV ermittelt und die spektrale Kurve errechnet. Zur Auswertung der spektralen Kurven wurde für jede Kurve ein Steigungsfaktor (SF) ermittelt, welcher sich aus $\Delta HU/\Delta \text{Spannung}$ bzw. $(\Delta y/\Delta x)$ berechnete. Für das x-Achsenintervall wurde die komplette Kurve, also der Bereich zwischen 40 keV und 140 keV gewählt (Abbildung 12). Hierdurch wird nur das Verhältnis der beiden Endpunkte der Kurve repräsentiert, die Kurve selbst zeigt in jedem Abschnitt eine andere Steigung. Die zu Grunde liegende Gleichung ist allerdings unbekannt. Theoretisch kann der Steigungsfaktor über jedes beliebige Intervall zwischen 40 keV und 140 keV ermittelt werden¹⁴².

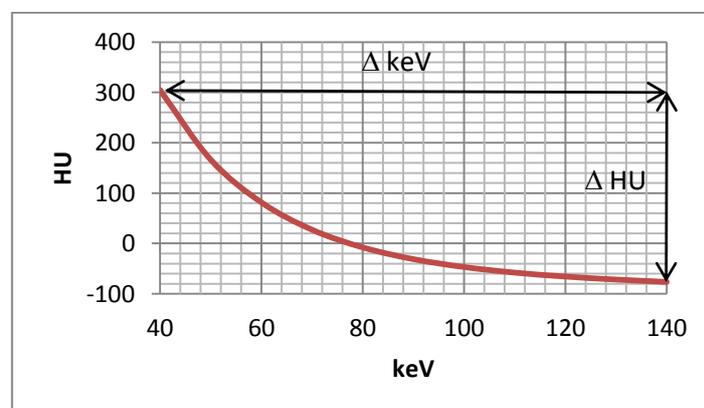


Abbildung 12: Berechnung des Steigungsfaktors ($\Delta HU/\Delta keV$) am Beispiel der spektralen Kurve eines Kokain-HCl-Packs aus den Experimenten.

Für jede Probe bzw. Probengruppe wurden aus allen analysierten Schichten der Minimal- und Maximalwert sowie der entsprechende Median bzgl. der Steigungsfaktoren, der atomaren Ordnungszahlen bzw. Dichtewerte ermittelt. Die Berechnungen erfolgten mittels Microsoft Excel 2007.

An dieser Stelle sei als Ergänzung in einem Gesamtzusammenhang erwähnt, dass es sich bei der Differenzierung der intrakorporalen Drogen mittels Dichte lediglich um einen Neben- aspekt handelt und die HU-Werte in der hier vorliegenden Arbeit eine untergeordnete Rolle spielen, da sie zentraler Bestandteil der SECT sind und ausführlich in einer weiteren Arbeit dieser Forschungsgruppe von Katarina Zöfelt thematisiert werden ¹⁴⁴. Zentraler Bestandteil dieser weiteren Arbeit ist der Kompressionsversuch einschließlich der Zwischenschritte. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden jedoch bisher nicht publiziert. Der Steigungsfaktor der spektralen Kurven gibt zwar Auskunft über den Kurvenverlauf, die HU-Werte zeigen jedoch die Lokalisation der spektralen Kurven im Koordinatensystem an. Sie entsprechen damit mathematisch vereinfacht dem y-Achsenabschnitt in der Kurvendiskussion, wenn 100 - 120 kV bzw. 70 – 78 keV (hierbei ergeben sich etwa identische HU-Werte) als Nullpunkt der x-Achse definiert werden. Folglich sind beide Parameter, der Steigungsfaktor und die Dichte erforderlich um die spektrale Kurve zu beschreiben.

Auch die Detektion der intrakorporalen Packs ist Thema einer anderen Arbeit dieser Forschungsgruppe, wobei hier die Dosisreduktion bei der SECT sowie dem CT-Scout-Scan im Fokus stehen ^{97,98,146}. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits durch Dr. med. Edvard Ziegeler veröffentlicht ⁹⁸.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Differenzierung von Substanzen mittels Dual-Energy-Computertomographie

3.1.1 Ergebnisse des Kompressionsversuchs

3.1.1.1 Ergebnisse vor Kompression der lockeren Proben

In den gewichteten Aufnahmen zeigten die Proben ein divergentes Verhalten. Während sich die Kokain-HCl-Proben in den kokaingewichteten Aufnahmen hyperdens darstellten, zeigten die Heroinproben, die Streckmittelproben sowie die Kokainbase ein hypodenses Verhalten (*Abbildung 14*). Eine umgekehrte Darstellung zeigte sich in den heroingewichteten Aufnahmen (*Abbildung 15*).

Die Probenanordnung ist *Abbildung 13* zu entnehmen.

Kokain-HCl 78%	Kokain-HCl 36%	Kokain-HCl 21%	Heroinbase 38%	Heroinbase 20%
Paracetamol/Koffein	Koffein	Kokain-HCl 37%	Kokain-HCl 77% (urspr. feucht)	Kokain-HCl 77%
Kokainbase 85%	Kokain-HCl 69% (urspr. feucht)	Luft	Mannit	Wasser

Abbildung 13: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.

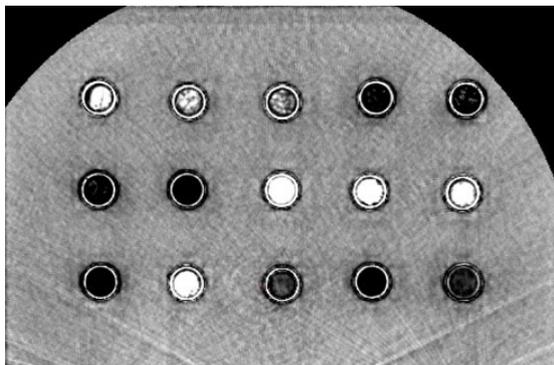


Abbildung 14: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Proben.

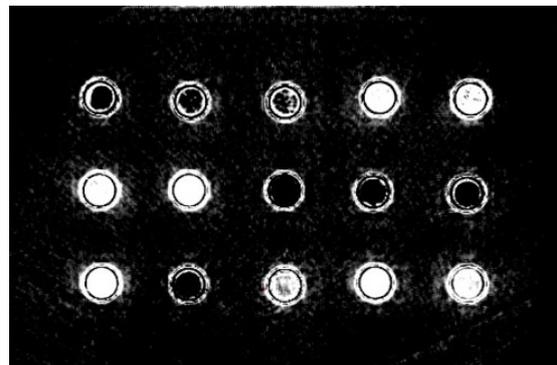


Abbildung 15: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Heroin- und Streckmittelproben sowie der Kokainbase.

Alle Kokain-HCl-Kurven zeigten einen fallenden Verlauf mit einem Steigungsfaktor von $-1,11$ HU/keV. Die Heroinkurven sowie die spektralen Kurven der Streckmittel hingegen zeigten steigende Verläufe mit Steigungsfaktoren von $0,52$ HU/keV bzw. $0,64$ HU/keV. Gleiches galt für den Kurvenverlauf der Kokainbase mit einer Steigung von $0,91$ HU/keV (*Tabelle 5*).

Die HU-Werte sowohl der Suchtmittel als auch der Streckmittel waren im negativen Bereich angesiedelt. Kokain-HCl rangierte bei -435,02 HU, Heroin bei -454,13 HU, die Streckmittel bei -410,91 HU und die Kokainbase bei -438,23 HU (*Tabelle 5*).

Bzgl. der atomaren Ordnungszahlen wurden für alle Substanzen niedrigere Werte als die für Referenzsubstanz Wasser (7,27) ermittelt. Sie betragen zwischen 0,50 bei Kokain-HCl und 2,22 bei den Streckmitteln. Die Ordnungszahl der Heroinproben betrug 1,02, der Kokainbase 0,65. Es waren zwei Abweichungen zu verzeichnen. Die Ordnungszahlen der 78%igen sowie der 77%igen Kokain-HCl-Probe betragen 0 (*Tabelle 5*).

Tabelle 5: Übersicht über die Ergebnisse der analysierten Proben vor Kompression mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.

Probe	SF (HU/keV) Median (Range)	Dichte bei 70 keV (HU) Median (Range)	Z_{eff} Median (Range)
Kokain-HCl 78%	-0,56 (-0,67; -0,52)	-569,30 (-589,72; -556,99)	0 (0)
Kokain-HCl 36%	-0,29 (-0,38; -0,23)	-368,04 (-378,47; -347,50)	4,34 (2,74; 6,19)
Kokain-HCl 21%	-0,08 (-0,11; -0,03)	-393,82 (-409,00; -374,97)	1,41 (1,07; 2,67)
Kokain-HCl 37%	-1,89 (-1,94; -1,72)	-371,39 (-453,68; -360,67)	1,26 (1,03; 2,19)
Kokain-HCl 77% (urspr. feucht)	-1,40 (-1,48; -1,31)	-441,21 (-446,89; -433,08)	0,27 (0,09; 0,50)
Kokain-HCl 77%	-1,11 (-1,18 ; -1,09)	-504,11 (-507,01; -486,87)	0 (0; 0,4)
Kokain-HCl 69% (urspr. feucht)	-1,25 (-1,38; -1,20)	-439,04 (-446,69; -405,84)	0,50 (0,26; 1,21)
Kokain-HCl gesamt*	-1,11 (-1,94; -0,03)	-435,02 (-589,72; -347,50)	0,50 (0; 6,19)
Kokainbase 85%	0,91 (0,86; 0,97)	-438,23 (-460,20; -429,97)	0,65 (0,14; 0,83)
Heroinbase 38%	0,57 (0,53; 0,60)	-426,03 (-431,98; -418,95)	1,11 (0,95; 1,30)
Heroinbase 20%	0,46 (0,43; 0,50)	-504,06 (-512,05; -476,28)	0,94 (0,40; 1,18)
Heroinbase gesamt**	0,52 (0,43; 0,62)	-454,13 (-512,05; -418,95)	1,02 (0,4; 1,4)
Paracetamol/Koffein	0,58 (0,46; 0,75)	-451,25 (-473,99; -412,81)	1,38 (0,93; 2,70)
Koffein	0,81 (0,68; 0,85)	-409,17 (-414,08; -354,09)	2,09 (1,56; 2,69)
Mannit	0,53 (0,45; 0,67)	-398,73 (-414,73; -390,15)	3,83 (1,73; 4,39)
Streckmittel gesamt***	0,64 (0,45; 0,85)	-410,91 (-473,99; -354,09)	2,22 (0,93; 4,39)
Luft	0,17 (0,16; 0,19)	-994,49 (-994,72; -993,50)	0
Wasser	0,27 (0,26; 0,29)	-12,10 (-13,25; -11,12)	7,27 (7,26; 7,28)
*bezogen auf alle 70 gemessenen Schichten			
**bezogen auf alle 20 gemessenen Schichten			
***bezogen auf alle 30 gemessenen Schichten			

3.1.1.2 Ergebnisse nach Kompression der lockeren Proben

Die kokaingewichteten Aufnahmen zeigten ein hyperdenses Muster aller Kokain-HCl-Proben. Die restlichen Substanzen dagegen - die Heroine, die Streckmittel sowie die Kokainbase - erschienen hypodens (Abbildung 17). Ein gegensätzliches Muster war in den heroingewichteten Aufnahmen zu verzeichnen (Abbildung 18).

Die Probenanordnung während des Scans war identisch zu der Aufnahme vor Kompression und ist in *Abbildung 16* dargestellt.

Kokain-HCl 78%	Kokain-HCl 36%	Kokain-HCl 21%	Heroinbase 38%	Heroinbase 20%
Paracetamol/Koffein	Koffein	Kokain-HCl 37%	Kokain-HCl 77% (urspr. feucht)	Kokain-HCl 77%
Kokainbase 85%	Kokain-HCl 69% (urspr. feucht)	Luft	Mannit	Wasser

Abbildung 16: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.

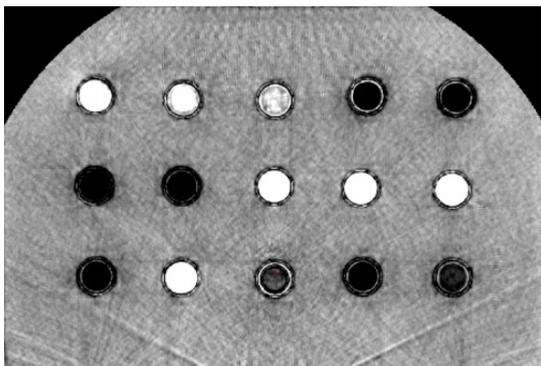


Abbildung 17: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Proben.

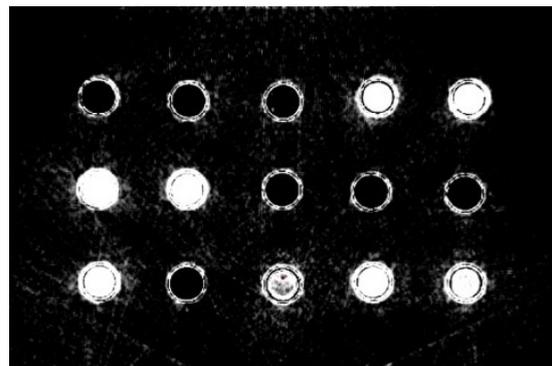


Abbildung 18: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Heroin- und Streckmittelproben sowie der Kokainbase.

Nach Kompression zeigten alle Kokain-HCl-Proben weiterhin fallende Kurvenverläufe mit einem negativen Steigungsfaktor von -2,55 HU/keV. Auch die positive Steigung der Heroin-, Streckmittel- sowie Kokainbasekurve persistierte. Die Steigungsfaktoren betragen 0,82 HU/keV, 1,18 HU/keV bzw. 1,22 HU/keV (*Tabelle 6*). Im Vergleich zu den Analysen vor Kompression resultierten steilere Kurvenverläufe (*Abbildung 19*).

Die Kokain-HCl-Proben zeigten die höchste Dichte mit teils positiven HU-Werten. Der Median betrug -4,02 HU. Die HU-Werte der übrigen Proben waren ausschließlich im negativen

Bereich angesiedelt, wobei Heroin mit -188,10 HU die niedrigsten Werte aufwies, gefolgt von der Kokainbase mit -141,30 HU und den Streckmitteln mit -118,30 HU (Tabelle 6). Im Vergleich zur unkomprimierten Form zeigte sich eine Zunahme der HU-Werte (Abbildung 20).

Die Ordnungszahl der Kokain-HCl-Proben war bei 9,59 angesiedelt und damit höher als die Referenzprobe Wasser (7,21). Die übrigen Stoffe hingegen zeigten niedrigere Ordnungszahlen mit einem Wert von 6,35 für Heroin, 6,0 für die Streckmittel und 5,76 für die Kokainbase (Tabelle 6). Ähnlich der HU-Werte zeigten auch die errechneten Ordnungszahlen durch Kompression eine Zunahme (Abbildung 21).

Tabelle 6: Übersicht über die Ergebnisse der analysierten Proben nach Kompression mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.

Probe	SF (HU/keV) Median (Range)	Dichte bei 70 keV (HU) Median (Range)	Z_{eff} Median (Range)
Kokain-HCl 78%	-1,74 (-1,94; -0,90)	-56,62 (-79,23; -17,68)	9,07 (8,25; 9,16)
Kokain-HCl 36%	-0,83 (-0,88; -0,77)	30,20 (12,80; 43,93)	8,27 (8,25; 8,55)
Kokain-HCl 21%	-0,35 (-0,37; -0,33)	-19,33 (-29,73; -6,03)	7,89 (7,88; 7,91)
Kokain-HCl 37%	-3,63 (-3,75; -3,48)	112,90 (83,43; 145,80)	10,05 (10,03; 10,07)
Kokain-HCl 77% (urspr. feucht)	-2,56 (-2,59; -2,54)	-38,11 (-60,09; -10,13)	9,63 (9,62; 9,68)
Kokain-HCl 77%	-2,77 (-2,82; -2,47)	-1,98 (-20,79; 12,16)	9,72 (9,54; 9,78)
Kokain-HCl 69% (urspr. feucht)	-2,66 (-2,86; -2,59)	48,91 (18,41; 86,09)	9,59 (9,55; 9,63)
Kokain-HCl gesamt*	-2,55 (-3,75; -0,33)	-4,02 (-79,23; 145,80)	9,59 (7,88; 10,07)
Kokainbase 85%	1,22 (1,17; 1,26)	-141,30 (-162,2; -109,4)	5,67 (5,62; 5,83)
Heroinbase 38%	0,68 (0,62; 0,75)	-196,70 (-206,70 ; -193,10)	6,56 (6,46; 6,65)
Heroinbase 20%	0,93 (0,88; 1,00)	-179,90 (-183,2; -171,80)	6,16 (6,06; 6,23)
Heroinbase gesamt**	0,82 (0,62; 1,00)	-188,10 (-206,70; -171,80)	6,35 (6,06; 6,65)
Paracetamol/Koffein	1,18 (1,16; 1,22)	-60,72 (-67,44; -46,26)	6,0 (5,98; 6,06)
Koffein	1,23 (1,20; 1,25)	-128,10 (-131,70; -124,60)	5,74 (5,69; 5,79)
Mannit	0,91 (0,88; 0,93)	-93,76 (-112,00; -67,21)	6,38 (6,33; 6,45)
Streckmittel gesamt***	1,18 (0,88; 1,25)	-118,30 (-131,70; -46,26)	6,0 (5,69; 6,45)
Luft	0,21 (0,20; 0,23)	-993,1 (-994,00; -990,40)	0
Wasser	0,33 (0,29; 0,36)	-10,19 (-11,51; -9,42)	7,21 (7,19; 7,24)
*bezogen auf alle 70 gemessenen Schichten			
**bezogen auf alle 20 gemessenen Schichten			
***bezogen auf alle 30 gemessenen Schichten			

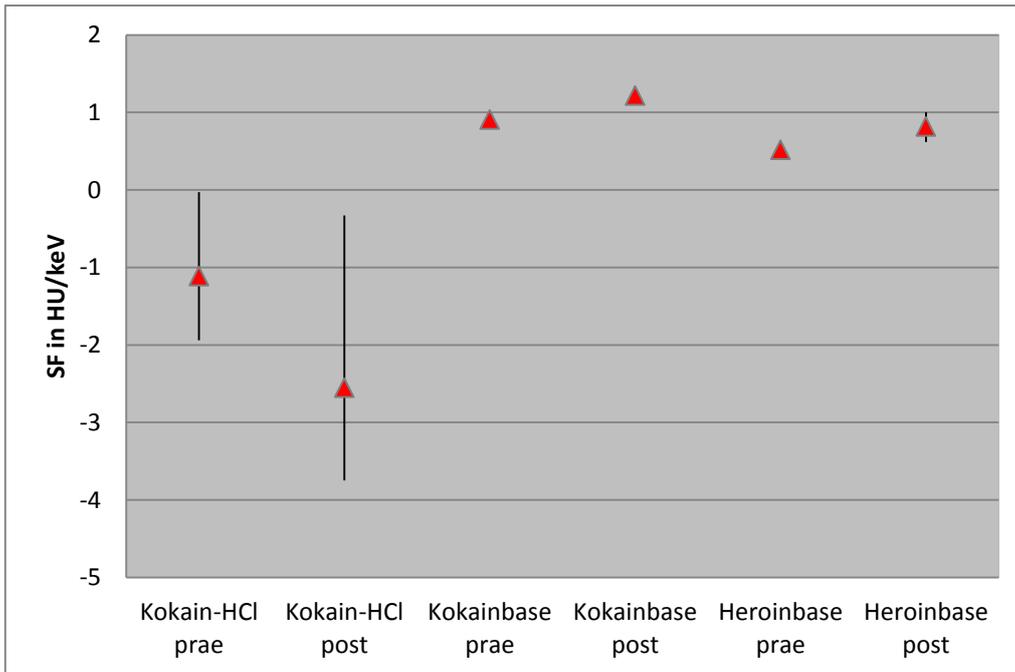


Abbildung 19: Vergleich der Steigungsfaktoren der untersuchten Kokain- und Heroinproben vor und nach Kompression mit Darstellung des Median und des Range.

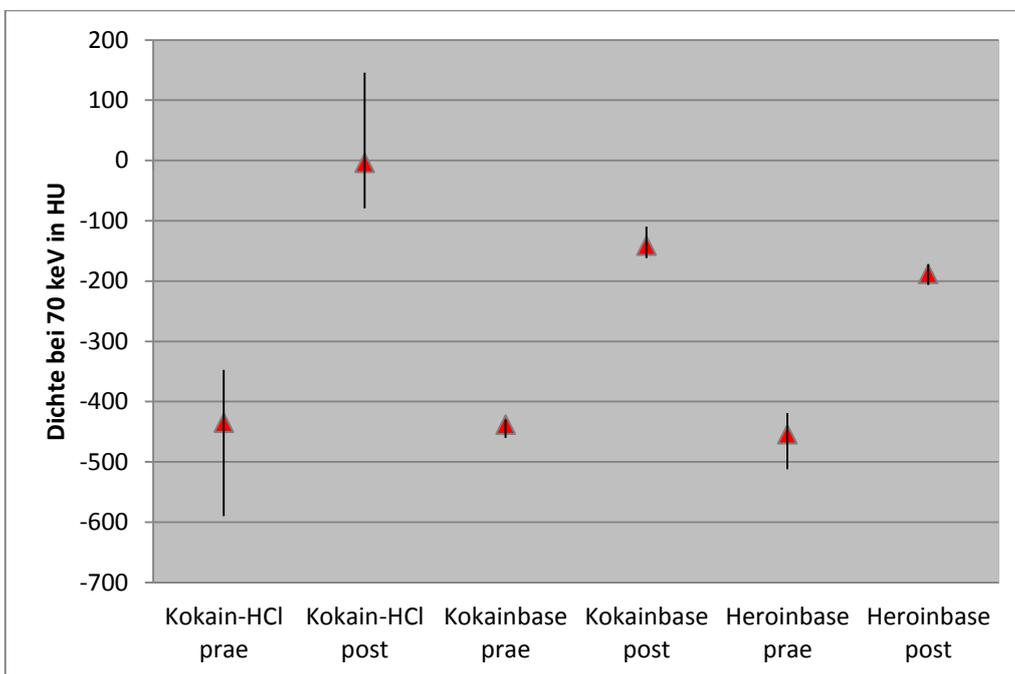


Abbildung 20: Vergleich der Dichtewerte der untersuchten Kokain- und Heroinproben bei 70 keV vor und nach Kompression mit Darstellung des Median und des Range.

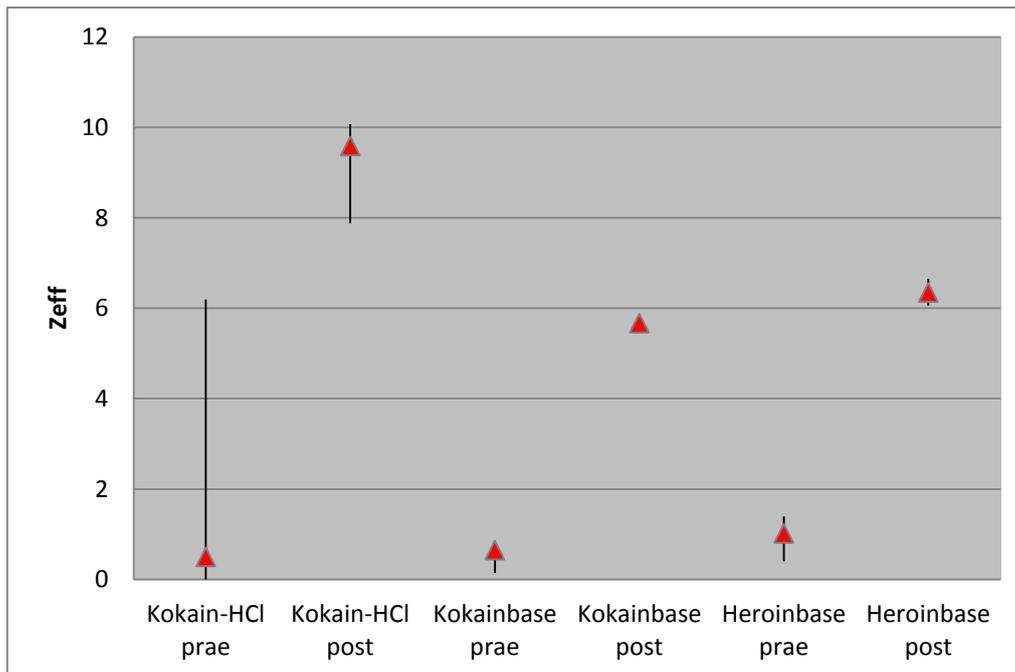


Abbildung 21: Vergleich der atomaren Ordnungszahlen der untersuchten Kokain- und Hero-inproben vor und nach Kompression mit Darstellung des Median und des Range.

3.1.2 Ergebnisse des Schweinemodells

3.1.2.1 Ex-vivo-Ergebnisse der experimentellen Packs

In den Aufnahmen mit Gewichtung von Kokain-HCl zeigten alle Kokain-HCl-Proben ein hyperdenses Verhalten. Gleiches traf auch für die Haschischprobe zu. Die Heroinproben erschienen ebenso wie das Streckmittel hingegen insgesamt hypodens (*Abbildung 23*). Ein umgekehrtes Verhalten konnte in den heroingewichteten Aufnahmen nachgewiesen werden (*Abbildung 24*).

Die Probenanordnung während des Scans ist in *Abbildung 22* dargestellt.

Kokain-HCl 78% dicht		Kokain-HCl 36% dicht	
Kokain-HCl 21% dicht		Heroinbase 38% Ziegel	Heroinbase 38% dicht
Heroinbase 38% locker	Heroinbase 20%		Haschisch
	Paracetamol/Koffein		Wasser

Abbildung 22: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.

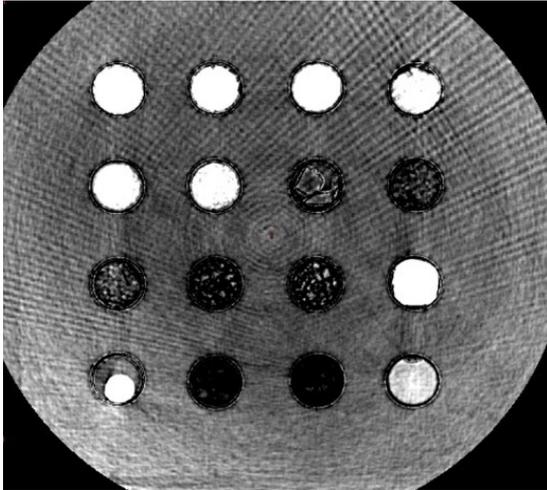


Abbildung 23: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Proben sowie des Haschischs.

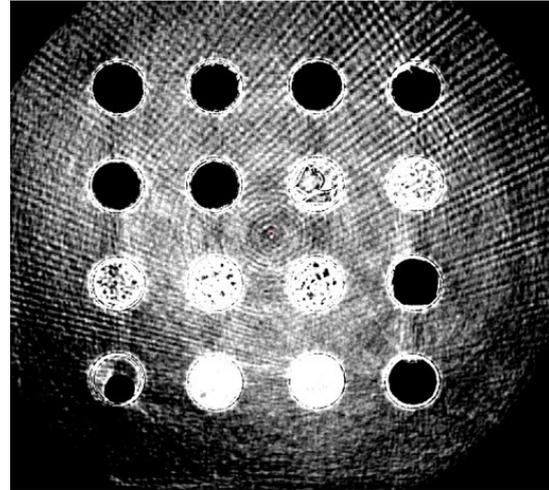


Abbildung 24: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Heroinproben sowie der Streckmittel.

Alle Kokain-HCl-Proben wiesen fallende Kurvenverläufe mit einem negativen Steigungsfaktor von $-1,25 \text{ HU/keV}$ auf. Auch die Haschischprobe zeigte fallende Kurven mit einer Steigung von $-3,64 \text{ HU/keV}$. Die Heroinproben sowie die Streckmittel hingegen zeigten einen steigenden Kurvenverlauf mit einer Steigung von $0,23 \text{ HU/keV}$ bzw. $0,52 \text{ HU/keV}$ (Tabelle 7).

Die HU-Werte waren allesamt im negativen Bereich angesiedelt. Die Dichte von Kokain-HCl betrug $-269,32 \text{ HU}$. Heroin zeigte mit $-346,99 \text{ HU}$ die niedrigsten und Haschisch mit $-21,23 \text{ HU}$ die höchsten Dichtewerte. Die Dichte der Streckmittel betrug $-300,46 \text{ HU}$. Der 38%ige Heroinziegel unterschied sich mit einem Dichtewert von $-81,69 \text{ HU}$ deutlich von den übrigen Heroinproben (Tabelle 7).

Die Ordnungszahlen der Kokain-HCl-Proben sowie v.a. des Haschischs waren höher als der Referenzwert von Wasser ($8,0$) und betrug $8,67$ bzw. $10,33$. Die Heroine sowie die Streckmittel zeigten mit Werten von $5,32$ bzw. $6,69$ niedrigere Ordnungszahlen als Wasser (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht über die Ergebnisse der experimentellen Packs ex-vivo mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.

Probe	SF (HU/keV) Median (Range)	Dichte bei 70 keV (HU) Median (Range)	Z _{eff} Median (Range)
Kokain-HCl 78% dicht	-1,51 (-1,57; -1,46)	-490,33 (-505,12; -480,03)	0
Kokain-HCl 36% dicht	-1,25 (-1,26; -1,21)	-254,76 (-258,00; -252,53)	8,97 (8,91; 8,97)
Kokain-HCl 21% dicht	-0,95 (-0,96; -0,92)	-269,32 (-284,20; -256,42)	8,67 (8,65; 8,69)
Kokain-HCl gesamt*	-1,25 (-1,57; -0,92)	-269,32 (-505,12; -252,53)	8,67 (0; 8,97)
Heroinbase 38% Ziegel	0,17 (0,12; 0,23)	-81,69 (-102,75; -55,33)	7,30 (6,60; 7,37)
Heroinbase 38% dicht	0,25 (0,23; 0,29)	-306,42 (-313,09; -298,74)	7,13 (7,08; 7,18)
Heroinbase 38% locker	0,13 (0,12; 0,15)	-383,54 (-408,75; -380,81)	3,50 (1,45; 4,04)
Heroinbase 20% dicht	0,45 (0,44; 0,50)	-387,10 (-399,96; -381,34)	3,37 (2,93; 3,88)
Heroinbase gesamt**	0,23 (0,12; 0,50)	-346,99 (-408,75; -55,33)	5,32 (1,45; 7,37)
Haschisch	-3,64 (-3,67; -3,53)	-21,23 (-31,85; -17,14)	10,33 (10,28; 10,34)
Paracetamol/Koffein	0,52 (0,50; 0,53)	-300,46 (-303,55; -297,08)	6,69 (6,65; 7,75)
Wasser	-0,47 (-0,47; -0,46)	-6,15 (-7,36; -5,17)	8,0 (8,0; 8,01)
*bezogen auf alle 30 gemessenen Schichten			
**bezogen auf alle 40 gemessenen Schichten			

3.1.2.2 In-situ-Ergebnisse der experimentellen Packs am Schweinmodell

Die gewichteten Aufnahmen waren wegen der Artefaktbildung nur eingeschränkt beurteilbar. Aus diesem Grund sind nur einige Proben exemplarisch dargestellt.

In den Aufnahmen mit Gewichtung von Kokain-HCl zeigten die Kokainproben ein hyperdenses Verhalten. Gleiches traf auch auf den Heroinziegel und die Haschischprobe zu. Die übrigen Heroinproben hingegen waren isodens zum umliegenden Gewebe (*Abbildung 25*). In den heroinbetonten Aufnahmen zeigten die Kokaine ebenso wie der Heroinziegel und die Haschischprobe ein hypodenses Muster. Die restlichen Heroinproben dagegen erschienen isodens zum umgebenden Gewebe (*Abbildung 26*).

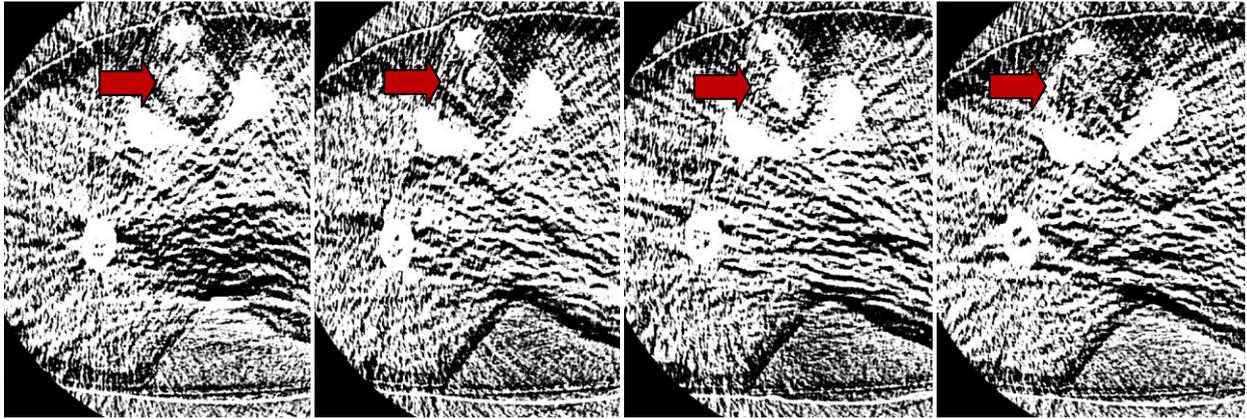


Abbildung 25: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Proben Kokain-HCl 78% dicht, Heroinbase 38% Ziegel und Haschisch sowie isodenser Darstellung der Probe Heroinbase 38% dicht (von links nach rechts) und deutlicher Artefaktbildung durch das Beckenskelett bei rektaler Probenlokalisierung.

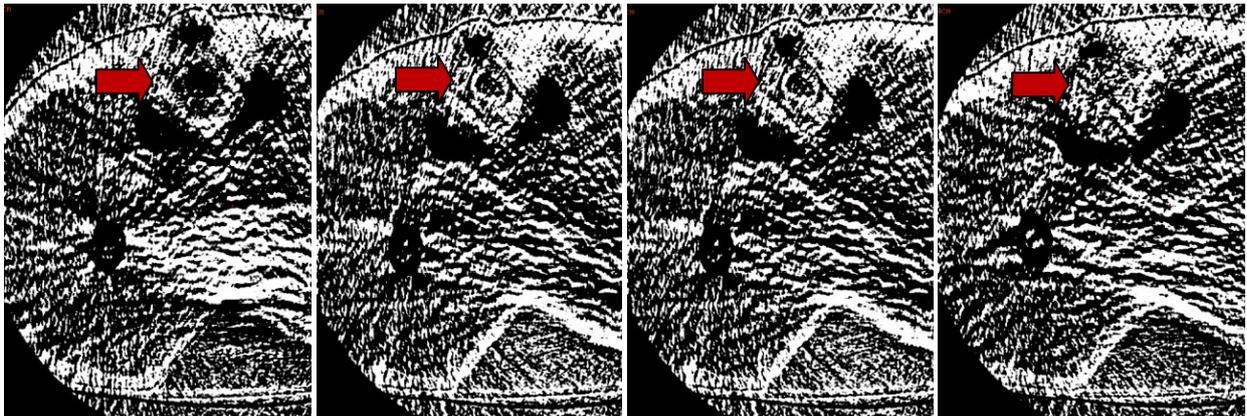


Abbildung 26: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hypodenser Darstellung der Proben Kokain-HCl 78% dicht, Heroinbase 38% Ziegel und Haschisch sowie isodenser Darstellung der Probe Heroinbase 38% dicht (von links nach rechts) und deutlicher Artefaktbildung durch das Beckenskelett bei rektaler Probenlokalisierung.

Die Kurvenverläufe aller Substanzen waren negativ. Den niedrigsten Steigungsfaktor zeigte Haschisch mit $-2,63 \text{ HU/keV}$, gefolgt von Kokain-HCl mit $-1,90 \text{ HU/keV}$. Das Heroin sowie die Streckmittel wiesen mit $-0,51 \text{ HU/keV}$ bzw. $-0,18 \text{ HU/keV}$ nur schwach negative Steigungsfaktoren auf (Tabelle 8). Im Vergleich zum Ex-vivo-Versuch waren die Steigungsfaktoren breiter gestreut und zeigten sowohl für Kokain als auch Heroin eine Abnahme, wobei Heroin nun ebenfalls fallende Kurvenverläufe aufwies. Lediglich die Steigungsfaktoren des Haschischs nahmen zu (Abbildung 27).

Die Dichtewerte waren allesamt negativ. Die niedrigsten Werte zeigte Heroin mit $-330,84 \text{ HU}$. Kokain-HCl sowie die Streckmittel wiesen etwas höhere Dichtewerte von $-246,50 \text{ HU}$ sowie

-269,04 HU auf. Lediglich Haschisch war mit -26,12 HU im Vergleich schwach negativ (Tabelle 8). Relevante Unterschiede zum Ex-vivo-Versuch waren nicht zu verzeichnen (Abbildung 28).

Die Kokain-HCl-Proben sowie das Haschisch zeigten mit Ordnungszahlen von 8,25 sowie 9,60 höhere Werte als die Referenzprobe Wasser (7,66). Die Heroinproben sowie die Streckmittel hingegen wiesen mit 5,50 sowie 6,96 niedrigere Ordnungszahlen auf. Die 78%ige Kokainprobe mit einer Ordnungszahl von 0,32 sowie der Heroinziegel mit 8,01 zeigten Abweichungen (Tabelle 8). Diese Beobachtungen deckten sich mit den Ex-vivo-Analysen (Abbildung 29).

Tabelle 8: Übersicht über die Ergebnisse der experimentellen Packs am Schweinmodell in-situ mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.

Probe	SF (HU/keV) Median (Range)	Dichte bei 70 keV (HU) Median (Range)	Z_{eff} Median (Range)
Kokain-HCl 78% dicht	-1,92 (-2,04; -1,83)	-454,57 (-462,69; -447,45)	0,32 (0,21; 0,39)
Kokain-HCl 36% dicht	-2,04 (-2,10; -1,87)	-225,13 (-239,83; -221,90)	8,59 (8,08; 8,71)
Kokain-HCl 21% dicht	-1,35 (-1,46; -1,04)	-246,50 (-263,62; -239,32)	8,36 (7,81; 8,61)
Kokain-HCl gesamt*	-1,90 (-2,10; -1,04)	-246,50 (-462,69; -221,90)	8,25 (0,21; 8,71)
Heroinbase 38% Ziegel	-0,71 (-0,99; -0,61)	-90,13 (-323,60; -62,38)	8,01 (5,50; 8,32)
Heroinbase 38% dicht	-0,24 (-0,36; -0,13)	-278,06 (-280,20; -273,29)	6,92 (6,70; 7,21)
Heroinbase 38% locker	-0,41 (-0,49; -0,32)	-350,19 (-377,32; -338,96)	5,12 (3,54; 5,37)
Heroinbase 20% dicht	-0,59 (-0,75; -0,54)	-347,67 (-358,21; -338,07)	4,96 (4,31; 5,03)
Heroinbase gesamt**	-0,51 (-0,99; -0,13)	-330,84 (-377,32; -62,68)	5,50 (3,54; 8,32)
Haschisch	-2,63 (-2,76; -2,51)	-26,12 (-39,88; -17,46)	9,60 (9,54; 9,67)
Paracetamol/Koffein	-0,18 (-0,30; -0,11)	-269,04 (-272,40; -261,06)	6,96 (6,68; 7,17)
Wasser	-0,35 (-0,66; -0,26)	1,59 (-0,42; 4,58)	7,66 (7,56; 7,99)
*bezogen auf alle 30 gemessenen Schichten			
**bezogen auf alle 40 gemessenen Schichten			

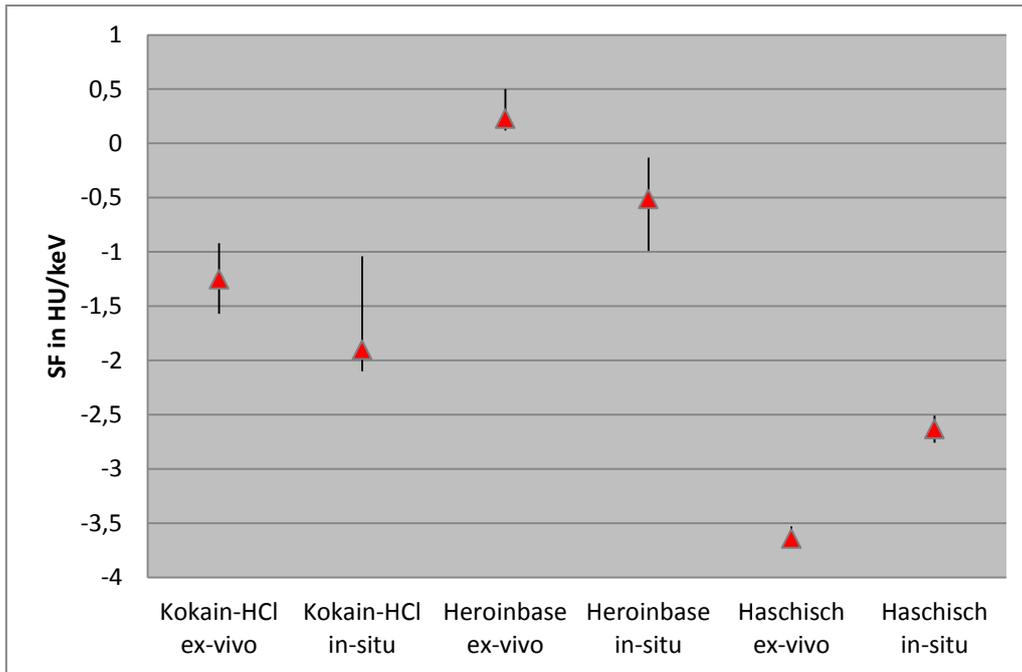


Abbildung 27: Vergleich der Steigungsfaktoren der experimentellen Kokain-HCl-, Heroin- und Haschischpacks ex-vivo und in-situ am Schweinemodell mit Darstellung des Median und des Range.

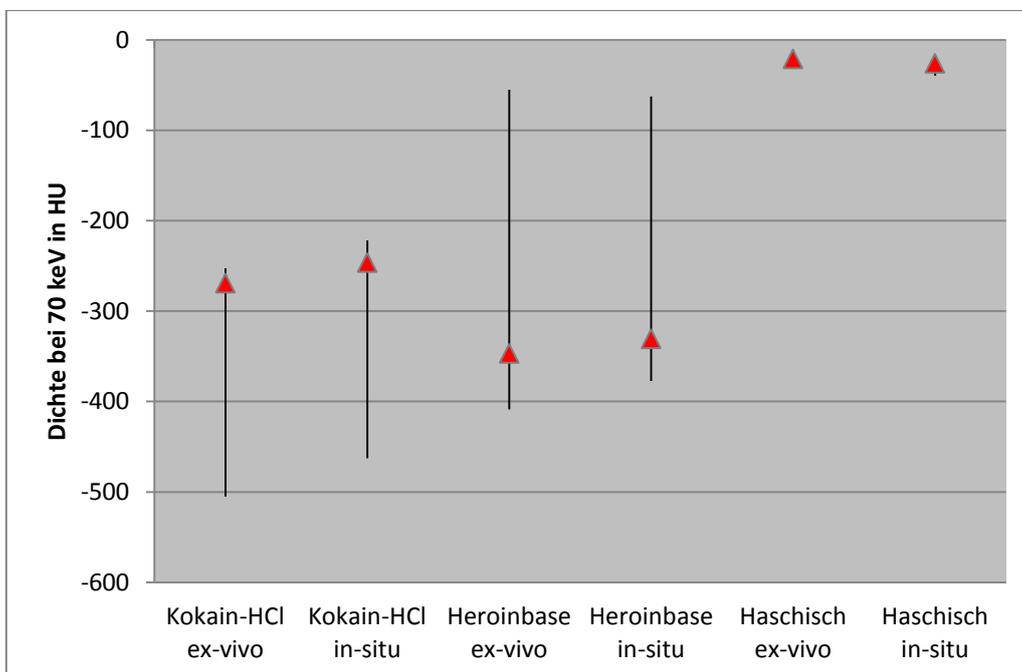


Abbildung 28: Vergleich der Dichtewerten der experimentellen Kokain-HCl-, Heroin- und Haschischpacks bei 70 keV ex-vivo und in-situ am Schweinemodell mit Darstellung des Median und des Range.

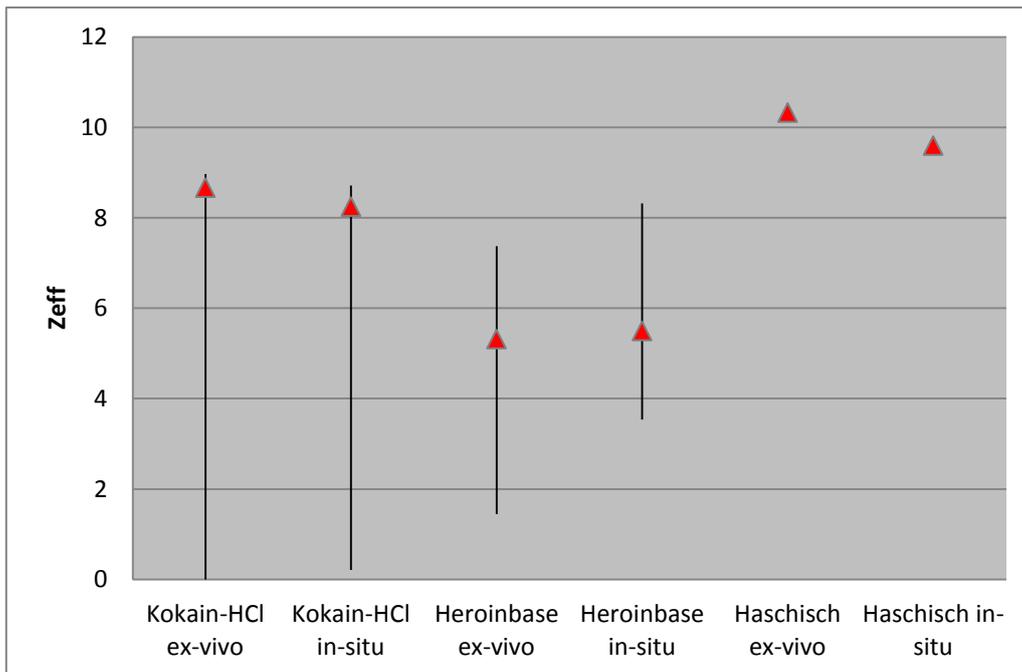


Abbildung 29: Vergleich der Ordnungszahlen der experimentellen Kokain-HCl-, Heroin- und Haschischpacks ex-vivo und in-situ am Schweinemodell mit Darstellung des Median und des Range.

Der $CTDI_{vol}$ betrug 12,72 mGy, die Scanlänge 42,8 cm, woraus sich ein DLP von 626,13 mGy*cm berechnete. Die daraus ermittelte E_{eff} lag bei 10,64 mSv.

3.1.3 Ergebnisse der Kasuistik aus dem Innenstadt-klinikum der Universität München

3.1.3.1 Ex-vivo-Ergebnisse der Originalpacks nach Defäkation

In den Aufnahmen mit Betonung von Kokain-HCl zeigten alle Kokain-HCl-Packs ein hyperdenses Verhalten. Lediglich die Kokainbasen erschienen hypodens (*Abbildung 31*). In den heroingewichteten Aufnahmen verhielten sich alle Kokain-HCl Packs hypodens. Die Kokainbasen hingegen erschienen hyperdens (*Abbildung 32*). Die wassergewichteten Aufnahmen erlaubten keine Differenzierung zwischen feuchten und trockenen Packs (*Abbildung 33*, *Abbildung 34*).

Die Anordnung der Päckchen ist in *Abbildung 30* dargestellt.

K feucht	K feucht	K feucht	Sondermischung	
K feucht	K feucht	K feucht	K feucht	K feucht
K feucht	K feucht	K feucht	K feucht	
K feucht	K feucht	K trocken	K trocken	K feucht
K feucht	K feucht	K feucht	K trocken	
K feucht	K feucht	K feucht	Base	K feucht
K feucht	K feucht	K feucht	K feucht	
K feucht	K feucht	K feucht	K feucht	K feucht
K feucht	K trocken	K trocken	K trocken	
K feucht	K feucht	K trocken	Base	K feucht
K feucht	K feucht	K feucht	Base	
K feucht	K trocken	Base	Base	
K feucht	K trocken	Base	Base	
K feucht	K feucht	Base	Base	
K feucht	K feucht	K feucht	K feucht	
K feucht	K trocken	K feucht	K feucht	
K feucht	K feucht	K feucht	K feucht	
K = Kokain-HCl; Base = Kokainbase				

Abbildung 30: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.

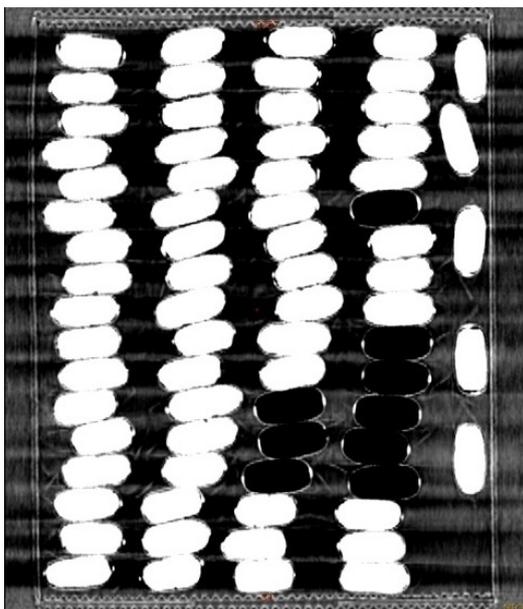


Abbildung 31: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Packs sowie hypodensere Darstellung der Kokainbasen unabhängig vom Päckchenzustand (feucht/trocken).

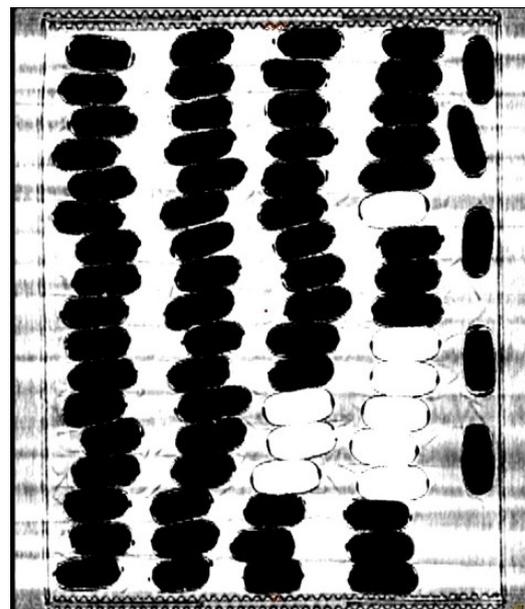


Abbildung 32: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-Basen und hypodensere Darstellung der Kokain-HCl-Packs unabhängig vom Päckchenzustand (feucht/trocken).

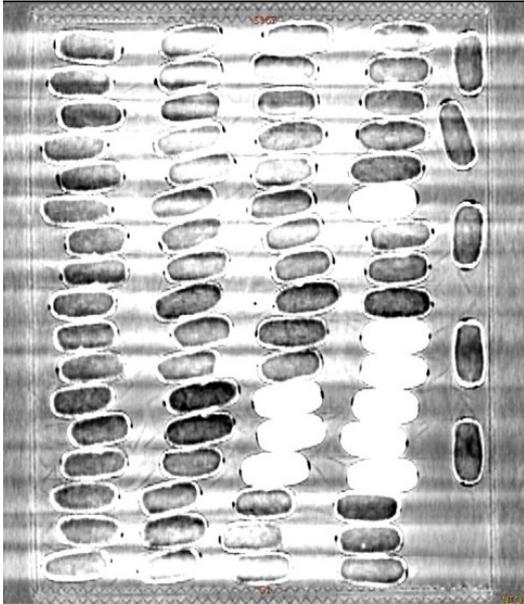


Abbildung 33: Wassergewichtete Einzelschicht mit Subtraktion von Kokain-HCl ohne Differenzierbarkeit zwischen feuchten und trockenen Päckchen. Hypodense Darstellung sowohl der feuchten als auch der trockenen Päckchen. Im direkten Vergleich stellen sich lediglich einzelne trockene Packs etwas hypodenser als die feuchten dar.

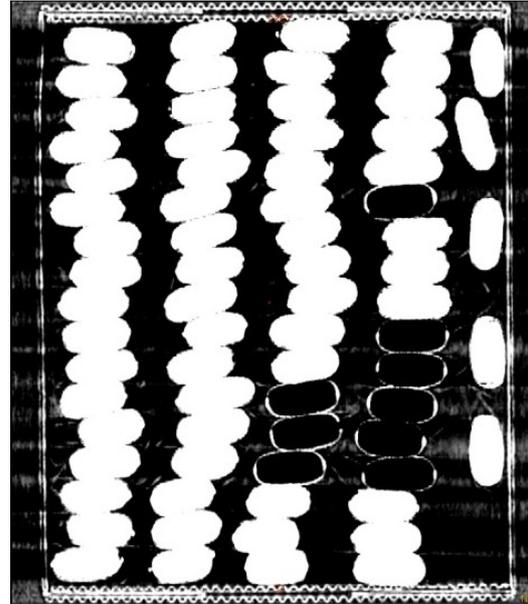


Abbildung 34: Wassergewichtete Einzelschicht mit Subtraktion von Heroin ohne Differenzierbarkeit zwischen feuchten und trockenen Päckchen. Hyperdense Darstellung sowohl der feuchten als auch der trockenen Päckchen.

Die Steigungsfaktoren aller Kokain-HCl-Packs waren negativ, wobei die 77%igen feuchten Packs mit $-2,78$ HU/keV eine gering negativere Steigung als die entsprechenden trockenen Packs mit $-2,50$ HU/keV aufwiesen. Die Steigung der Sondermischung betrug $-2,26$ HU/keV. Lediglich die Kokainbase zeigte mit einer Steigung von $1,78$ HU/keV eine positive Steigung (*Tabelle 9*).

Die HU-Werte der Kokain-HCl-Packs waren positiv, wobei hier ein Unterschied zwischen den trockenen und den feuchten Päckchen zu verzeichnen war. So betrug die Dichte der 77%igen, feuchten Packs $274,84$ HU, die Dichte der trockenen Packs gerade einmal $112,60$ HU. Die Dichte der Sondermischung war mit $235,01$ HU dazwischen angesiedelt. Lediglich die Kokainbasen wiesen mit $-6,41$ einen gering negativen HU-Wert auf (*Tabelle 9*).

Die Ordnungszahlen der Kokain-HCl-Packs waren höher als der Referenzwert von Wasser ($7,21 - 8,0$ in den bisherigen Analysen). Zwischen den 77%igen Packs war mit $9,32$ bzw.

9,37 für den feuchten bzw. trockenen Zustand kaum ein Unterschied zu verzeichnen. Die Sondermischung zeigte eine Ordnungszahl von 9,10. Lediglich die Ordnungszahl der Kokainbase war mit 5,03 deutlich niedriger (*Tabelle 9*).

Tabelle 9: Übersicht über die Ergebnisse der Originalpacks ex-vivo nach Defäkation mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.

Probe	SF (HU/keV) Median (Range)	Dichte bei 70 keV (HU) Median (Range)	Z_{eff} Median (Range)
Kokain-HCl 77% feucht*	-2,78 (-3,16; -2,25)	274,84 (220,06; 301,46)	9,32 (8,93; 9,51)
Kokain-HCl 77% trocken**	-2,50 (-2,91; -2,27)	112,60 (95,31; 152,94)	9,37 (9,10; 9,57)
Kokainbase 85%***	1,78 (1,60; 1,94)	-6,41 (-26,12; 34,21)	5,03 (4,63; 5,35)
Kokain-HCl 69% (Sondermischung)****	-2,26 (-2,31; -2,22)	235,01 (229,82; 242,47)	9,10 (9,08; 9,11)
*bezogen auf alle 530 gemessenen Schichten **bezogen auf alle 100 gemessenen Schichten ***bezogen auf alle 90 gemessenen Schichten ****bezogen auf alle 10 gemessenen Schichten			

3.1.3.2 In-vivo-Ergebnisse der Originalpacks am Patientenfall

In den Aufnahmen des Patienten war das komplette Abdomen einschließlich basaler Lungen- und proximaler Oberschenkelanteile abgebildet. Die Beurteilung erfolgte im Weichteilfenster. Zum Zeitpunkt des Scans waren alle Packs im Colon, Sigmoid bzw. Rektum lokalisiert. Im Magen oder Dünndarm dagegen waren keine Fremdkörper nachweisbar. Die Päckchen stellten sich als länglich ovale, ca. 2 cm x 4 cm große Strukturen dar.

Alle Kokain-HCl-Päckchen erschienen im Vergleich zum umliegenden Weichgewebe und umgebenden Darminhalt hyperdens, die Kokainbasen hingegen erschienen teils isodens.

Die Bildqualität im Bereich des kleinen Beckens war aufgrund der Artefaktbildung durch einen nach arterieller Punktion in der Leistenregion aufliegenden Sandsack deutlich vermindert und die Aussagekraft damit eingeschränkt (*Abbildung 35*). Im Becken waren u.a. die Sondermischung sowie mehrere feuchte und auch einzelne trockene Kokain-HCl-Packs lokalisiert. In dieser Region befanden sich keine Päckchen der Kokainbase.



Abbildung 35: DECT-Aufnahme des Patienten in der koronaren Rekonstruktion im Weichteilfenster mit Darstellung mehrerer Päckchen im Colon ascendens sowie im Bereich der linken Colonflexur. Hyperdense Darstellung der Kokain-HCl-Packs sowie isodense Darstellung der Kokainbase-Packs. Angrenzend an die linke Leiste bzw. den proximalen Oberschenkel ist noch partiell der nach arterieller Punktion aufliegende Sandsack erfasst, welcher, als homogene, hyperdense Struktur zur Darstellung kommt.

In den Aufnahmen mit Betonung von Kokain-HCl erschienen alle Kokain-HCl-Packs als hyperdense Strukturen. Die Kokainbasen hingegen zeigten sich hypodens (Abbildung 36). Die heroinbetonten Aufnahmen bildeten den Gegenpol hierzu. Die Kokainbasen zeigten nun ein hyperdenses, die Kokain-HCl-Packs hingegen ein hypodenses Muster (Abbildung 37). Auf die Generierung wassergewichteter Aufnahmen wurde aufgrund der eingeschränkten Beurteilbarkeit der entsprechenden Aufnahmen in den Ex-vivo-Analysen verzichtet.



Abbildung 36: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Päckchen sowie hypodenser Darstellung der Kokainbasen und ausgeprägten Artefakten ausgehend von einem Sandsack auf der linken Leiste.



Abbildung 37: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokainbasen und hypodenser Darstellung der Kokain-HCl-Päckchen sowie hypodenser Darstellung der Kokainbasen und ausgeprägten Artefakten ausgehend von einem Sandsack auf der linken Leiste.

Die Kurvenverläufe der 77%igen Kokain-HCl-Packs waren fallend, wobei zwischen den feuchten und den trockenen Packs mit Steigungsfaktoren von $-2,88 \text{ HU/keV}$ bzw. $-2,77 \text{ HU/keV}$ ein geringer Unterschied zu verzeichnen war. Das 69%ige Kokain-HCl-Pack zeigte hingegen einen steigenden Kurvenverlauf mit einem Faktor von $1,02 \text{ HU/keV}$. Ebenso war bei der Kokainbase ein positiver Steigungsfaktor von $0,88 \text{ HU/keV}$ zu verzeichnen (*Tabelle 10*). Abweichungen zum Ex-vivo-Versuch waren insbesondere bei der Sondernischung zu verzeichnen, welche nun einen positiven Steigungsfaktor zeigte. Zudem war ein größeres Intervall der Steigungsfaktoren zu beobachten (*Abbildung 38*).

Die Dichtewerte waren überwiegend im positiven Bereich angesiedelt. Die feuchten, 77%igen Kokain-HCl-Packs wiesen mit $259,40 \text{ HU}$ eine höhere Dichte als die entsprechenden trockenen Packs mit $118,36 \text{ HU}$ auf. Im Vergleich eine hohe Dichte mit $234,72 \text{ HU}$ wurde auch bei der Sondernischung ermittelt. Mit $12,13 \text{ HU}$ zeigte die Kokainbase lediglich schwach positive Dichtewerte (*Tabelle 10*). Diskrepanzen zum Ex-vivo-Versuch zeigten sich nicht (*Abbildung 39*).

Die 77%igen Kokainpacks zeigten mit einer Ordnungszahl von 9,40 bei den feuchten sowie 9,56 bei den trockenen Packs höhere Werte als Wasser. Die Sondermischung mit 6,3 sowie die Basen mit 6,51 hingegen wiesen niedrigere Ordnungszahlen auf (*Tabelle 10*). Im Vergleich zu den extrakorporalen Analysen zeigten sowohl die Kokainbasen als auch die Sondermischung Abweichungen durch eine geringfügig höhere bzw. eine niedrigere Ordnungszahl. Zudem war insbesondere bei den feuchten Kokain-HCl-Packs eine größere Spannweite bzgl. der Ordnungszahlen zu verzeichnen (*Abbildung 40*).

Tabelle 10: Übersicht über die Ergebnisse der Originalpacks am Patientenfall in-vivo mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.

Probe	SF (HU/keV) Median (Range)	Dichte bei 70 keV (HU) Median (Range)	Z _{eff} Median (Range)
Kokain-HCl 77% feucht*	-2,88 (-3,32; -0,31)	259,40 (235,61; 287,79)	9,40 (6,45; 9,62)
Kokain-HCl 77% trocken**	-2,77 (-3,23; -2,00)	118,36 (96,50; 154,31)	9,56 (8,99; 9,73)
Kokainbase 85%***	0,88 (0,66; 1,01)	12,13 (-19,32; 45,46)	6,51 (6,25; 6,80)
Kokain-HCl 69% (Sondermischung)	1,02	234,72	6,30

*bezogen auf alle 24 Packs
 ** bezogen auf alle 10 Packs
 ***bezogen auf alle 9 Packs

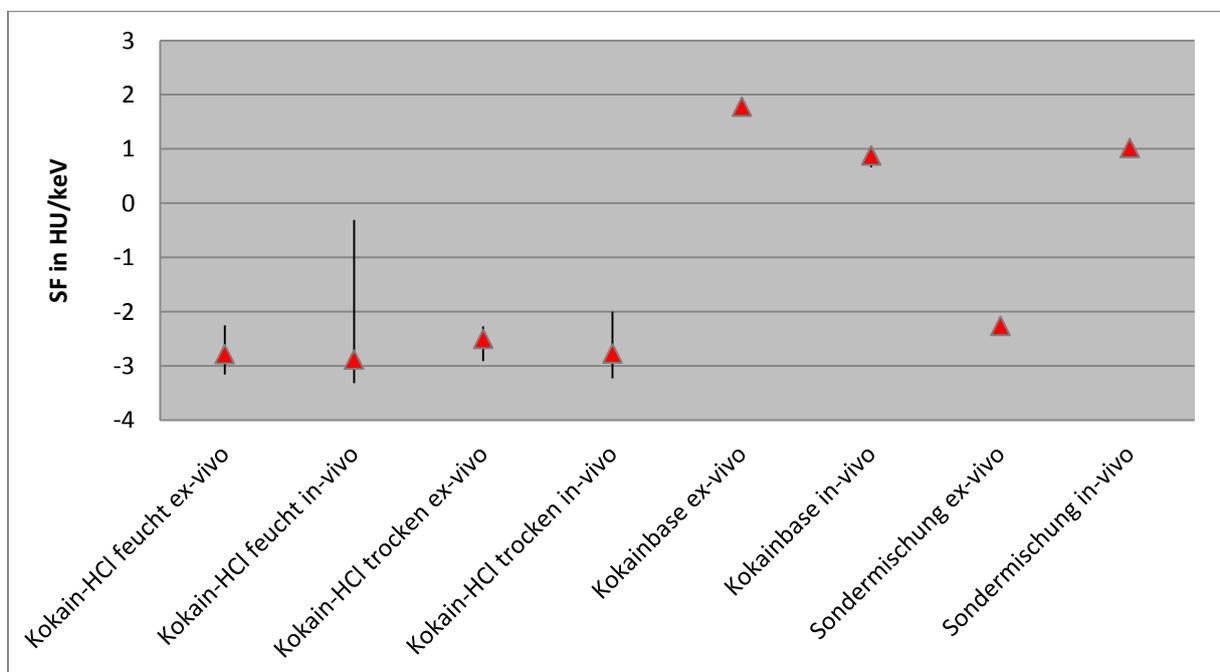


Abbildung 38: Vergleich der Steigungsfaktoren der Originalpacks ex-vivo nach Defäkation sowie der Originalpacks in-vivo am Patientenfall mit Darstellung des Median und des Range.

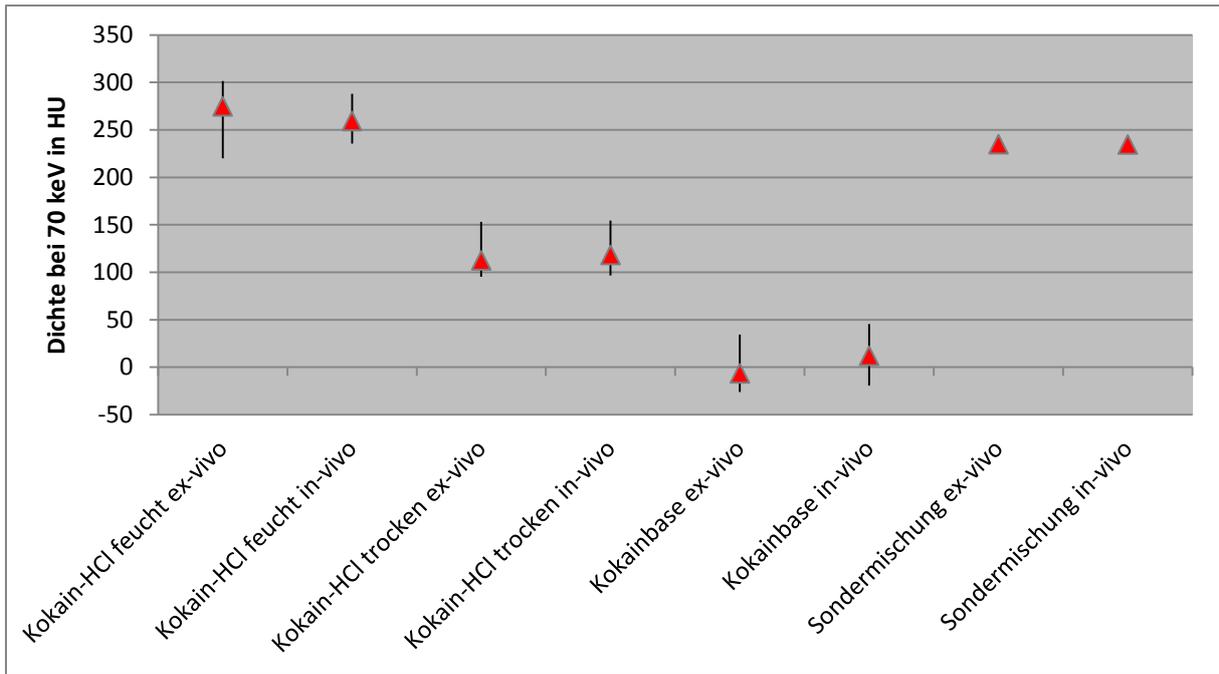


Abbildung 39: Vergleich der Dichtewerte der Originalpacks bei 70 keV ex-vivo nach Defäkation sowie der Originalpacks in-vivo am Patientenfall mit Darstellung des Median und des Range.

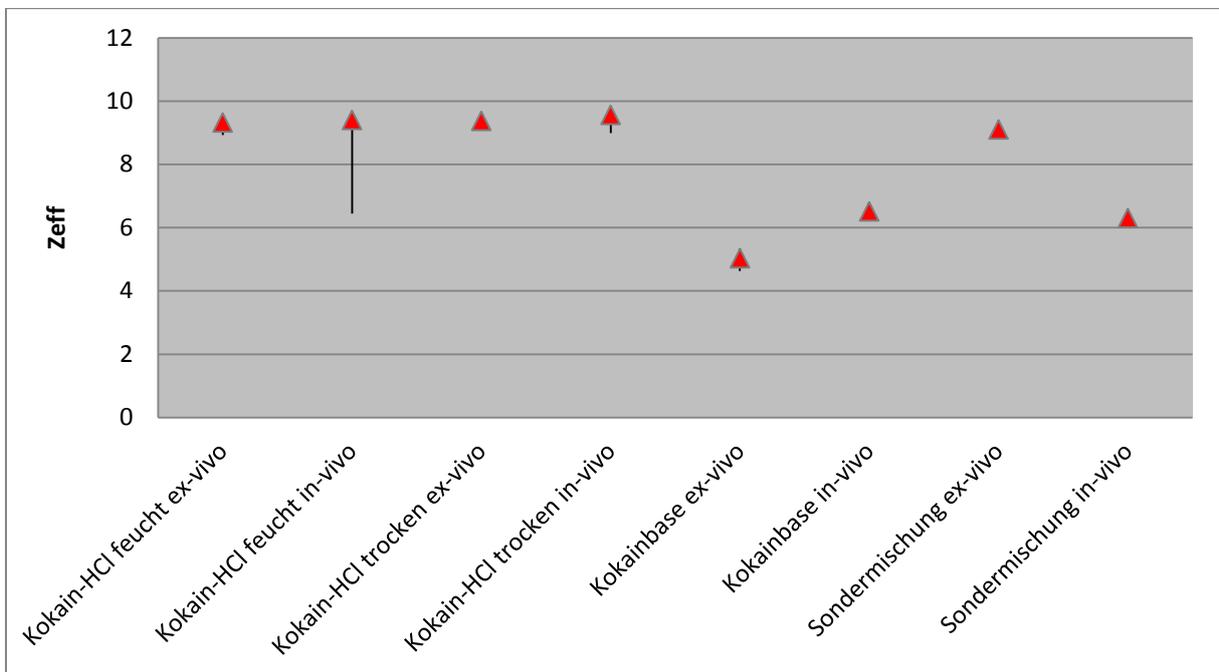


Abbildung 40: Vergleich der Ordnungszahlen der Originalpacks ex-vivo nach Defäkation sowie der Originalpacks in-vivo am Patientenfall mit Darstellung des Median und des Range.

Der $CTDI_{vol}$ betrug 12,72 mGy, die Scanlänge 52,25 cm, woraus ein DLP von 746,97 mGy*cm ermittelt wurde. Als Parameter für die Strahlenbelastung errechnete sich eine E_{eff} von 12,79 mSv.

3.2 Ergebnisse der Detektion der Originalpacks mittels Dual-Energy-Computertomographie – In-vivo-Ergebnisse von Stuhlanalysen am Patientenfall

Der Darminhalt stellte sich weder in den kokaingewichteten noch in den heroingewichteten Aufnahmen hyperdens sondern zum umgebenden Weichgewebe stets isodens dar (Abbildung 36, Abbildung 37 unter Gliederungspunkt 3.1.3.2).

Der Kurvenverlauf der Stuhlanalysen war mit einem Steigungsfaktor von -0,14 schwach fallend. Der Dichtewert war mit 6,70 HU geringfügig positiv, die Ordnungszahl mit 7,67 nahe dem Referenzwert von Wasser angesiedelt (Tabelle 11).

Tabelle 11: Übersicht über die Ergebnisse der Stuhlanalysen am Patientenfall in-vivo mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.

Probe	SF (HU/keV) Median (Range)	Dichte bei 70 keV (HU) Median (Range)	Z_{eff} Median (Range)
Stuhl*	-0,14 (-1,29; 0,12)	6,70 (-19,23; 34,64)	7,67 (7,38; 8,45)
<i>*bezogen auf alle 20 gemessenen Abschnitte</i>			

4 Diskussion

4.1 Differenzierung von Substanzen mittels Dual-Energy-Computertomographie

4.1.1 Kompressionsversuch – eine Analyse der Grundlagen zur Stoffdifferenzierung mittels Dual-Energy-Computertomographie

Die Verwendung von DE im Kontext Body-Packing stellt bis dato im Wesentlichen wissenschaftliches Neuland dar. In Annahme einer Abhängigkeit hiervon wurden zunächst Grundlagen und Grundprinzipien unter experimentellen Bedingungen im Rahmen eines Kompressionsversuchs beleuchtet.

In unkomprimierter Form zeigte sich ein inhomogenes Bild mit wechselnden Bereichen bröckeliger und pulverartiger Substanz, weshalb die Ergebnisse kritisch zu bewerten sind, zumal heutzutage bei der Mehrzahl der Originalpacks beim Body-Packer aufgrund der mechanischen Fertigung ein Mindestmaß an Kompression zu erwarten ist^{7,14,18,22}. Dennoch kristallisierten sich bereits erste Tendenzen heraus, welche in den Erläuterungen zu den Ergebnissen nach Kompression der Proben ausführlich diskutiert werden.

In komprimierter Form erschienen die Substanzen deutlich homogener. Die gewichteten Aufnahmen waren gut zu beurteilen. Auffälligkeiten zeigten sich bei der Kokainbase, welche ein heroinähnliches Verhalten aufwies. Bei den in Body-Packs enthaltenen Substanzen handelt es sich bei Kokain i. d. R. um Kokainhydrochlorid und weitaus seltener um die freie Base, auch Crack genannt^{98,147}. Bei dem geschmuggelten Heroin handelt es sich für gewöhnlich um die freie Base^{51,86,98,147-150}. Ob allein das Vorliegen des Kokains als Salz oder Base für das gegensätzliche Verhalten ursächlich ist, bleibt unklar. Die zur Kokainbase zugesetzten Streckmittel konnten durch die Behörden nicht näher eingegrenzt werden. Ein Vergleich mit der Literatur ist nicht möglich. Bisher kommen gewichtete Aufnahmen sowie Subtraktionsaufnahmen beispielsweise zur Beurteilung von Schädelstrukturen erfolgreich zur Anwendung. Durch die Subtraktion von Jod (Kontrastmittel) werden virtuelle Nativaufnahmen erzeugt. Durch die Subtraktion von Calcium (Knochen), dem sogenannten „bone removal“, wird die Darstellung von intrakraniell Weichgewebe optimiert^{110,122,130,132-134,151,152}. Die Verwendung gewichteter oder subtraktionsbasierter Aufnahmen im Kontext Drogenschmuggel ist jedoch bis dato neu.

Die spektralen Kurven zeigten unabhängig vom Inhalt ein streng monotonen Verhalten. Diese Beobachtung deckt sich mit der Literatur. Auch hier sind sowohl für organische als auch anorganische Substanzen bis auf wenige Ausnahmen monotone Kurvenverläufe zu verzeichnen^{104,126,128,130,134,152}. Auffällig ist zudem, dass sich die Kurven im niedrigerenergetischen Bereich aufgrund der stärkeren Energieabhängigkeit stets steiler als im weiteren Verlauf dar-

stellen ^{126,132}. Die spektralen Kurven der hier analysierten Suchtmittel zeigten einen fallenden Verlauf mit entsprechend negativen Steigungsfaktoren bei den Kokain-HCl-Proben und ansteigende Verläufe sowie positive Steigungsfaktoren bei den Heroinproben und der Kokainbase. Auch Leschka et al. analysierten in ihren Versuchen das spektrale Verhalten von Heroin und Kokain, welches sich mit den Beobachtungen in dieser Arbeit deckt ⁵⁶. Im klinischen Setting werden spektrale Kurven bisher verhalten verwendet. Körpergewebe besteht hauptsächlich aus Elementen niedriger Ordnung und zeigt damit lediglich wenig spektrale Abhängigkeit ¹⁰⁴. Ein stärkeres spektrales Verhalten ist bei Nierensteinen, Gallensteinen und jodverstärkten Strukturen bei Kontrastmittelgabe zu beobachten ^{108,109,126,128,153,154}. Gerade Letzteres fungiert oftmals als wichtige Zusatzinformation bei der Differenzierung zwischen benignen und malignen Läsionen. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Mehrzahl der bisher analysierten Gewebe oder Substanzen fallende Kurvenverläufe aufweist. Lediglich Fettgewebe zeichnet sich durch einen Anstieg aus (*Tabelle 12*) ^{104,121,151,153}.

Tabelle 12: Übersicht über die in der Literatur beschriebenen Verläufe spektraler Kurven verschiedener Substanzen, Körperflüssigkeiten und Gewebearten.

Autor	Stoff	Steigungsverhalten
Grimm et al. ¹⁴²	Kokain	fallend
	Heroin	steigend
Leschka et al. ⁵⁶	Kokain	fallend
	Heroin	steigend
Platon et al. ⁴⁴	Kokain	fallend
Schmitt et al. ¹⁰⁴	Plasma	fallend
	Erythrozyt	fallend
	Fett	steigend
	Leber	fallend
	Muskel	fallend
Zachrisson et al. ¹²¹	Thrombus (arteriell, venös)	fallend
Matsumoto et al. ¹²⁶	Jod	fallend
Graser et al. ¹⁰⁷	Nierensteine	fallend
Mahnken et al. ¹³⁶	Blut	fallend
	Pus	fallend
	Galle	fallend
	Urin	fallend
Landry et al. ¹⁵⁵	Gehirn	fallend
	Brust	steigend
	Leber	fallend

Neben der Substanzart selbst lassen sich bzgl. der spektralen Kurven jedoch noch weitere Einflussfaktoren ableiten.

Im Vergleich zu dem Versuch vor Kompression zeigten alle Kurven einen steileren Verlauf, was eine Abhängigkeit des Steigungsfaktors von der Kompression vermuten lässt. Bedingt ist dieser Aspekt möglicherweise durch das Entweichen von Luft, einer energieunabhängigen Substanz. Leschka et al. postulieren, dass der DEI, eine andere Darstellungsweise spektralen Verhaltens, als kompressionsunabhängiger Parameter fungiert, doch handelt es sich hierbei lediglich um eine gedankliche Folgerung ohne experimentellen Hintergrund. Es wurden ausschließlich Päckchen etwa identischer Kompression analysiert. Der DEI bei verschiedenen Kompressionen wurde nicht experimentell überprüft ⁵⁶.

Neben der Kompression scheint auch die Konzentration/Verwendung von Strecksubstanzen einen Einfluss auf den Kurvenverlauf auszuüben. Trotz identischer Kompression zeigten die Substanzen innerhalb einer Gruppe eine Varianz der Steigungsfaktoren. Die untersuchten Streckmittel wiesen positive Steigungsfaktoren auf, was bei Abnahme der Kokainkonzentration auf einen Anstieg der Steigungsfaktoren bzw. bei Abnahme der Heroinkonzentration und dadurch eine Zunahme der Streckmittelkonzentration auf eine Stagnation oder Zunahme der Steigungsfaktoren schließen lässt. Diese Beobachtungen finden sich auch bei Leschka et al. sowie Platon et al. wieder. Die dort verwendeten Substanzen decken sich teilweise mit den hier vorliegenden Streckmitteln und auch die dadurch erzielten Suchtmittelkonzentrationen sind teils ähnlich ^{44,56}. Sehr variable Streckungen sind häufig, sodass in einer größeren Probengruppe Abweichungen denkbar sind ^{4,14,48,50-55}. Die spektrale Kurve spiegelt nicht nur die Hauptsubstanz sondern die Substanzzusammensetzung und damit auch die Streckmittel wider. Konzentrationsabschätzungen sind somit möglich, wenn die Stoffzusammensetzung bekannt ist. Bereits bekannte Beispiele hierfür sind die Schätzung des Jodgehalts kontrastmittelverstärkter Strukturen oder die Berechnung des Eisengehalts der Leber bei Hämochromatose ^{154,156,157}.

Die HU-Werte der hier analysierten Packs decken sich teils mit den Beobachtungen von Pache et al. und Mauerer et al. bei Originalpacks sowie den experimentell gefertigten Päckchen von Leschka et al. (*Tabelle 13*) ^{50,51,56}. Die HU-Werte der Heroinproben waren deutlich niedriger als bei den mechanisch gefertigten Päckchen bei Yang et al. ¹⁷. Wie die spektralen Kurven so zeigen auch die HU-Werte neben der verwendeten Energie eine Abhängigkeit von Kompression und Streckmitteln. Es waren sowohl Diskrepanzen bzgl. der HU-Werte vor und nach Kompression als auch bei identischer Kompression und annähernd gleicher Kokainkonzentration bei Verwendung unterschiedlicher Streckmittel bzw. unterschiedlicher Kokainkonzentration und Verwendung einheitlicher Streckmittel zu verzeichnen. Die Wechselwir-

kung zwischen den HU-Werten und unterschiedlichen Einflussfaktoren wurde bereits ausführlich in der Literatur diskutiert und wird speziell im Kontext Body-Packing ausführlich in einer weiteren Dissertation dieser Arbeitsgruppe von Katarina Zöfelt analysiert ^{4,18,28,50,51,144}. Neben den Sucht- sowie den Streckmitteln wurden zudem eine Wasser- sowie eine Luftprobe analysiert. In der Literatur werden hierfür Dichtewerte von ca. 0 HU sowie -1000 HU angegeben, was sich in durchgeführten Versuchen im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigte ¹¹⁴.

Tabelle 13: Übersicht über die Spannweite der in der Literatur beschriebenen CT-Dichtewerte in HU von Kokain-HCl und Heroin.

Autor	Heroin	Kokain
Grimm et al. ¹⁴²	-212 – -178 HU	-80 – 159 HU
Wackerle et al. ⁴	-520 HU	-219 HU
Yang et al. ¹⁷	-40 – 100 HU	keine Angaben
Maurer et al. ⁵⁰	keine Angaben	-135 – 247 HU
Pache et al. ⁵¹	keine Angaben	17 – 154 HU
Leschka et al. ⁵⁶	-223 – -72 HU	-93 – 54 HU
Israelit et al. ¹⁵⁸	keine Angaben	200 HU
Schmidt et al. ⁵	keine Angaben	123 – 226 HU
Bulakci et al. ³²	700 – 960 HU	-50 – 310 HU
Platon et al. ⁴⁴	keine Angaben	105 HU

Bei der Analyse der Ordnungszahlen diente als Referenzsubstanz Wasser, welches unabhängig von der angelegten Röhrenspannung stets 0 HU aufweist und sich in der Literatur durch eine atomare Ordnungszahl von etwa 7,73 auszeichnet ^{104,113,114}. Höhere Ordnungszahlen von 9,95 zeigten sich bei Kokain-HCl und niedrigere Werte von 6,35 bzw. 5,67 bei Heroin und der Kokainbase. Auch Platon et al. erzielten mit 8,71 einen höheren Wert für Kokain-HCl als für Wasser ⁴⁴. Die in dieser Arbeit analysierten Substanzen wiesen allesamt im Vergleich zu jod- oder bariumhaltigem Kontrastmittel (atomare Ordnungszahlen 53 bzw. 56) oder Metallen wie Blei (atomare Ordnungszahl 82) niedrige atomare Ordnungszahlen bis ca. 10,05 auf ¹⁵⁹. Diese Beobachtung deckt sich mit den chemischen Grundlagen. Alle untersuchten Stoffe sind mit Ausnahme des Schwefels, des Chlorids sowie des Kaliums (atomare Ordnungszahlen 16, 17 bzw. 19) aus Elementen niedriger Ordnung (atomare Ordnungszahlen 1 – 8) aufgebaut ¹⁵⁹⁻¹⁷¹. Gleiches gilt für organische Gewebe wie Muskel, Fett oder Sehnen ¹⁵¹. Beispiele für in der Literatur beschriebene effektive Ordnungszahlen verschiedener Gewebe und Körperflüssigkeiten sind in *Tabelle 14* aufgelistet. Die Differenzierung anhand atomarer Ordnungszahlen befindet sich bisher noch im Anfangsstadium, dennoch sind be-

reits erste positive Ergebnisse zu verbuchen, beispielsweise in der Klassifizierung von Schilddrüsenknoten, in der Differenzierung von Körperflüssigkeiten, der Einordnung von Nierensteinen oder der Differenzierung von Hirntumoren^{136,154,172-174}. Auch die Genauigkeit dieser Modalität wurde bereits positiv validiert¹³⁵. Warum für die 78%ige Kokain-HCl-Probe vor Kompression dennoch in allen zehn Messungen kein Wert für die atomare Ordnungszahl erzielt werden konnte, bleibt unklar.

Tabelle 14: Übersicht über die in der Literatur beschriebenen, auf der Basis von DE-Daten generierten, atomaren Ordnungszahlen verschiedener Substanzen, Körperflüssigkeiten und Gewebearten.

Autor	Stoff	Ordnungszahl
Landry et al. ^{155,175}	Wasser	7,73
	Lunge	7,24
	Knochen	11,90
	Muskulatur	7,59
	Fett	6,44
	Brust	6,93
	Leber	7,73
	Gehirn	7,20
Mahnken et al. ¹³⁶	Blut	7,58
	Pus	7,68
	Galle	7,63
	Urin	7,74
Platon et al. ⁴⁴	Kokain	8,71

Das spektrale Verhalten einer Substanz ist eng mit dem Einfluss des Photoeffekts und dementsprechend der atomaren Ordnungszahl sowie der verwendeten Energie verknüpft^{44,105,114,122,123}. Im Vergleich zur Referenzsubstanz Wasser resultieren höhere atomare Ordnungszahlen in fallenden Kurvenverläufen, niedrigere atomare Ordnungszahlen in steigenden Kurvenverläufen¹⁷⁶.

Dieser Zusammenhang bestätigt sich auch in den hier durchgeführten Analysen und bei der Literaturrecherche am Beispiel von Fettgewebe. Die effektive Ordnungszahl von 6,44 liegt unterhalb des Referenzwertes für Wassers, zugleich sind ansteigende Kurvenverläufe beschrieben. Gleiches gilt für Gewebe, welches wie Brustgewebe physiologisch reich an Fett ist¹⁵⁵. Wie die spektralen Kurven so zeigten auch die ermittelten atomaren Ordnungszahlen eine Abhängigkeit von Kompression und Streckmitteln. Durch Kompression resultierte ein Anstieg der Ordnungszahl der 21%igen Kokain-HCl-Probe von 1,41 auf 7,89. Trotz der Ver-

wendung gleicher Streckmittel variierte die Ordnungszahl zwischen 7,89 und 9,07 bei Kokain-HCl 21%, 36% und 78%. Auch in der Literatur finden sich Beispiele hierfür. So zeigen die atomaren Ordnungszahlen von Schilddrüsenknoten eine Abhängigkeit von der Menge des aufgenommenen jodhaltigen Kontrastmittels oder die atomaren Ordnungszahlen der Leber eine Abhängigkeit vom Ausprägungsgrad der Steatose ^{154,177}.

Das spektrale Verhalten einer Substanz ist ein Zusammenspiel aus deren atomarer Zusammensetzung sowie deren physikalischer Dichte. Als Einflussfaktoren ergeben sich im Kontext Body-Packing somit auch Stoffzusätze sowie die Höhe der physikalischen Kompression. Dennoch erscheint eine Differenzierung mittels DE ex-vivo möglich.

4.1.2 Schweinemodell – ein Vergleich ex-vivo/in-situ

Die Grundlagen des DE beim Body-Packer wurden bereits im Rahmen des Kompressionsversuchs erläutert, im klinischen Setting soll jedoch eine Analyse der Päckchen noch vor Ausscheidung, d.h. im Magen-Darm-Trakt erfolgen. Mögliche Einflussfaktoren und deren Auswirkungen wurden anhand des Schweinemodells analysiert.

Die Ergebnisse des Ex-vivo-Versuchs am Schweinemodell decken sich prinzipiell mit den Beobachtungen der Kompressionsanalyse hinsichtlich des Verhaltens der Substanzen in den gewichteten Aufnahmen, des Verlaufs der spektralen Kurven sowie der Verteilung der Ordnungszahlen in Bezug auf Wasser. Diskrepanzen der absoluten Zahlen wurzeln bei Verwendung teils identischer Inhalte in einer abweichenden Kompressionshöhe. Die Proben am Schweinemodell waren geringer komprimiert als während des Kompressionsversuchs. So resultierte daraus beispielsweise eine Differenz von ca. 300 HU bei der 36%igen Kokain-HCl-Probe.

Im Vergleich ex-vivo/in-situ kristallisierten sich hingegen teils Abweichungen heraus. Die gewichteten Aufnahmen waren aufgrund hohen Rauschens nicht objektiv beurteilbar. Die Steigungsfaktoren zeigten durchweg eine Abnahme mit nun zudem negativen Steigungsfaktoren bei Analyse der Heroinproben. Bei den HU-Werten sowie den Ordnungszahlen waren lediglich geringe, jedoch hinsichtlich der Kernaussage keine relevanten Unterschiede zu verzeichnen. Die Ordnungszahlen der Heroin-Proben waren auch in-situ geringer, die Ordnungszahlen der Kokain-HCl-Proben höher in Bezug auf Wasser. Die Vermutung, dass höhere atomare Ordnungszahlen im Vergleich zu Wasser mit fallenden Verläufen der spektralen Kurven einhergehen und umgekehrt, ließen sich am Schweinemodell jedoch nicht bestätigen ¹⁷⁶.

Daten zum Vergleich von Ex-vivo-/In-vivo-Scans bei Body-Packern aus dem klinischen Alltag fehlen in der Literatur. In einigen Studien wurde versucht, durch Cellulose oder nasse Handtücher eine In-vivo-Situation zu simulieren, doch fehlte der entsprechende Ex-vivo-Vergleich^{4,51,56}. Lediglich Taheri et al. beschäftigen sich in einem Nebenaspekt mit dieser Thematik. Ihre Beobachtungen stehen jedoch teils in Widerspruch zu den hier erzielten Ergebnissen. Taheri et al. untersuchten Body-Packer in der SECT, wobei keine Diskrepanzen zwischen intra- bzw. extrakorporal eruiert werden konnten. Anzumerken ist, dass nur ein einziges Pack ex-vivo analysiert wurde²⁸.

Es existieren verschiedene Ursachen, welche eine Diskrepanz zu den Ex-vivo-Beobachtungen erklären. Häufig werden in diesem Kontext sog. Aufhärungsartefakte erwähnt. Niederenergetische Strahlung und damit v.a. der Anteil der niedrigen keV-Stufe in der DECT wird beim Durchqueren von Gewebe herausgefiltert, was wiederum in einer Änderung der HU-Werte resultiert^{105,114,178}.

Die Ausprägung dieses Effekts steht in Zusammenhang mit der physikalischen Dichte, der effektiven Ordnungszahl sowie der Menge des umgebenden Gewebes. Das Becken stellt ein klassisches Beispiel für Aufhärungsartefakte dar. Bei Knochen handelt es sich um äußerst dichtes Körpergewebe mit HU-Werten von 500 bis 1500 HU und aufgrund seines hohen Calciumgehaltes vergleichsweise hoher Ordnungszahl (atomare Ordnungszahl 11,90)^{155,175,179}. Der Beckenring umgibt die Beckenorgane nahezu vollständig und absorbiert damit einen Großteil der niedrigenergetischen Strahlungsanteile^{178,180}. Die hier untersuchten Packs waren im Rektum dorsal der Symphyse bzw. ventral des Steißbeins lokalisiert und sind damit von dichten Knochenstrukturen umgeben. Prinzipiell resultieren Aufhärungsartefakte in einer Abnahme der Dichtewerte, dies gilt jedoch nur für zentrale Bereiche. Strukturen, die in unmittelbarer Nähe zum Absorber liegen, wie z.B. an den Beckenschaufeln, können auch in einer Zunahme der HU-Werte resultieren^{178,180,181}. Besonders ausgeprägt sind Aufhärungsartefakte im niedrigenergetischen Bereich, was insbesondere die Abweichungen bzgl. der Steigungsfaktoren erklärt¹⁷⁸.

Das Schweinemodell mit einem Gewicht von ca. 120 Kilogramm (kg) übertrifft bei Weitem die Maße eines Standardpatienten mit einem Körpergewicht von ca. 70 kg, sodass u.U. hierin aufgrund der Menge des umgebenden Gewebes eine weitere Ursache für die Diskrepanzen zwischen den In-situ-Ergebnissen und den Ex-vivo-Analysen sowie zu Taheri et al. zu sehen ist²⁸. Einen Schritt weiter legt diese Vermutung jedoch nahe, dass eine Diagnostik bei sehr adipösen Patienten kritisch zu bewerten ist¹²³.

Neben Aufhärungsartefakten existieren noch weitere physikalische Artefakte wie z.B. Teilvolumeneffekte, patienteninduzierte Artefakte wie z.B. künstliche Substanzen oder Bewe-

gungsartefakte und technikbasierte Artefakte aufgrund von Messfehlern oder Rekonstruktionsfehlern, welche jedoch in diesem Zusammenhang zu vernachlässigen oder nur schwer abzuschätzen sind ^{105,114}.

Eine Reduktion von Aufhärtungsartefakten durch die Erzeugung monochromatischer Bilder mittels DE im Vergleich zu polychromatischen Aufnahmen ist zwar theoretisch möglich, jedoch sind auch hier niedrigenergetische Aufnahmen störanfällig und der Einfluss von Menge und Art des umgebenden Gewebes lässt sich nicht vollständig ausschalten ^{126,134}.

Die bei den Kompressionsversuchen gewonnenen Erkenntnisse zum Verhalten von Body-Packs in der DECT lassen sich folglich nur bedingt auf den In-situ-Versuch am Schweinmodell übertragen. Die Anwendbarkeit am realen Fall ist somit kritisch zu bewerten.

4.1.3 Kasuistik aus dem Innenstadt-klinikum der Universität München – Analysen am realen Fall

Eine Verifizierung der bisher rein experimentell gewonnenen Erkenntnisse konnte anhand der Kasuistik erfolgen.

Die Aussagen der bisherigen experimentellen In-situ-Analysen bestätigten sich weitgehend, Abweichungen sind v.a. dem hohen Druck bei der mechanische Fertigung zuzuschreiben. Innerhalb der Packs ist i.d.R. eine inhomogene Kompressionsverteilung mit dichteren Arealen im Randbereich zu verzeichnen ^{17,51}. In den Analysen zeigte sich zwar eine geringe Variabilität zwischen den einzelnen Schichten, welche jedoch in Hinblick auf die Gesamtaussage unbedeutend erschien. Unabhängig von der analysierten Schicht wies Kokain-HCl fallende Kurvenverläufe und höhere Ordnungszahlen als Wasser auf. Die Kokainbasen zeigten das umgekehrte Verhalten.

Im Vergleich zum Schweinmodell waren die Diskrepanzen zwischen Patient und Ex-vivo-Analysen geringer ausgeprägt. Die gewichteten Aufnahmen waren gut zu beurteilen und deckten sich mit den experimentellen Beobachtungen. Relevante Unterschiede bei den analysierten Parametern zwischen ex-vivo und in-vivo bestanden nicht.

Auch im Patientenfall sind Aufhärtungsartefakte anzunehmen. Ausführliche Erläuterungen hierzu finden sich im Diskussionsteil zum Schweinmodell. Die geringe Ausprägung dürfte auf den schlanken Habitus des Patienten zurückzuführen sein. Die variierende Ausprägung ist vermutlich das Resultat der unterschiedlichen Päckchenlokalisationen im gesamten Magen-Darm-Trakt, wie sie beim Body-Packer üblich sind ^{8,17,28,30}. Die Menge und das Verhältnis von umgebendem Weichgewebe und Knochen variieren, sodass in unterschiedlichen Abschnitten des Gastrointestinaltraktes unterschiedliche Ausprägungen von

Aufhärungsartefakten denkbar sind. Der Einfluss des Effekts auf die einzelnen Päckchen ist in der Kasuistik nur schwer abzuschätzen, da die Zuordnung zu den entsprechenden Ex-vivo-Packs nicht möglich ist. Auch in der Literatur ist ein Datenmangel zu verzeichnen, da lediglich Ex-vivo- oder In-vivo-Analysen vorliegen oder wie bei Taheri et al. die Lokalisation der entsprechenden Packs im Gastrointestinaltrakt unbekannt ist ^{28,50,51}.

Eine Ausnahmesituation stellte der aufliegende Sandsack dar. Diese Störvariable präsentierte sich in den Aufnahmen sehr dicht und führte zu einer ausgeprägten Artefaktbildung. Dies zeigte sich deutlich in den erhobenen Parametern im Beckenbereich insbesondere an der Sondermischung und teils auch an den feuchten Kokain-HCl-Packs. Die Sondermischung wies anders als ex-vivo einen steigenden Kurvenverlauf und eine atomare Ordnungszahl kleiner der von Wasser auf. Bei den feuchten Kokain-HCl-Packs zeigten einzelne Packs im Becken sogar Steigungsfaktoren > -1 HU/keV und atomare Ordnungszahlen < 7 . Inwieweit jedoch noch andere Päckchen außerhalb des Beckens z.B. im Colon transversum betroffen waren, lässt sich nur schwer beurteilen. Grundsätzlich gilt es, Fremdmaterial sowie nicht untersuchungsrelevante Körperbereiche aus dem Scanfeld zu entfernen. Für eine Schnittbildgebung des Abdomens ist hier speziell die Überkopflagerung beider Arme vorteilhaft ¹¹³. Um weiterer Artefaktbildung durch Bewegung vorzubeugen, werden neben Thoraxaufnahmen auch Aufnahmen des Abdomens in einer Atempause nach tiefer Inspiration angefertigt ^{114,182}. Eine rege Darmmotilität, welche bei MRT-Untersuchungen des Abdomens einen limitierenden Faktor darstellen kann, ist hier aufgrund der kurzen Untersuchungsdauer zu vernachlässigen, zumal da der Body-Packer aufgrund der Einnahme von Spasmolytika ohnehin häufig zu Obstipation neigt ^{18,183}.

Die radiologische Präsentation defekter Packs im Kontext Body-Packing wurde bisher kaum thematisiert, obwohl die Kenntnis der Anzahl und Lokalisation möglicherweise eine wertvolle Zusatzinformation bzgl. eines chirurgischen Vorgehens bieten kann. Die Möglichkeit zur Analyse defekter Packs bot sich im Rahmen der Kasuistik.

Zunächst ist bzgl. des Päckchenzustandes eine Unterscheidung vorzunehmen. Eine Ruptur ist als größerer Defekt zu verstehen. Das Päckchen gerät außer Form oder besteht möglicherweise sogar aus mehreren Teilen und ist somit als solches intraabdominal eventuell schwer zu identifizieren ³⁷. Bei einer Leckage hingegen handelt es sich um einen kleinen Defekt, z.B. ein winziges Loch oder eine permeable Hülle ¹⁸⁴. Das Päckchen ist weiterhin als solches zu identifizieren, dennoch entsteht ein Austausch mit der Umgebung und Suchtmittel gelangt frei. Zeichen für ein defektes Päckchen können beispielsweise eine Zunahme der Dichte des angrenzenden Darminhalts, ein inkomplettes air-ring-sign, eine Luftsichel außerhalb des Packs oder eine Veränderung der äußeren Form sein ^{13,37,82,158,185,186}. Teile von Hüllmaterial wurden in dieser Kasuistik nicht detektiert, sodass die feuchten, 77%igen Koka-

in-HCl-Päckchen bei identischem Inhalt im Vergleich zu den 77%igen, trockenen Kokain-HCl-Päckchen mutmaßlich bedingt durch eine Leckage und damit für die Intoxikationssymptome des Patienten ursächlich sind. Von den soeben beschriebenen Zeichen eines Päckchendefekts war keines nachweisbar.

Die wassergewichteten Aufnahmen mit Subtraktion der Grundsubstanz Kokain-HCl waren nur bedingt verwertbar. Die trockenen Kokain-HCl-Packs zeigten sich tendenziell hypodens, was jedoch nicht für alle Packs zutraf. Eine Abhängigkeit vom Wassergehalt zeichnete sich nicht ab. Teilweise waren jedoch Artefakte abzugrenzen, sodass mutmaßlich hier die Ursache liegen dürfte. Im klinischen Setting hingegen wurde beispielsweise die Darstellung von Knochenödemen durch die Subtraktion von Calcium als indirektes Zeichen für eine Wirbelkörperkompressionsfraktur bereits positiv validiert ^{187,188}.

Hinsichtlich der Steigungsfaktoren sowie der atomaren Ordnungszahlen waren zwischen trockenen und feuchten Packs keine relevanten Unterschiede zu verzeichnen.

Bzgl. der HU-Werte waren sowohl ex-vivo als auch in-vivo deutliche Diskrepanzen zwischen den trockenen und den feuchten Päckchen festzustellen. Hierbei waren Abweichungen von 100 HU oder mehr gegenüber den trockenen Packs zu verzeichnen, sodass sich die defekten Packs als hyperdense Strukturen darstellten. Möglicherweise ist hierfür die Verdrängung kleinster Luftpartikel durch Wasser ursächlich. Diese Beobachtung wurde in der Literatur bisher nicht beschrieben. Übermittelte HU-Werte beziehen sich bis dato vermutlich ausschließlich auf intakte Packs.

Auf die beiden 77%igen Kokain-HCl-Proben aus dem Kompressionsversuch ließen sich diese Beobachtungen aufgrund der pulverförmigen Aufarbeitung und dabei der Trocknung im Rahmen der Analysevorbereitung im Landeskriminalamt nicht übertragen. Es war zwischen der ursprünglich feuchten Probe und der aufbereiteten, trockenen Probe lediglich eine Differenz von ca. 30 - 40 HU zu verzeichnen.

Anhand der Kasuistik konnte aufgezeigt werden, dass eine Differenzierung der intrakorporalen Packs aufgrund geringerer Aufhärungsartefakte beim realen Patienten im Vergleich zum Schweinmodell mittels DECT möglich ist. Während zur Stoffdifferenzierung spektrales Verhalten ausschlaggebend erscheint, spielen in der Abgrenzung defekter Packs lediglich Abweichungen der HU-Werte sowie bisher beschriebene optische Zeichen eine Rolle.

4.2 Detektion der Originalpacks am Patientenfall mittels Dual-Energy-Computertomographie – ein Vergleich mit Stuhlanalysen

Wie eingangs bereits erwähnt, handelt es sich bei der CT, selbst in Low-dose-Technik, um ein äußerst exaktes diagnostisches Tool ^{5,17,28,32,39,50,51,91-95,97,189}. Dennoch existieren Berichte falsch positiver bzw. negativer Bildgebung ^{7,27,71}. In einem Nebenaspekt wurde deshalb anhand der Kasuistik analysiert, inwiefern DE bei der Detektion der intrakorporalen Packs eine Hilfestellung bieten kann.

Die Mehrzahl der Päckchen war gut abgrenzbar. Schwierigkeiten ergaben sich lediglich bei der Detektion der Kokainbase-Packs, welche sich homogen, oval und isodens zum Skyballa darstellten, ein durch Nahrungskarenz und Einnahme von Parasympatholytika häufiges Problem beim Body-Packer ^{12,18,22,100}. Gerade deshalb erwies sich der Informationszugewinn des DE für derartige Päckchen als besonders wertvoll.

Unabhängig von DE oder SE sollten zur Beurteilung einer Abdomenaufnahme beim Body-Packer unbedingt ein Variieren der Fensterung zur Demaskierung von Packs sowie die Inspektion aller Abschnitte des Gastrointestinaltrakts erfolgen ^{5,8,17,28,30,32,91}. In der Kasuistik waren die Packs bereits alle im Colonrahmen lokalisiert. Aufgrund der sehr hohen Dichte der Päckchen war das Weichteilfenster zur Beurteilung ausreichend.

Die Kombination der beiden gewichteten Aufnahmen zur Differenzierung Pack/Weichgewebe bzw. Stuhl erwies sich als äußerst hilfreich, da sich letzterer stets hypodens darstellte. Die Verwendung gewichteter bzw. subtraktionsbasierter Aufnahmen mittels DECT zur Visualisierung von gastrointestinalen Pathologien existiert bereits im Sinne einer virtuellen Koloskopie. Hierfür sind allerdings i.d.R. einige Tage im Voraus Vorbereitungen bzgl. einer oralen Kontrastmittelapplikation mit Jod oder Barium zu treffen mit dem Ziel der vollständigen Durchmischung des Darminhalts. Anschließend erfolgt eine Subtraktion der kontrastmittelangereicherten Bestandteile ^{176,190,191}. Die begrenzt zur Verfügung stehende Zeit stellt im Kontext Body-Packing den limitierenden Faktor zur Durchführung einer virtuellen Koloskopie mit einer mehrtägigen Vorbereitungsphase dar. Darüber hinaus ist durch die Gabe von oralem oder rektalem Kontrastmittel kein zusätzlicher Benefit zu erwarten, da es sich bei der Pathologie selbst, dem Pack, um eine körperfremde Substanz handelt und aufgrund des ähnlichen spektralen Verhaltens eine fehlerhafte Untersuchung denkbar ist.

Analysen spektraler Kurven von Stuhl sind bis dato nicht existent. Im Vergleich zu den Suchtmittelpacks stellten sich die Kurvenverläufe der Stuhlanalysen deutlich flacher dar. Stuhl besteht aus Überresten organischer Materialien und somit v.a. Elementen niedriger Ordnungszahl, was das spektrale Verhalten erklärt. Auch Weichgewebe wie Darm oder Fett

dürften sich durch flache Kurvenverläufe sicher von den Päckchen abgrenzen lassen ^{104,121}. Ein Problem stellen möglicherweise Kontrastmittel und Kalzifikationen bzw. Steine dar. Da die DE-Methode deshalb entwickelt wurde, weisen diese ebenso wie Suchtmittelpacks eine hohe spektrale Abhängigkeit auf ^{132,153,192}.

Die Dichtewerte der Stuhlanalysen waren zwischen – 19,23 HU und 34,64 HU teils in einem ähnlichen Bereich wie die untersuchten Packs angesiedelt. Die Dichte ist in diesem Zusammenhang oftmals wenig zielführend, da sich die HU-Werte von Fremdkörper und Darminhalt nicht selten in einem ähnlichen Bereich bewegen ^{17,32,50,51,56,142}. Die in der Literatur beschriebenen Werte für Stuhl liegen im Bereich von -120 bis 80 HU und schließen damit die hier erzielten Resultate ein, wobei interindividuelle Unterschiede hinsichtlich Nahrung und Flüssigkeitszufuhr und möglicherweise auch Darmregion eine Rolle spielen dürften ^{4,5}. Wie in der Literatur empfohlen, wurde auf die Verwendung von oralem oder rektalem Kontrastmittel verzichtet, da hierdurch eine Maskierung von Packs bei ähnlichen HU-Werten denkbar und auch bereits überliefert ist ^{31,32,57,70,71,86,193}.

Die effektiven Ordnungszahlen der Stuhlanalysen waren in einem ähnlichen Bereich wie Wasser lokalisiert, was die geringe spektrale Abhängigkeit erklärt. Vergleichswerte in der Literatur fehlen. Mahnken et al. analysierten verschiedene Körperflüssigkeiten wie Pus, Blut und Urin und erzielten ähnliche Ergebnisse bzgl. der Atomzahlen ¹³⁶.

Möglicherweise bietet ähnlich wie das Variieren der Fensterung auch ein Variieren der keV-Zahl eine optimierte Darstellung der Packs, da Kontraste im niedrigen keV-Bereich besser zur Geltung kommen (*Abbildung 41*) ^{120,125,128}.

Demnach dürften Stuhl und Weichgewebe ein nahezu konstantes Verhalten zeigen, wohingegen sich die Suchtmittelpacks im niedrigerenergetischen Bereich aufgrund der spektralen Abhängigkeit hervorheben.

Durch die spektrale Abhängigkeit der Body-Packs im Vergleich zu Stuhl und Weichgewebe kann der Einsatz einer DE-Untersuchung eine wertvolle Modalität bei der Detektion der intrakorporalen Packs darstellen.

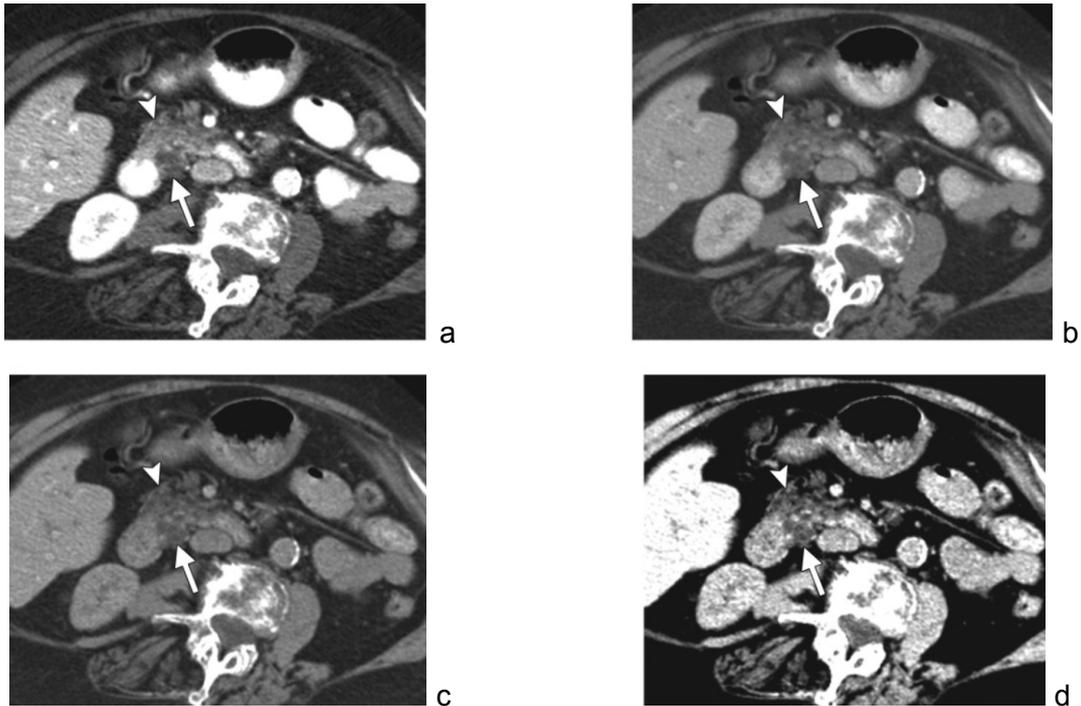


Abbildung 41: Monochromatische DECT-Bilder bei 40 keV (a), 85 keV (b), 120 keV (c) und 140 keV (d) mit optimierter Darstellung der zystischen Struktur im Processus uncinatus (Pfeil) bei 40 keV durch die verbesserte Darstellung kontrastmittelaufnehmender Strukturen wie z.B. des Pankreasparenchyms bei niedrigen Energien.

(aus Silva AC, Morse BG, Hara AK, Paden RG, Hongo N, Pavlicek W, *Dual-energy (spectral) CT: applications in abdominal imaging. Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, 2011; Volume 31, Pages 1031-46, mit Genehmigung durch die Radiological Society of North America*¹²⁸)

4.3 Strahlenbelastung und Dosisreduktion

Diagnostische Erkenntnisse auf der einen Seite, aber auch Strahlenbelastung auf der anderen stehen bei einer CT-Untersuchung grundsätzlich als positive und negative Faktoren gegenüber. Auch im Kontext Body-Packing ist zwischen Nutzen und Schaden einer CT-Untersuchung abzuwägen. Gerade die Kombination aus meist jungen Patienten und strahlungssensiblen Organen, besonders Ovarien bzw. Hoden, ist ein wichtiger, zu berücksichtigender Faktor^{2,18,50}.

Die in den Untersuchungen des Schweinemodells sowie der Kasuistik erzielten Dosiswerte lagen unterhalb der vom Bundesamt für Strahlenschutz in regelmäßigen Abständen aktualisierten Referenzwerte für strahlenbelastende Untersuchungen bei Erwachsenen¹⁴³. Aus Strahlenschutzgründen erscheint es dennoch sinnvoll, gerade in Hinblick auf einen potentiellen Einsatz im klinischen Setting, einige grundlegende Punkte zur Dosisreduktion gesondert zu diskutieren.

Die Scanlänge ist zu optimieren ¹⁹⁴. In Studien wurde gezeigt, dass in vielen Fällen die Scanlänge zu großzügig bemessen und dadurch dem Patienten eine unnötig hohe Dosis verabreicht wird ¹⁹⁴. Das Scanfeld einer Abdomen-CT im Kontext Body-Packing sollte das komplette Abdomen abdecken und von den Zwerchfellkuppeln bis zur Symphyse reichen, um den gesamten Magen-Darm-Trakt zu erfassen ^{8,17,28,30}. In der Literatur finden sich hierzu Werte zwischen 40,2 cm und 49 cm ^{51,70}. In der Kasuistik betrug die Scanlänge ca. 50 cm. Diese erstreckte sich bis zum mittleren Oberschenkel. Hier wäre zwar in Hinblick auf Body-Packing eine Dosiseinsparung möglich gewesen, aber die klinische Indikation rechtfertigt diese Erweiterung. Das Scanfeld des Schweinmodells erstreckte sich lediglich im unteren Abdomen, sodass eine Wertung hier nicht sinnvoll erscheint.

Eine Reduktion der Stromstärke ist anzustreben ¹⁹⁴. Dies stellt auch das Prinzip bei Low-dose-Aufnahmen dar ^{50,51,97}. Bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Protokoll handelt es sich um ein am Klinikum der Universität München etabliertes CT-Angiographie-Protokoll zur Detektion von Endoleaks, d.h. zur Detektion einer Reperfusion eines Aneurysmasacks trotz Versorgung mittels Endoprothese. Die Stromstärke von 630 mA ist hierbei vorgegeben. Im Gegensatz zu Dual-Source-Geräten ist eine automatische Modulation der Stromstärke zur Dosiseinsparung mit Variation der mA entsprechend der gescannten Region an dem hier verwendeten Single-Source-Gerät im DE-Modus sowie auch an neueren Geräten mit Rapid-kVp-Switching nicht möglich (*Abbildung 42*) ^{130,131}. Dabei ist bei einer Abdomen-CT von den Zwerchfellkuppeln bis zum Tuber ischiadicum insbesondere im oberen Abdomen aufgrund des geringen Knochenanteils im Vergleich zum Becken für die gleiche Bildqualität eine niedrigere Stromstärke erforderlich und damit eine Dosiseinsparung möglich.

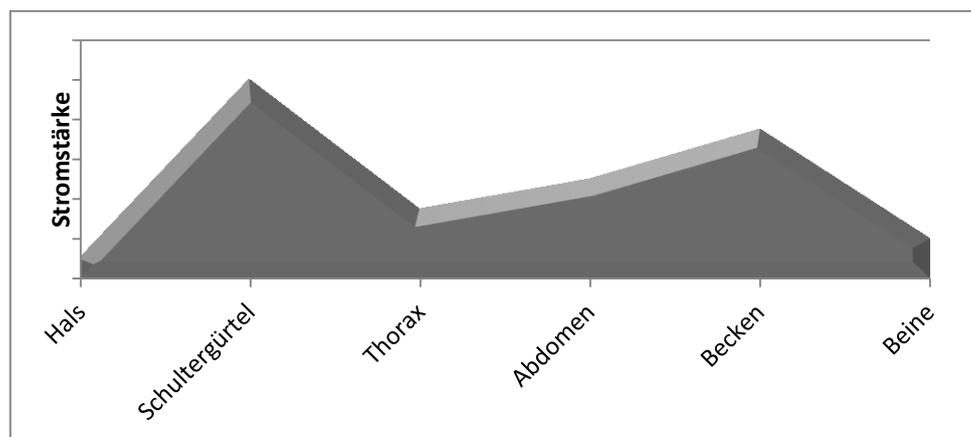


Abbildung 42: Schematische Darstellung für die automatische Dosismodulation mit Variieren der mA in Abhängigkeit von der durchstrahlten Körperpartie. Eine höhere Stromstärke und damit eine höhere Dosis ist aufgrund des hohen Knochenanteils im Bereich des Schultergürtels sowie des Beckens erforderlich ¹¹³.

Der Pitchfaktor ist zu optimieren¹⁹⁴. Er spiegelt das Verhältnis zwischen Tischvorschub pro Rotation und Kollimation wider. Da die Information durchstrahlter Körper bereits bei 180° Röhrendrehung vorliegt genügt theoretisch ein Pitch von 2. Mit einem Pitch von 1 liegt die Information doppelt vor, was durch Mittelung zweier Werte das zufällige Bildrauschen reduziert. Daher sind Pitchwerte zwischen 1 und 2 bei Standardaufnahmen üblich. Kleinere Werte als 1 resultieren in Überlappungen sowie einer unnötigen Erhöhung der Patientendosis, höhere Werte in einer Dosisreduktion jedoch auch in teils lückenhaften Datensätzen^{105,194}. Der in den In-vivo-Aufnahmen verwendete Faktor betrug 1,375 und lag damit im klinisch üblichen Intervall für eine CT-Abdomenuntersuchung in der Patientenversorgung.

Eine Reduktion der CT-Untersuchungsphasen ist anzustreben¹⁹⁴. Im Rahmen der Kasuistik erfolgte die Bildgebung, wie von vielen weiteren Kliniken in diesem Setting bevorzugt, ausschließlich in einer Phase, in Nativtechnik^{17,28,39,51,70,195}. Eine Kontrastmittelgabe kann jedoch in Abhängigkeit von der Fragestellung (Obstruktion, Perforation usw.) durchaus sinnvoll sein^{21,86}. In diesem Fall kann bei der Anwendung von DE durch das Erzeugen von virtuellen Nativaufnahmen auf einen vorherigen Nativscan verzichtet werden^{110,122,130,132-134,152}.

Es ist noch anzumerken, dass im Bereich Nieren- sowie Gallensteindifferenzierung, bei welcher DE bereits etabliert ist, zur Dosisreduktion u.a. zunächst eine Low-dose-CT gefahren wird, um die Steine zu lokalisieren und anschließend ausschließlich in diesem Bereich eine DE-Aufnahme erfolgt¹⁰⁷. Platon et al. übertrugen dieses Prinzip bereits auf die Diagnostik bei Body-Packern⁴⁴. Diese Vorgehensweise erscheint jedoch nur sinnvoll, wenn sich die Packs ausschließlich in einem kleinen Abschnitt befinden, was jedoch besonders bei einer hohen Anzahl an Fremdkörpern eher unwahrscheinlich sein dürfte^{8,17,28,30,68}. Eine erste Abschätzung bzgl. der Verteilung könnte jedoch bereits der Scout-Scan liefern¹⁴⁶.

Trotz der Dosisunterschreitung der vom Bundesamt für Strahlenschutz festgelegten Referenzwerte scheint eine Reduzierung der Strahlendosis in Abhängigkeit der Fragestellung sowie des Patientenhabitus u.U. möglich und sinnvoll.

4.4 Dual-Energy-Computertomographie im Management von Body-Packern

Im Management von Body-Packern ist eine Differenzierung der transportierten Suchtstoffe bzgl. der Therapiemethode sinnvoll. Hierfür existieren unterschiedliche Modalitäten, wobei sicherlich die klinische Präsentation von Intoxikationssymptomen sowie Urinschnelltests zu den unkomplizierten und zugleich risikoarmen, aber oftmals nicht eindeutigen Varianten zählen^{7,21,39}. Im Zweifelsfall könnten diese durch eine DECT-Aufnahme des gesamten Abdomens oder bei Kenntnis der Päckchenlokalisierung, wie bereits beschrieben^{44,107}, auch nur der entsprechenden Abdominalregion ergänzt werden. Im Falle einer Heroinintoxikation gilt

meist ein konservatives Vorgehen inklusive symptomatischer Therapie und Naloxongabe als angebracht^{3,7,21,54,100}. Im Falle einer Kokainintoxikation hingegen ist nochmals eine Differenzierung vorzunehmen. Bei leichten Formen einer Intoxikation bzw. Patienten, welche sich wie beispielsweise auch der Patient aus dem Innenstadt-Klinikum der Universität München im Rahmen einer symptomatischen Therapie stabilisieren lassen, kann ebenfalls ein moderates Vorgehen zur Anwendung kommen^{7,41,82}. Bei schweren Kokainintoxikationen bleibt weiterhin die Operation der Goldstandard.

Im Falle einer Schnittbildgebung erfolgt am Klinikum der Universität München die Untersuchung des gesamten Abdomens. Zudem erscheint in Abhängigkeit von der Fragestellung die Anwendung von intravenösem Kontrastmittel u.U. sinnvoll, bzgl. der Differenzierung sowie Detektion jedoch nicht zwingend erforderlich^{17,31-34,39,51,57,70,99,193}. Eine Anwendung oraler oder rektaler Kontrastmittel erfolgt an diesem Institut nicht regelhaft.

Die Detektion von Packs mittels DE ist nicht Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Aufgrund der Strahlenbelastung ist statt einem Einsatz der DE-Untersuchung zur reinen Abschätzung der Paketanzahl und -lokalisierung eindeutig die wesentlich dosisärmere Low-dose-CT die Modalität der Wahl^{50,51,98}.

Viele Kliniken führen im Laufe der Therapie Kontrollaufnahmen des Abdomens durch, um den Therapiefortschritt sowie das -ende zu definieren^{21,29,33,35,39,76,77,146,196}. Wenngleich unbekannt, so kann im Alltag von einer großen Variationsbreite des Vorgehens ausgegangen werden.

Zur Differenzierung und in Einzelfällen auch zur Detektion der intrakorporalen Packs kann eine DE-Bildgebung hilfreich sein. Zur Bildbetrachtung eignen sich aufgrund des geringen Bildrauschens sowie des zu einer 100 bis 120 kV-Aufnahme ähnlichen Bildeindrucks monochromatische Aufnahmen bei 70 keV^{120,131}. Für die Auswertung der DE-Bilddaten ist eine ROI pro Pack, zentral und in einer homogen wirkenden Schicht positioniert, vermutlich ausreichend, wie die Ergebnisse der Kasuistik nahelegen. Die Berechnung eines Steigungsfaktors ist aktuell noch nicht automatisiert. Zumindest erfolgt jedoch die automatische Generierung der spektralen Kurven zu der gesetzten ROI, wodurch eine grobe optische Differenzierung möglich erscheint. Die effektiven Ordnungszahlen sowie die HU-Werte für die gewählte keV-Zahl können über die gleiche ROI ermittelt werden. Zudem könnte sich die Beurteilung einer gewichteten Aufnahme als hilfreich erweisen. Hierfür können in der Maske am Bildrand in einem weiteren Schritt die interessierenden Substanzen ausgewählt werden.

Bei der DECT handelt es sich um ein auch im Notfall schnell durchführbares, bildgebendes Verfahren, welches die SECT durch die Möglichkeit zur Stoffdifferenzierung um eine Dimen-

sion erweitert. Unter Berücksichtigung der Anmerkungen zum Strahlenschutz (*Gliederungspunkt 4.3*) könnte die DE-Diagnostik im klinischen Setting zumindest in unklaren Fällen eine wertvolle Ergänzung zur Stoffdifferenzierung oder Detektion der Packs im Management von Body-Packern darstellen.

4.5 Limitationen dieser Arbeit und Ausblick

Trotz vielversprechender Ergebnisse bzgl. der Differenzierung und Detektion von Body-Packs mittels DECT sind einige Limitationen dieser Arbeit zu beachten.

Der dargestellte Algorithmus wurde anhand von ex-vivo-Daten, einem einzigen Tiermodell und einer singulären Kasuistik vorgeschlagen und kann schon deshalb keinen Anspruch auf allgemeine Gültigkeit erheben. Vielmehr sind die hier geäußerten Abwandlungen als Grundgedanken für den Einsatz einer DECT bei Body-Packern und damit als Hilfe bei einer in aller Regel akut entstehenden Notwendigkeit für eine derartige Untersuchung zu verstehen. Vor genereller Übernahme in einen klinischen Alltag erscheint eine weitere Validierung im Rahmen kontrollierter Studien sinnvoll.

Bzgl. der Differenzierung von Kokain und Heroin konnten sowohl hinsichtlich der gewichteten Aufnahmen als auch der Steigungsfaktoren und der Ordnungszahlen positive Ergebnisse erzielt werden. Der Stichprobenumfang und damit zugleich die Bandbreite an analysierten Streckungen und Konzentrationen waren jedoch, anders als in der Realität vorzufinden ist, äußerst gering. Zusammenhänge lassen sich aus der geringen Probenzahl lediglich abschätzen.

Auch eine In-vivo-Anwendung der DECT zur Stoffdifferenzierung beim Body-Packer erscheint möglich. Das Schweinmodell spiegelt jedoch aufgrund seines Habitus und der ausschließlich rektalen Päckchenlokalisation nur bedingt die Realität wider.

Im Rahmen der Kasuistik war hinsichtlich Konzentration/Streckung/Kompression der Substanzen eine geringere Variationsbreite zu verzeichnen. Eine Analyse von Heroin war nicht möglich, da der Patient ausschließlich Kokain geschmuggelt hatte. Die Differenzierung zwischen intakten und defekten Packs stellte lediglich einen Nebenaspekt dar. Das Verhalten defekter Packs, welche andere Inhaltsstoffe aufweisen, ist unklar, ebenso der Zusammenhang zwischen der Größe des Defekts, dem entsprechenden Feuchtigkeitsgrad und den daraus resultierenden Ergebnissen.

In Anbetracht dieser Limitationen aber vielversprechender, erster Ergebnisse dieser Untersuchungen erscheint es sinnvoll, vor der Einführung der DECT als Bestandteil im Management von Body-Packern prospektive, systematische Analysen bzgl. dieser Thematik durch-

zuführen. Diese sollten neben einer größeren Anzahl von Originalpacks, zugleich auch eine größere Bandbreite an Konzentrationen, Kompressionsstärken sowie Streckmitteln einschließen. Zudem erscheinen weitere In-situ-Untersuchungen am Modell erforderlich, z.B. am Jungschwein, welches einen dem Menschen ähnlicheren Habitus aufweist, ein Variieren der Päckchenlokalisation eingeschlossen. Auch weitere Überlegungen einer möglichen Dosisreduktion z.B. durch die Evaluation weiterer Protokolle, nur kurzstreckigem DECT-Scan oder DECT-Scanner mit automatischer Dosismodulation erscheinen sinnvoll.

5 Zusammenfassung

Body-Packer sind Personen, welche durch Schlucken eine variable Anzahl an mit Suchtmitteln befüllten Packs intrakorporal schmuggeln. Im Falle einer Leckage/Ruptur drohen lebensgefährliche Intoxikationen. Symptomatische Personen werden meist umgehend einer chirurgischen Intervention mit Entfernung aller Packs zugeführt. Dabei ist jedoch eine Heroinintoxikation medikamentös mittels Antidot Naloxon beherrschbar. Eine non-invasive In-vivo-Differenzierung der intrakorporalen Substanzen erfolgt häufig nicht oder ist kompliziert. Einen neuartigen Ansatz zur Stoffdifferenzierung bildet die Dual-Energy-Computertomographie, welche bereits zur Analyse von Nieren- und Gallensteinen erfolgreich Anwendung findet.

Ziel dieser Arbeit ist es, die DECT als Methode bei der Differenzierung von Drogengebunden beim Body-Packing zu überprüfen. Erstens gilt es, in einem Ex-vivo-Experiment festzustellen, inwieweit eine Differenzierung von für Body-Packing typischen Drogen mittels DECT auch bei Verwendung unterschiedlicher Streckmittel sowie unterschiedlicher Kompression und unterschiedlicher Konzentration möglich ist. Zweitens wird ein In-vivo-Fall in-situ am Schweinemodell simuliert, um festzustellen, inwiefern die Ex-vivo-Ergebnisse auf die Realität, also die intrakorporale Lokalisation der Packs, übertragbar sind. Zudem wird retrospektiv ein Fall aus dem Innenstadt-Klinikum der Universität München aufgearbeitet. Drittens sollen aus diesen Ergebnissen Empfehlungen für das Management symptomatischer Body-Packer abgeleitet werden.

Das Prinzip des DE basiert auf dem substanzspezifischen, spannungsabhängigen Verhalten der Hounsfield-Einheiten durch Verwendung zweier Spannungen im Rahmen eines Scans. Hieraus lassen sich über die Positionierung eines Messkreises an der gewünschten Stelle spektrale Kurven ($x = \text{Spannung in keV}$; $y = \text{Dichte in HU}$), atomare Ordnungszahlen sowie HU-Werte bei 70 keV, welche etwa Standardaufnahmen mit 100 – 120 kV gleichzusetzen sind, generieren. Des Weiteren lassen sich sogenannte gewichtete Aufnahmen mit Betonung oder Subtraktion der gewünschten Substanz erstellen. Alle Scans dieser Arbeit wurden an einem 64-Zeilen-MDCT-Gerät (CT 750 HD Discovery, GE Healthcare, Waukesha, Milwaukee) im DE-Modus (Rapid-kVp-Switching, 80/140 kVp) durchgeführt.

Es wurden 15 Proben, darunter Kokain-HCl und Heroin, zunächst lose, anschließend nach einer Kompression mit 1000 N gescannt. Hierbei zeigten sich fallende Verläufe der spektralen Kurven für Kokain (-2,55 HU/keV) und steigende Kurvenverläufe für Heroin (0,82 HU/keV). Die HU-Werte sowie die durchschnittlichen atomaren Ordnungszahlen des Kokains waren höher (-4,02 HU; 9,59) als die HU-Werte sowie die entsprechenden Ordnungszahlen des Heroins (-188,10 HU; 6,35). Auch in den kokain- bzw. heroingewichteten Aufnahmen

war eine Differenzierung möglich, indem sich die jeweils gewichtete Substanz hyperdens darstellte. Es zeigte sich jedoch auch, dass die analysierten Parameter eine Abhängigkeit von der Kompressionsstärke sowie der Suchtmittelkonzentration aufwiesen. Durch Zunahme der Kompression zeigten sich steilere Kurvenverläufe sowie eine Zunahme der HU-Werte und der atomaren Ordnungszahlen. Für den Zusammenhang zwischen der Suchtmittelkonzentration und den analysierten Parameter konnte vermutlich aufgrund der geringen Probenanzahl keine allgemein gültige Regel abgeleitet werden.

Des Weiteren wurden zehn Proben zunächst ex-vivo, anschließend in-situ rektal in einem Schweinemodell positioniert untersucht. Hierbei waren teils deutliche Diskrepanzen zum Ex-vivo-Versuch festzustellen. Insbesondere die Heroinproben zeigten nun fallende Kurvenverläufe (-0,51 HU/keV). Die gewichteten Aufnahmen waren aufgrund starker Artefaktbildung kaum verwertbar. Ursächlich für diese Beobachtungen erschienen Aufhärtingsartefakte durch die Lokalisation der Päckchen im Beckenring sowie durch den kräftigen Habitus des Schweinemodells.

Diese Annahme wird dadurch unterstützt, dass diese Artefakte bei einem deutlich schlankeren Habitus des Patienten in der Kasuistik, in der ein symptomatischer Body-Packer im Verlauf des intensivmedizinischen Aufenthalts eine klinisch indizierte DE-Bildgebung erhalten hatte, geringer ausgeprägt waren. Nach Defäkation erfolgte zudem ein Ex-vivo-Scan aller 73 Packs, welche ausschließlich Kokain-HCl und Kokainbase jedoch kein Heroin enthielten. Eine Identifikation der defekten Päckchen war lediglich anhand höherer HU-Werte (274,84 HU) gegenüber den intakten Packs (112,60 HU) möglich. Zudem erwies sich das spannungsabhängige Verhalten der Suchtmittel im Gegensatz zu dem spannungsunabhängigen Verhalten von Weichgewebe und Stuhl bei der Detektion der Packs als hilfreich.

Trotz der Einhaltung der Dosisgrenzwerte für eine Abdomen-CT in der Kasuistik stellt die Strahlenbelastung den limitierenden Faktor zum generellen Einsatz der DECT im Kontext Body-Packing aufgrund der meist jungen Patienten dar. Andererseits zeigten die Ex-vivo-Experimente und teils auch die In-vivo-Analysen im Rahmen der Kasuistik vielversprechende Ergebnisse, sodass der Einsatz der DE-Diagnostik im klinischen Setting zumindest in unklaren Fällen möglicherweise eine wertvolle Ergänzung zur Stoffdifferenzierung oder Detektion der Packs darstellen könnte. Vor Übernahme der DECT in das Management von Body-Packern erscheinen jedoch weitere Studien insbesondere mit einer größeren Probenanzahl sowie Variationsbreite hinsichtlich des Inhalts und der Fertigung notwendig.

6 Quellenverzeichnis

1. Algra PR, Brogdon BG, Marugg RC. Role of radiology in a national initiative to interdict drug smuggling: the Dutch experience. *AJR American journal of roentgenology* 2007;189:331-6.
2. Niewiarowski S, Gogbashian A, Afaq A et al. Abdominal X-ray signs of intra-intestinal drug smuggling. *Journal of forensic and legal medicine* 2010;17:198-202.
3. Schaper A, Hofmann R, Ebbecke M et al. [Cocaine-body-packing. Infrequent indication for laparotomy]. *Der Chirurg; Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizin* 2003;74:626-31.
4. Wackerle B, Rupp N, von Clarmann M et al. [Detection of narcotic-containing packages in "body-packers" using imaging procedures. Studies in vitro and in vivo]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 1986;145:274-7.
5. Schmidt S, Hugli O, Rizzo E et al. Detection of ingested cocaine-filled packets--diagnostic value of unenhanced CT. *European journal of radiology* 2008;67:133-8.
6. Cawich SO, Williams EW, Simpson LK et al. Treating cocaine body packers: the unspoken personal risks. *Journal of forensic and legal medicine* 2008;15:231-4.
7. Gsell M, Perrig M, Eichelberger M et al. [Body-packer & body-stuffer - a medical challenge]. *Praxis* 2010;99:533-44.
8. Hassanian-Moghaddam H, Abolmasoumi Z. Consequence of body packing of illicit drugs. *Archives of Iranian medicine* 2007;10:20-3.
9. Yang M, Zhao H, Lan J et al. [Nasal-cardiac reflex initiated by nasal packing (three cases report and literature review)]. *Lin chuang er bi yan hou tou jing wai ke za zhi = Journal of clinical otorhinolaryngology, head, and neck surgery* 2012;26:120-2.
10. Lancashire MJ, Legg PK, Lowe M et al. Surgical aspects of international drug smuggling. *British medical journal (Clinical research ed)* 1988;296:1035-7.
11. de Bakker JK, Nanayakkara PW, Geeraedts LM, Jr. et al. Body packers: a plea for conservative treatment. *Langenbeck's archives of surgery / Deutsche Gesellschaft für Chirurgie* 2012;397:125-30.
12. Dorn T, Ceelen M, de Keijzer KJ et al. Prevalence and medical risks of body packing in the Amsterdam area. *Journal of forensic and legal medicine* 2013;20:86-90.
13. Olmedo R, Nelson L, Chu J et al. Is surgical decontamination definitive treatment of "body-packers"? *The American journal of emergency medicine* 2001;19:593-6.
14. McCarron MM, Wood JD. The cocaine 'body packer' syndrome. Diagnosis and treatment. *Jama* 1983;250:1417-20.
15. Moreira M, Buchanan J, Heard K. Validation of a 6-hour observation period for cocaine body stuffers. *The American journal of emergency medicine* 2011;29:299-303.
16. Bulstrode N, Banks F, Shrotria S. The outcome of drug smuggling by 'body packers'--the British experience. *Annals of the Royal College of Surgeons of England* 2002;84:35-8.

17. Yang RM, Li L, Feng J et al. Heroin body packing: clearly discerning drug packets using CT. *Southern medical journal* 2009;102:470-5.
18. Hergan K, Kofler K, Oser W. Drug smuggling by body packing: what radiologists should know about it. *European radiology* 2004;14:736-42.
19. Bogusz MJ, Althoff H, Erkens M et al. Internally concealed cocaine: analytical and diagnostic aspects. *Journal of forensic sciences* 1995;40:811-5.
20. Wetli CV, Mittlemann RE. The "body packer syndrome"-toxicity following ingestion of illicit drugs packaged for transportation. *Journal of forensic sciences* 1981;26:492-500.
21. Traub SJ, Hoffman RS, Nelson LS. Body packing--the internal concealment of illicit drugs. *The New England journal of medicine* 2003;349:2519-26.
22. Pidoto RR, Agliata AM, Bertolini R et al. A new method of packaging cocaine for international traffic and implications for the management of cocaine body packers. *The Journal of emergency medicine* 2002;23:149-53.
23. Ramrakha PS, Barton I. Drug smuggler's delirium. *BMJ (Clinical research ed)* 1993;306:470-1.
24. Wankhade VK, Chikhalkar BG. Body packing and intra-vaginal body pushing of cocaine: A case report. *Legal medicine (Tokyo, Japan)* 2018;31:10-3.
25. Jones OM, Shorey BA. Body packers: grading of risk as a guide to management and intervention. *Annals of the Royal College of Surgeons of England* 2002;84:131-2.
26. Sporer KA, Firestone J. Clinical course of crack cocaine body stuffers. *Annals of emergency medicine* 1997;29:596-601.
27. Eng JG, Aks SE, Waldron R et al. False-negative abdominal CT scan in a cocaine body stuffer. *The American journal of emergency medicine* 1999;17:702-4.
28. Taheri MS, Hassanian-Moghaddam H, Birang S et al. Swallowed opium packets: CT diagnosis. *Abdominal imaging* 2008;33:262-6.
29. Veyrie N, Servajean S, Aissat A et al. Value of a systematic operative protocol for cocaine body packers. *World journal of surgery* 2008;32:1432-7.
30. Silverberg D, Menes T, Kim U. Surgery for "body packers"--a 15-year experience. *World journal of surgery* 2006;30:541-6.
31. Aissa J, Kohlmeier A, Rubbert C et al. Diagnostic value of CT-localizer and axial low-dose computed tomography for the detection of drug body packing. *Journal of forensic and legal medicine* 2016;37:55-60.
32. Bulakci M, Kalelioglu T, Bulakci BB et al. Comparison of diagnostic value of multidetector computed tomography and X-ray in the detection of body packing. *European journal of radiology* 2013;82:1248-54.
33. Glovinski PV, Lauritsen ML, Bay-Nielsen M et al. Asymptomatic body packers should be treated conservatively. *Danish medical journal* 2013;60:A4723.

34. Heymann-Maier L, Trueb L, Schmidt S et al. Emergency department management of body packers and body stuffers. *Swiss medical weekly* 2017;147:w14499.
35. Traub SJ, Kohn GL, Hoffman RS et al. Pediatric "body packing". *Archives of pediatrics & adolescent medicine* 2003;157:174-7.
36. Beckley I, Ansari NA, Khwaja HA et al. Clinical management of cocaine body packers: the Hillingdon experience. *Canadian journal of surgery Journal canadien de chirurgie* 2009;52:417-21.
37. Cordero DR, Medina C, Helfgott A. Cocaine body packing in pregnancy. *Annals of emergency medicine* 2006;48:323-5.
38. Goertemoeller S, Behrman A. The risky business of body packers and body stuffers. *Journal of emergency nursing: JEN : official publication of the Emergency Department Nurses Association* 2006;32:541-4.
39. Mandava N, Chang RS, Wang JH et al. Establishment of a definitive protocol for the diagnosis and management of body packers (drug mules). *Emergency medicine journal : EMJ* 2011;28:98-101.
40. Malbrain ML, Neels H, Vissers K et al. A massive, near-fatal cocaine intoxication in a body-stuffer. Case report and review of the literature. *Acta clinica Belgica* 1994;49:12-8.
41. Glass JM, Scott HJ. 'Surgical mules': the smuggling of drugs in the gastrointestinal tract. *Journal of the Royal Society of Medicine* 1995;88:450-3.
42. Beck NE, Hale JE. Cocaine 'body packers'. *The British journal of surgery* 1993;80:1513-6.
43. Beck O, Bottcher M. Paradoxical results in urine drug testing for 6-acetylmorphine and total opiates: implications for best analytical strategy. *Journal of analytical toxicology* 2006;30:73-9.
44. Platon A, Becker M, Becker CD et al. Illegal intra-corporeal packets: can dual energy CT be used for the evaluation of cocaine concentration? A cross sectional study. *BMC medical imaging* 2016;16:3.
45. Watson CJ, Thomson HJ, Johnston PS. Body-packing with amphetamines--an indication for surgery. *Journal of the Royal Society of Medicine* 1991;84:311-2.
46. Deitel M, Syed AK. Intestinal obstruction by an unusual foreign body. *Canadian Medical Association journal* 1973;109:211-2.
47. Dassel PM, Punjabi E. Ingested marihuana-filled balloons. *Gastroenterology* 1979;76:166-9.
48. Heinemann A, Miyaishi S, Iwersen S et al. Body-packing as cause of unexpected sudden death. *Forensic science international* 1998;92:1-10.
49. Bahrami-Motlagh H, Hassanian-Moghaddam H. Correlation of abdominopelvic computed tomography with clinical manifestations in methamphetamine body stuffers. 2018;123:98-104.
50. Maurer MH, Niehues SM, Schnapauff D et al. Low-dose computed tomography to detect body-packing in an animal model. *European journal of radiology* 2011;78:302-6.

51. Pache G, Einhaus D, Bulla S et al. [Low-dose computed tomography for the detection of cocaine body packs: clinical evaluation and legal issues]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 2012;184:122-9.
52. Stichenwirth M, Stelwag-Carion C, Klupp N et al. Suicide of a body packer. *Forensic science international* 2000;108:61-6.
53. Pinsky MF, Ducas J, Ruggere MD. Narcotic smuggling: the double condom sign. *Journal of the Canadian Association of Radiologists* 1978;29:79-81.
54. Wetli CV, Rao A, Rao VJ. Fatal heroin body packing. *The American journal of forensic medicine and pathology* 1997;18:312-8.
55. Joynt BP, Mikhael NZ. Sudden death of a heroin body packer. *Journal of analytical toxicology* 1985;9:238-40.
56. Leschka S, Fornaro J, Laberke P et al. Differentiation of cocaine from heroine body packes by computed tomography: Impact of different tube voltages and the dual-energy index. *Journal of Forensic Radiology and Imaging* 2013:46-50.
57. Reginelli A, Russo A, Urraro F et al. Imaging of body packing: errors and medico-legal issues. *Abdominal imaging* 2015;40:2127-42.
58. Koehler SA, Ladham S, Rozin L et al. The risk of body packing: a case of a fatal cocaine overdose. *Forensic science international* 2005;151:81-4.
59. Megarbane B, Ekherian JM, Couchard AC et al. [Surgery to save body-packers]. *Annales francaises d'anesthesie et de reanimation* 2004;23:495-8.
60. Stewart A, Heaton ND, Hogbin B. Body packing--a case report and review of the literature. *Postgraduate medical journal* 1990;66:659-61.
61. Bettinger J. Cocaine intoxication: massive oral overdose. *Annals of emergency medicine* 1980;9:429-30.
62. East JM. Surgical complications of cocaine body-packing: a survey of Jamaican hospitals. *The West Indian medical journal* 2005;54:38-41.
63. Ginsberg GG. Management of ingested foreign objects and food bolus impactions. *Gastrointestinal endoscopy* 1995;41:33-8.
64. Schaper A, Hofmann R, Bargain P et al. Surgical treatment in cocaine body packers and body pushers. *International journal of colorectal disease* 2007;22:1531-5.
65. Humpich M, Walcher F, Byhan C. Präklinisches Managment von Drogenintoxikationen. *Notfall + Rettungsmedizin* 2010:803-14.
66. Springer A. Drogen und Drogenmissbrauch - Information zur Gesundheitsförderung 3. Auflage ed. Wien: Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur; 2007.
67. Jordan MT, Bryant SM, Aks SE et al. A five-year review of the medical outcome of heroin body stuffers. *The Journal of emergency medicine* 2009;36:250-6.

68. Pramanik P, Vidua RK. Sudden Cardiac Death of a Body Packer Due to Cocaine Cardiotoxicity. *Clinical medicine insights Pathology* 2016;9:33-5.
69. Sporer KA, Dorn E. Heroin-related noncardiogenic pulmonary edema : a case series. *Chest* 2001;120:1628-32.
70. Beauverd Y, Poletti PA, Wolff H et al. A body-packer with a cocaine bag stuck in the stomach. *World journal of radiology* 2011;3:155-8.
71. Hahn IH, Hoffman RS, Nelson LS. Contrast CT scan fails to detect the last heroin packet. *The Journal of emergency medicine* 2004;27:279-83.
72. Hutchins KD, Pierre-Louis PJ, Zaretski L et al. Heroin body packing: three fatal cases of intestinal perforation. *Journal of forensic sciences* 2000;45:42-7.
73. Gherardi RK, Baud FJ, Leporc P et al. Detection of drugs in the urine of body-packers. *Lancet (London, England)* 1988;1:1076-8.
74. Shah AK. Detection of drugs in urine of body-packers. *Lancet (London, England)* 1988;1:1458.
75. Krishnan A, Brown R. Plain abdominal radiography in the diagnosis of the "body packer". *Journal of accident & emergency medicine* 1999;16:381.
76. Traub SJ, Hoffman RS, Nelson LS. False-positive abdominal radiography in a body packer resulting from intraabdominal calcifications. *The American journal of emergency medicine* 2003;21:607-8.
77. Traub SJ, Su M, Hoffman RS et al. Use of pharmaceutical promotility agents in the treatment of body packers. *The American journal of emergency medicine* 2003;21:511-2.
78. Caruana DS, Weinbach B, Goerg D et al. Cocaine-packet ingestion. Diagnosis, management, and natural history. *Annals of internal medicine* 1984;100:73-4.
79. Hoffman RS, Smilkstein MJ, Goldfrank LR. Whole bowel irrigation and the cocaine body-packer: a new approach to a common problem. *The American journal of emergency medicine* 1990;8:523-7.
80. Visser L, Stricker B, Hoogendoorn M et al. Do not give paraffin to packers. *Lancet (London, England)* 1998;352:1352.
81. Sauer W, Freislederer A, Graw M et al. [Sonography for intracorporeal drug smuggling]. *Deutsche medizinische Wochenschrift (1946)* 1989;114:1865-8.
82. de Prost N, Lefebvre A, Questel F et al. Prognosis of cocaine body-packers. *Intensive care medicine* 2005;31:955-8.
83. Suarez CA, Arango A, Lester JL, 3rd. Cocaine-codomo ingestion. Surgical treatment. *Jama* 1977;238:1391-2.
84. Robinson T, Birrer R, Mandava N et al. Body smuggling of illicit drugs: two cases requiring surgical intervention. *Surgery* 1993;113:709-11.

85. Alzen G, Banning S, Gunther R. [Sonographic detectability of narcotic drug containers in the gastrointestinal tract. Experimental research in the dog]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 1987;146:544-7.
86. Pinto A, Reginelli A, Pinto F et al. Radiological and practical aspects of body packing. *The British journal of radiology* 2014;87:20130500.
87. Beerman R, Nunez D, Jr., Wetli CV. Radiographic evaluation of the cocaine smuggler. *Gastrointestinal radiology* 1986;11:351-4.
88. Karhunen PJ, Suoranta H, Penttila A et al. Pitfalls in the diagnosis of drug smuggler's abdomen. *Journal of forensic sciences* 1991;36:397-402.
89. Hierholzer J, Tantow H, Cordes M et al. [Roentgen diagnosis of body packers--radiological and forensic considerations]. *Aktuelle Radiologie* 1995;5:157-60.
90. Esterson YB, Patel V, Nicastro J et al. Plain radiography may underestimate the burden of body packer ingestion: A case report. *Clinical imaging* 2017;44:57-60.
91. Sengupta A, Page P. Window manipulation in diagnosis of body packing using computed tomography. *Emergency radiology* 2008;15:203-5.
92. Freisleder A, Bautz W, Schmidt V. [Body packing: the value of modern imaging procedures in the detection of intracorporeal transport media]. *Archiv fur Kriminologie* 1988;182:143-53.
93. Freisleder A, Sauer W, Graw M et al. [Body-packing: detection of incorporated drug packets using ultrasound technics]. *Beitrage zur gerichtlichen Medizin* 1989;47:187-91.
94. Kersschot EA, Beaucourt LE, Degryse HR et al. Roentgenographical detection of cocaine smuggling in the alimentary tract. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 1985;142:295-8.
95. Flach PM, Ross SG, Ampanozi G et al. "Drug mules" as a radiological challenge: sensitivity and specificity in identifying internal cocaine in body packers, body pushers and body stuffers by computed tomography, plain radiography and Lodox. *European journal of radiology* 2012;81:2518-26.
96. Hartoko TJ, Demey HE, De Schepper AM et al. The body packer syndrome--cocaine smuggling in the gastro-intestinal tract. *Klinische Wochenschrift* 1988;66:1116-20.
97. Scherr MK, Peschel O, Grimm JM et al. Low-dose CT in body-packers: delineation of body packs and radiation dose in a porcine model. *Forensic science, medicine, and pathology* 2014;10:170-8.
98. Ziegeler E. Ein am Schweinmodell optimierter Algorithmus zur bildgebenden Detektion inkorporierter Päckchen von Drogenkurieren (Bodypackern). In: LMU München MF, ed. *Universitätsbibliothek LMU* 2014.
99. Poletti PA, Canel L, Becker CD et al. Screening of illegal intracorporeal containers ("body packing"): is abdominal radiography sufficiently accurate? A comparative study with low-dose CT. *Radiology* 2012;265:772-9.

100. Booker RJ, Smith JE, Rodger MP. Packers, pushers and stuffers--managing patients with concealed drugs in UK emergency departments: a clinical and medicolegal review. *Emergency medicine journal : EMJ* 2009;26:316-20.
101. Soriano-Perez MJ, Serrano-Carrillo JL, Marin-Montin I et al. Hashish body packing: a case report. *Case reports in medicine* 2009;2009:712573.
102. Fishbain DA, Wetli CV. Cocaine intoxication, delirium, and death in a body packer. *Annals of emergency medicine* 1981;10:531-2.
103. Janczak JM, Beutner U, Hasler K. Body packing: from seizures to laparotomy. *Case reports in emergency medicine* 2015;2015:208047.
104. Schmitt WG. [Energy dependence of Hounsfield numbers]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 1986;145:221-3.
105. Alkadhi H, Leschka S, Stolzmann P et al. *Wie funktioniert CT? 1. Auflage ed.* Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag GmbH; 2011.
106. Coursey CA, Nelson RC, Boll DT et al. Dual-energy multidetector CT: how does it work, what can it tell us, and when can we use it in abdominopelvic imaging? *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 2010;30:1037-55.
107. Graser A, Johnson TR, Bader M et al. Dual energy CT characterization of urinary calculi: initial in vitro and clinical experience. *Investigative radiology* 2008;43:112-9.
108. Stolzmann P, Scheffel H, Rentsch K et al. Dual-energy computed tomography for the differentiation of uric acid stones: ex vivo performance evaluation. *Urological research* 2008;36:133-8.
109. Voit H, Krauss B, Heinrich MC et al. [Dual-source CT: in vitro characterization of gallstones using dual energy analysis]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 2009;181:367-73.
110. Graser A, Johnson TR, Chandarana H et al. Dual energy CT: preliminary observations and potential clinical applications in the abdomen. *European radiology* 2009;19:13-23.
111. Flohr TG, McCollough CH, Bruder H et al. First performance evaluation of a dual-source CT (DSCT) system. *European radiology* 2006;16:256-68.
112. Hartman R, Kawashima A, Takahashi N et al. Applications of dual-energy CT in urologic imaging: an update. *Radiologic clinics of North America* 2012;50:191-205, v.
113. Prokop M, Galanski M, Schaefer-Prokop C et al. *Ganzkörper-Computertomographie. 2. Auflage ed.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2007.
114. Reiser M, Kuhn F, Debus J. *Duale Reihe Radiologie. 3. Auflage ed.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2011.
115. Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. 1973. *The British journal of radiology* 1995;68:H166-72.

116. Motley G, Dalrymple N, Keesling C et al. Hounsfield unit density in the determination of urinary stone composition. *Urology* 2001;58:170-3.
117. Nakada SY, Hoff DG, Attai S et al. Determination of stone composition by noncontrast spiral computed tomography in the clinical setting. *Urology* 2000;55:816-9.
118. Deveci S, Coskun M, Tekin MI et al. Spiral computed tomography: role in determination of chemical compositions of pure and mixed urinary stones--an in vitro study. *Urology* 2004;64:237-40.
119. Saw KC, McAteer JA, Monga AG et al. Helical CT of urinary calculi: effect of stone composition, stone size, and scan collimation. *AJR American journal of roentgenology* 2000;175:329-32.
120. GSI USER GUIDE Gemstone Spectral Imaging. In: Healthcare G, ed. Chalfont St. Giles, Buckinghamshire, UK2017.
121. Zachrisson H, Engstrom E, Engvall J et al. Soft tissue discrimination ex vivo by dual energy computed tomography. *European journal of radiology* 2010;75:e124-8.
122. Johnson TR, Krauss B, Sedlmair M et al. Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *European radiology* 2007;17:1510-7.
123. Yeh BM, Shepherd JA, Wang ZJ et al. Dual-energy and low-kVp CT in the abdomen. *AJR American journal of roentgenology* 2009;193:47-54.
124. Lin XZ, Miao F, Li JY et al. High-definition CT Gemstone spectral imaging of the brain: initial results of selecting optimal monochromatic image for beam-hardening artifacts and image noise reduction. *Journal of computer assisted tomography* 2011;35:294-7.
125. Lv P, Lin XZ, Chen K et al. Spectral CT in patients with small HCC: investigation of image quality and diagnostic accuracy. *European radiology* 2012;22:2117-24.
126. Matsumoto K, Jinzaki M, Tanami Y et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: improved image quality as compared with that obtained with conventional 120-kVp CT. *Radiology* 2011;259:257-62.
127. Pessis E, Campagna R, Sverzut JM et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: reduction of metal artifacts at CT. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 2013;33:573-83.
128. Silva AC, Morse BG, Hara AK et al. Dual-energy (spectral) CT: applications in abdominal imaging. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 2011;31:1031-46; discussion 47-50.
129. Deng K, Zhang CQ, Li W et al. Preliminary application of high-definition CT Gemstone Spectral Imaging in hand and foot tendons. *Korean journal of radiology* 2012;13:743-51.
130. Agrawal MD, Pinho DF, Kulkarni NM et al. Oncologic applications of dual-energy CT in the abdomen. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 2014;34:589-612.

131. Tamm EP, Le O, Liu X et al. "How to" incorporate dual-energy imaging into a high volume abdominal imaging practice. *Abdominal radiology (New York)* 2017;42:688-701.
132. De Cecco CN, Darnell A, Rengo M et al. Dual-energy CT: oncologic applications. *AJR American journal of roentgenology* 2012;199:S98-s105.
133. Graser A, Johnson TR, Hecht EM et al. Dual-energy CT in patients suspected of having renal masses: can virtual nonenhanced images replace true nonenhanced images? *Radiology* 2009;252:433-40.
134. Yu L, Leng S, McCollough CH. Dual-energy CT-based monochromatic imaging. *AJR American journal of roentgenology* 2012;199:S9-s15.
135. Goodsitt MM, Christodoulou EG, Larson SC. Accuracies of the synthesized monochromatic CT numbers and effective atomic numbers obtained with a rapid kVp switching dual energy CT scanner. *Medical physics* 2011;38:2222-32.
136. Mahnken AH, Stanzel S, Heismann B. Spectral rhoZ-projection method for characterization of body fluids in computed tomography: ex vivo experiments. *Academic radiology* 2009;16:763-9.
137. Kamiya K, Kunimatsu A, Mori H et al. Preliminary report on virtual monochromatic spectral imaging with fast kVp switching dual energy head CT: comparable image quality to that of 120-kVp CT without increasing the radiation dose. *Japanese journal of radiology* 2013;31:293-8.
138. Haller O, Karlsson L, Nyman R. Can low-dose abdominal CT replace abdominal plain film in evaluation of acute abdominal pain? *Upsala journal of medical sciences* 2010;115:113-20.
139. Roberts JL, Dalen K, Bosanko CM et al. CT in abdominal and pelvic trauma. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 1993;13:735-52.
140. Johnson TR. Dual-energy CT: general principles. *AJR American journal of roentgenology* 2012;199:S3-8.
141. König P, Lipp A. *Lehrbuch für Forschungstaucher*. 5. Auflage ed. Hamburg: Institut für Meereskunde der Universität Hamburg; 2007.
142. Grimm J, Wudy R, Ziegeler E et al. Differentiation of heroin and cocaine using dual-energy CT-an experimental study. *International journal of legal medicine* 2014;128:475-82.
143. Bekanntmachung der aktualisierten diagnostischen Referenzwerte für diagnostische und interventionelle Röntgenuntersuchungen. Bundesamt für Strahlenschutz, 2010. (Accessed 31/01/2016, at [https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/ion/drw-roentgen.pdf? blob=publicationFile&v=1.](https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/fachinfo/ion/drw-roentgen.pdf?blob=publicationFile&v=1.))
144. Zöfelt K. Computertomographie bei zu Transportzwecken inkorporierten Drogen (Body-Packing): Eine experimentelle ex-vivo Studie zur Unterscheidung von unterschiedlich stark komprimierten und mit streckmitteln versetzten Kokain- und Heroin-Proben anhand der CT-Dichte (in Progress). Medizinische Fakultät, LMU München; 2018.
145. Pinho DF, Kulkarni NM, Krishnaraj A et al. Initial experience with single-source dual-energy CT abdominal angiography and comparison with single-energy CT angiography: image quality, enhancement, diagnosis and radiation dose. *European radiology* 2013;23:351-9.

146. Ziegeler E, Grimm JM, Wirth S et al. Computed tomography scout views vs. conventional radiography in body-packers - delineation of body-packs and radiation dose in a porcine model. *European journal of radiology* 2012;81:3883-9.
147. Cocaine and crack drug profile. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. (Accessed 20/03/2018, at <http://www.emcdda.europa.eu/publications/drug-profiles/cocaine>.)
148. Illegale Drogen: Heroin. Deutsche Hauptstelle für Suchtfragen e.V. (Accessed 17/01/2016, at <http://www.dhs.de/suchtstoffe-verhalten/illegale-drogen/heroin.html>.)
149. Illegale Drogen: Kokain. Deutsche Hauptstelle für Suchtfragen e.V. (Accessed 17/01/2016, at <http://www.dhs.de/suchtstoffe-verhalten/illegale-drogen/kokain.html>.)
150. Heroin drug profile. European Monitoring Centre for Drugs and Drug Addiction. (Accessed 20/03/2018, at <http://www.emcdda.europa.eu/publications/drug-profiles/heroin>.)
151. Persson A, Jackowski C, Engstrom E et al. Advances of dual source, dual-energy imaging in postmortem CT. *European journal of radiology* 2008;68:446-55.
152. Karcaaltincaba M, Aktas A. Dual-energy CT revisited with multidetector CT: review of principles and clinical applications. *Diagnostic and interventional radiology (Ankara, Turkey)* 2011;17:181-94.
153. Mostafavi MR, Ernst RD, Saltzman B. Accurate determination of chemical composition of urinary calculi by spiral computerized tomography. *The Journal of urology* 1998;159:673-5.
154. Li M, Zheng X, Li J et al. Dual-energy computed tomography imaging of thyroid nodule specimens: comparison with pathologic findings. *Investigative radiology* 2012;47:58-64.
155. Landry G, Reniers B, Granton PV et al. Extracting atomic numbers and electron densities from a dual source dual energy CT scanner: experiments and a simulation model. *Radiotherapy and oncology : journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology* 2011;100:375-9.
156. Wang L, Liu B, Wu XW et al. Correlation between CT attenuation value and iodine concentration in vitro: discrepancy between gemstone spectral imaging on single-source dual-energy CT and traditional polychromatic X-ray imaging. *Journal of medical imaging and radiation oncology* 2012;56:379-83.
157. Goldberg HI, Cann CE, Moss AA et al. Noninvasive quantitation of liver iron in dogs with hemochromatosis using dual-energy CT scanning. *Investigative radiology* 1982;17:375-80.
158. Israelit S. CT of cocaine carrier - "body packer" - interpretation requirements. *European Journal of Radiology Extra* 2009.
159. Periodensystem. CHEMIE.DE Information Service GmbH, 2016. (Accessed 04/10/2016, at <http://www.chemie.de/lexikon/Periodensystem.html>.)
160. Heroin. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Heroin>.)
161. Kokain. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Kokain>.)
162. Mannit. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Mannit>.)

163. Diltiazem. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Diltiazem>.)
164. Levamisol. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Levamisol>.)
165. Phenacetin. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Phenacetin>.)
166. Procain. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Procain>.)
167. Paracetamol. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Paracetamol>.)
168. Lidocain. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Lidocain>.)
169. Weinstein. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Weinstein>.)
170. Natriumhydrogencarbonat. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Natriumhydrogencarbonat>.)
171. Coffein. Wikipedia. (Accessed 21/03/2018, at <https://de.wikipedia.org/wiki/Coffein>.)
172. Kulkarni NM, Eisner BH, Pinho DF et al. Determination of renal stone composition in phantom and patients using single-source dual-energy computed tomography. *Journal of computer assisted tomography* 2013;37:37-45.
173. Joshi M. Effective Atomic Number Accuracy for Kidney Stone Characterization using Spectral CT. *Medical Imaging* 2010.
174. Latchaw RE, Payne JT, Loewenson RB. Predicting brain tumor histology: change of effective atomic number with contrast enhancement. *AJR American journal of roentgenology* 1980;135:757-62.
175. Landry G, Seco J, Gaudreault M et al. Deriving effective atomic numbers from DECT based on a parameterization of the ratio of high and low linear attenuation coefficients. *Physics in medicine and biology* 2013;58:6851-66.
176. Cai W, Kim SH, Lee JG et al. Informatics in radiology: dual-energy electronic cleansing for fecal-tagging CT colonography. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 2013;33:891-912.
177. Artz NS, Hines CD, Brunner ST et al. Quantification of hepatic steatosis with dual-energy computed tomography: comparison with tissue reference standards and quantitative magnetic resonance imaging in the ob/ob mouse. *Investigative radiology* 2012;47:603-10.
178. Weidenmaier W, Christ G. [The effect of beam hardening on CT values]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Rontgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 1985;143:697-701.
179. Henson PW, Fox RA. A relationship between the percentage of calcium by mass and the effective atomic number of regions containing bone. *Physics in medicine and biology* 1984;29:979-84.

180. Schmitt WG, Mahmalat MO, Beyer HK. [Accuracy of computed tomographic densitometry in the neighborhood of the pelvic bones]. *RoFo : Fortschritte auf dem Gebiete der Rontgenstrahlen und der Nuklearmedizin* 1987;146:34-8.
181. Kusano Y, Uesaka S, Yajima K et al. Positional dependence of the CT number with use of a cone-beam CT scanner for an electron density phantom in particle beam therapy. *Radiological physics and technology* 2013;6:241-7.
182. Grimm LJ, Feuerlein S, Bashir M et al. Effectiveness of a breath-hold monitoring system in improving the reproducibility of different breath-hold positions in multiphasic CT imaging. *Clinical imaging* 2012;36:754-7.
183. Hamm B, Krestin GP, Laniado M et al. *MRT von Abdomen und Becken. 2. Auflage ed.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2007.
184. Aks SE, Vander Hoek TL, Hryhorczuk DO et al. Cocaine liberation from body packets in an in vitro model. *Annals of emergency medicine* 1992;21:1321-5.
185. Mebane C, DeVito JJ. Cocain intoxication: a unique case. *The Journal of the Florida Medical Association* 1975;62:19-20.
186. Shahnazi M, Sanei Taheri M, Pourghorban R. Body packing and its radiologic manifestations: a review article. *Iranian journal of radiology : a quarterly journal published by the Iranian Radiological Society* 2011;8:205-10.
187. Bierry G, Venkatasamy A, Kremer S et al. Dual-energy CT in vertebral compression fractures: performance of visual and quantitative analysis for bone marrow edema demonstration with comparison to MRI. *Skeletal radiology* 2014;43:485-92.
188. Wang CK, Tsai JM, Chuang MT et al. Bone marrow edema in vertebral compression fractures: detection with dual-energy CT. *Radiology* 2013;269:525-33.
189. Laberke PJ, Blum S, Waelti S et al. Systematic Evaluation of Radiation Dose Reduction in CT Studies of Body Packers: Accuracy Down to Submillisievert Levels. *AJR American journal of roentgenology* 2016;206:740-6.
190. Eliahou R, Azraq Y, Carmi R et al. Dual-energy based spectral electronic cleansing in non-cathartic computed tomography colonography: an emerging novel technique. *Seminars in ultrasound, CT, and MR* 2010;31:309-14.
191. Karcaaltincaba M, Ozdeniz I. Dual-energy CT for diagnostic CT colonography. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc* 2014;34:847.
192. Gabbai M, Leichter I, Mahgerefteh S et al. Spectral material characterization with dual-energy CT: comparison of commercial and investigative technologies in phantoms. *Acta radiologica (Stockholm, Sweden : 1987)* 2015;56:960-9.
193. Sohail S. CT scan of body packers: findings and costs. *JPMA The Journal of the Pakistan Medical Association* 2007;57:400-3.
194. Schindera ST, Nauer C, Treier R et al. [Strategies for reducing the CT radiation dose]. *Der Radiologe* 2010;50:1120, 2-7.

195. Prabhu R, Ne'eman A, Bier K et al. Radiology of body packers: The detection of internally concealed illegal materials. *Applied Radiology* 2008;26-8.

196. de Beer SA, Spiessens G, Mol W et al. Surgery for body packing in the Caribbean: a retrospective study of 70 patients. *World journal of surgery* 2008;32:281-5; discussion 6-7.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ein Beispiel für einen Algorithmus zum Management von Body-Packern ³⁹	8
Abbildung 2: Röntgenaufnahme eines Body-Packers nach Ingestion von Kokainpacks mit Lokalisation der röntgendichten, ovalären Packs im Colonrahmen.	9
Abbildung 3: Low-dose-CT-Aufnahme eines Body-Packers in der axialen Rekonstruktion im Weichteilfenster mit überlagerungsfreier Darstellung der ovalären Kokainpacks im Colon transversum (⇒) sowie eines Packs im Colon descendens (→).	10
Abbildung 4: Darstellung einer Einzelschicht eines CT-Thorax nach intravenöser Kontrastmittelapplikation in verschiedenen Fensterungen unter Angabe der Fensterbreite sowie der Fenstermitte in HU. In Abhängigkeit der Fensterung ist entweder das mediastinale Weichgewebe, das lufthaltige Lungengewebe oder das dichte Skelett gut zu beurteilen ¹¹⁴	14
Abbildung 5: Die spektrale Kurve zeigt das spannungsabhängige (x-Achse in keV) Absorptionsverhalten (y-Achse in HU) einer Substanz. Das kräftig, Kontrastmittel anreichernde Nierengewebe weist beispielsweise eine hohe Spannungsabhängigkeit auf, dargestellt durch den steilen Verlauf der roten Kurve. Die blande Nierenzyste hingegen zeigt kein spannungsabhängiges Absorptionsverhalten, dargestellt durch den flachen Verlauf der gelben Kurve.....	16
Abbildung 6: DECT mit hyperdensem, jodhaltigem Kontrastmittel im Nierenbeckenkelchsystem beidseits, wodurch Konkremente maskiert werden (a). Aus dem DE-Datensatz berechnete, virtuelle Nativaufnahme mit Subtraktion des jodhaltigen Kontrastmittels mit Darstellung eines Konkrements im Kelchsystem der linken Niere (b). Bestätigung des vorliegenden Konkrements in einer realen Nativaufnahme ohne intravenöse Kontrastmittelgabe (c).....	17
Abbildung 7: Vergleich der HU-Werte virtuell monochromatischer Aufnahmen (VMSI) sowie polychromatischer Aufnahmen mit 120 kVp für verschiedene Konzentrationen von Jod sowie für Wasser. Identische HU-Werte ergeben sich jeweils bei ca. 70 keV.	18
Abbildung 8: Kompressionsvorrichtung mit eingespannter Spritze sowie angeschlossenem Messsystem zur Druckmessung.....	21
Abbildung 9: Manuelles Befüllen (a) und Verschließen (b) der Plastikbehälter mit den pulverartigen Sucht- sowie Streckmitteln bei der Herstellung der experimentellen Packs ⁹⁸	21
Abbildung 10: Schweinemodell mit rektaler Probe und sichtbarem Gummiüberzug ⁹⁸	23
Abbildung 11: Exemplarische Originalpacks nach Defäkation und Reinigung.....	23
Abbildung 12: Berechnung des Steigungsfaktors ($\Delta HU/\Delta keV$) am Beispiel der spektralen Kurve eines Kokain-HCl-Packs aus den Experimenten.	26
Abbildung 13: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.	28

Abbildung 14: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Proben.....	28
Abbildung 15: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Heroin- und Streckmittelproben sowie der Kokainbase.	28
Abbildung 16: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.	30
Abbildung 17: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Proben.....	30
Abbildung 18: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Heroin- und Streckmittelproben sowie der Kokainbase.	30
Abbildung 19: Vergleich der Steigungsfaktoren der untersuchten Kokain- und Heroinproben vor und nach Kompression mit Darstellung des Median und des Range.	32
Abbildung 20: Vergleich der Dichtewerte der untersuchten Kokain- und Heroinproben bei 70 keV vor und nach Kompression mit Darstellung des Median und des Range.....	32
Abbildung 21: Vergleich der atomaren Ordnungszahlen der untersuchten Kokain- und Heroinproben vor und nach Kompression mit Darstellung des Median und des Range.	33
Abbildung 22: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.	33
Abbildung 23: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Proben sowie des Haschischs.....	34
Abbildung 24: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Heroinproben sowie der Streckmittel.	34
Abbildung 25: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Proben Kokain-HCl 78% dicht, Heroinbase 38% Ziegel und Haschisch sowie isodenser Darstellung der Probe Heroinbase 38% dicht (von links nach rechts) und deutlicher Artefaktbildung durch das Beckenskelett bei rektaler Probenlokalisierung.	36
Abbildung 26: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hypodenser Darstellung der Proben Kokain-HCl 78% dicht, Heroinbase 38% Ziegel und Haschisch sowie isodenser Darstellung der Probe Heroinbase 38% dicht (von links nach rechts) und deutlicher Artefaktbildung durch das Beckenskelett bei rektaler Probenlokalisierung.	36
Abbildung 27: Vergleich der Steigungsfaktoren der experimentellen Kokain-HCl-, Heroin- und Haschischpacks ex-vivo und in-situ am Schweinemodell mit Darstellung des Median und des Range.....	38
Abbildung 28: Vergleich der Dichtewerten der experimentellen Kokain-HCl-, Heroin- und Haschischpacks bei 70 keV ex-vivo und in-situ am Schweinemodell mit Darstellung des Median und des Range.....	38

Abbildung 29: Vergleich der Ordnungszahlen der experimentellen Kokain-HCl-, Heroin- und Haschischpacks ex-vivo und in-situ am Schweinmodell mit Darstellung des Median und des Range.....	39
Abbildung 30: Übersicht über die Probenanordnung während des DE-Scans.	40
Abbildung 31: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Packs sowie hypodenser Darstellung der Kokainbasen unabhängig vom Päckchenzustand (feucht/trocken).	40
Abbildung 32: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-Basen und hypodenser Darstellung der Kokain-HCl-Packs unabhängig vom Päckchenzustand (feucht/trocken).....	40
Abbildung 33: Wassergewichtete Einzelschicht mit Subtraktion von Kokain-HCl ohne Differenzierbarkeit zwischen feuchten und trockenen Päckchen. Hypodense Darstellung sowohl der feuchten als auch der trockenen Päckchen. Im direkten Vergleich stellen sich lediglich einzelne trockene Packs etwas hypodenser als die feuchten dar.	41
Abbildung 34: Wassergewichtete Einzelschicht mit Subtraktion von Heroin ohne Differenzierbarkeit zwischen feuchten und trockenen Päckchen. Hyperdense Darstellung sowohl der feuchten als auch der trockenen Päckchen.	41
Abbildung 35: DECT-Aufnahme des Patienten in der koronaren Rekonstruktion im Weichteilfenster mit Darstellung mehrerer Päckchen im Colon ascendens sowie im Bereich der linken Colonflexur. Hyperdense Darstellung der Kokain-HCl-Packs sowie isodense Darstellung der Kokainbase-Packs. Angrenzend an die linke Leiste bzw. den proximalen Oberschenkel ist noch partiell der nach arterieller Punktion aufliegende Sandsack erfasst, welcher, als homogene, hyperdense Struktur zur Darstellung kommt.	43
Abbildung 36: Kokaingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokain-HCl-Päckchen sowie hypodenser Darstellung der Kokainbasen und ausgeprägten Artefakten ausgehend von einem Sandsack auf der linken Leiste.	44
Abbildung 37: Heroingewichtete Einzelschicht im DECT mit hyperdenser Darstellung der Kokainbasen und hypodenser Darstellung der Kokain-HCl-Päckchen sowie hypodenser Darstellung der Kokainbasen und ausgeprägten Artefakten ausgehend von einem Sandsack auf der linken Leiste.....	44
Abbildung 38: Vergleich der Steigungsfaktoren der Originalpacks ex-vivo nach Defäkation sowie der Originalpacks in-vivo am Patientenfall mit Darstellung des Median und des Range.	45
Abbildung 39: Vergleich der Dichtewerte der Originalpacks bei 70 keV ex-vivo nach Defäkation sowie der Originalpacks in-vivo am Patientenfall mit Darstellung des Median und des Range.	46
Abbildung 40: Vergleich der Ordnungszahlen der Originalpacks ex-vivo nach Defäkation sowie der Originalpacks in-vivo am Patientenfall mit Darstellung des Median und des Range.	46

Abbildung 41: Monochromatische DECT-Bilder bei 40 keV (a), 85 keV (b), 120 keV (c) und 140 keV (d) mit optimierter Darstellung der zystischen Struktur im Processus uncinatus (Pfeil) bei 40 keV durch die verbesserte Darstellung kontrastmittelaufnehmender Strukturen wie z.B. des Pankreasparenchyms bei niedrigen Energien.60

Abbildung 42: Schematische Darstellung für die automatische Dosismodulation mit Variieren der mA in Abhängigkeit von der durchstrahlten Körperpartie. Eine höhere Stromstärke und damit eine höhere Dosis ist aufgrund des hohen Knochenanteils im Bereich des Schultergürtels sowie des Beckens erforderlich ¹¹³.61

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die analysierten Proben mit Angabe der Suchtmittelkonzentration sowie der verwendeten Streckmittel.....	20
Tabelle 2: Übersicht über die analysierten Proben mit Angabe der Suchtmittelkonzentration, der verwendeten Streckmittel sowie der Probenkompression.	22
Tabelle 3: Übersicht über die Anzahl, den Inhalt (Suchtmittel, Konzentration, Streckmittel) und den Zustand der Packs der Kasuistik nach Defäkation.....	24
Tabelle 4: Scanparameter im Rahmen der Experimente sowie der Kasuistik aus dem Innenstadt-Klinikum der Universität München.....	25
Tabelle 5: Übersicht über die Ergebnisse der analysierten Proben vor Kompression mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.	29
Tabelle 6: Übersicht über die Ergebnisse der analysierten Proben nach Kompression mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.	31
Tabelle 7: Übersicht über die Ergebnisse der experimentellen Packs ex-vivo mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.	35
Tabelle 8: Übersicht über die Ergebnisse der experimentellen Packs am Schweinmodell in-situ mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.	37
Tabelle 9: Übersicht über die Ergebnisse der Originalpacks ex-vivo nach Defäkation mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.	42
Tabelle 10: Übersicht über die Ergebnisse der Originalpacks am Patientenfall in-vivo mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.	45
Tabelle 11: Übersicht über die Ergebnisse der Stuhlanalysen am Patientenfall in-vivo mit Darstellung der Steigungsfaktoren, der Dichtewerte bei 70 keV sowie der atomaren Ordnungszahlen.	47
Tabelle 12: Übersicht über die in der Literatur beschriebenen Verläufe spektraler Kurven verschiedener Substanzen, Körperflüssigkeiten und Gewebearten.	49
Tabelle 13: Übersicht über die Spannbreite der in der Literatur beschriebenen CT-Dichtewerte in HU von Kokain-HCl und Heroin.....	51
Tabelle 14: Übersicht über die in der Literatur beschriebenen, auf der Basis von DE-Daten generierten, atomaren Ordnungszahlen verschiedener Substanzen, Körperflüssigkeiten und Gewebearten.....	52

9 Abkürzungsverzeichnis

μ	Schwächungskoeffizient
κ	untersuchungsregionspezifischer Konversionsfaktor
bzgl.	bezüglich
ca.	circa
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
CTDI _{vol}	CT-Dosis-Index
DECT	Dual-Energy-CT
DEI	Dual-Energy-Index
DLP	Dosis-Längen-Produkt
d.h.	das heißt
E	effektive Dosis
ggf.	gegebenenfalls
GSI	Gemstone Spectral Imaging
HU	Hounsfield-Einheiten
i.d.R.	in der Regel
keV	Kiloelektronenvolt
kg	Kilogramm
Kokain-HCl	Kokain-Hydrochlorid
kV	Kilovolt
kVp	Röhrenspannung
mA	Milliampere
MDCT	Multidetektor-CT
mGy	Milligray
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomographie

mSv..... Millisievert
NNewton
PPascal
PACS Picture Achiving and Communication System
r.....Radius
ROI.....Region of Interest
s.....Sekunde
SECT Single-Energy-CT
SF Steigungsfaktor
v.a. vor allem
VMSI virtuell monochromatische DE-Aufnahme
u.a.....unter anderem
u.U. unter Umständen
z.B.....zum Beispiel
z.T..... zum Teil
 Z_{eff} atomare Ordnungszahl

Eidesstattliche Versicherung

Wudy, Ramona

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,

dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Computertomographie beim Body-Packing: Differenzierung von Drogengebunden
mittels Dual-Energy-Computertomographie

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen 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.

München, 02.05.2019

Ort, Datum

Ramona Wudy

Unterschrift Doktorandin/Doktorand