

Aus dem
Universitätsklinikum Münster
Institut für Klinische Radiologie
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Walter Heindel

**Diagnostische Wertigkeit der hochauflösenden Niedrigdosis-CT im
Rahmen der 18F-FDG PET-CT des Ganzkörpers**

INAUGURAL – DISSERTATION

zur

Erlangung des doctor medicinae

der Medizinischen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von
Paul Hermann von Laer
aus Rüsselsheim

2010

Gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Wolfgang Schmitz

1. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. Kai-Uwe Jürgens

2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. med. Johannes Weßling

Tag der mündlichen Prüfung: 20.08.2010

Aus dem Institut für Klinische Radiologie des Universitätsklinikums Münster
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Walter Heindel
Referent: Priv.-Doz. Dr. med. Kai-Uwe Jürgens
Koreferent: Priv.-Doz. Dr. med. Johannes Weßling

Zusammenfassung

Diagnostische Wertigkeit der hochauflösenden Niedrigdosis-CT im
Rahmen der 18F-FDG PET-CT des Ganzkörpers
Paul Hermann von Laer

Zielsetzung: Die Daten der Computertomographie (CT) werden für die Schwächungskorrektur der mittels Fluor-18 markierter Deoxyglukose (18F-FDG) durchgeführten Positronenemissionstomographie (PET) und zur anatomischen Zuordnung der PET-Läsionen bei der kombinierten PET-CT des Ganzkörpers verwendet. Liegt zur PET-CT Untersuchung bereits eine aktuelle und in Normaldosistechnik durchgeführte CT-Untersuchung vor, ist eine CT-Diagnostik in Niedrigdosistechnik im Rahmen der kombinierten PET-CT ausreichend. Die vorliegende Studie untersucht die Anwendbarkeit der Niedrigdosis-CT zur Schwächungskorrektur, erfasst systematisch alle klinisch relevanten Befunde der hochauflösenden CT-Komponente und beinhaltet eine Subanalyse zur Nachweisbarkeit pulmonaler Rundherde im Rahmen der PET-CT des Ganzkörpers.

Patienten und Methoden: 243 Patienten (90 Frauen, 153 Männer; Durchschnittsalter 48,5 Jahre) mit dem klinischen Verdacht auf oder bereits bekannten malignen (N=197) und entzündlichen (N=46) Erkrankungen wurden in die Studie eingeschlossen. Sie erhielten eine PET-CT (Biograph Sensation 16, Siemens) des Ganzkörpers mit Niedrigdosis-CT Komponente (16x1,5 mm, 120 kV, 13-20 mAs, CareDose®). Die Datensätze der Niedrigdosis-CT wurden von zwei Radiologen im Konsensus ausgewertet, die PET-Auswertung erfolgte durch zwei Nuklearmediziner (Leonardo® Workstation). Zusätzlich erfolgte eine ergänzende systematische Auswertung der Niedrigdosis-CT hinsichtlich der pulmonalen Rundherde mittels Größenkategorisierung und Bestimmung des jeweiligen Anteils der FDG-positiven Rundherde an der Gesamtzahl der Rundherde. Außerdem erfolgten eine Bestimmung des SUV der stoffwechselaktiven Rundherde sowie eine symmetrische Auflistung der Lungenmetastasen bzw. metastasenverdächtigen Rundherde, die in der PET keine oder nur eine geringfügige Stoffwechselaktivierung aufwiesen.

Ergebnisse: Alle Datensätze der Niedrigdosis-CT erlaubten die Schwächungskorrektur im Rahmen der kombinierten PET-CT. Die Auswertung der Niedrigdosis-CT zeigte insgesamt 777 Befunde; davon entfielen auf die Thoraxorgane 458 Befunde, auf das Abdomen 152 Befunde, das Skelettsystem 117, den Kopf 27, den Hals 19 Befunde und die untere Extremität 4 Befunde. In einer Subanalyse wurden Lungenrundherde mit einem Durchmesser ≤ 5 mm (N=94), zwischen 6 und 10 mm Durchmesser (N=45) und ≥ 10 mm Durchmesser (N=3) nachgewiesen; im klinischen Kontext wurden die Herde bei 9 Patienten als Lungenmetastasen gewertet, ohne dass sie in der PET-Komponente nachweisbar waren.

Schlussfolgerung: Die Niedrigdosis-CT erlaubt die Schwächungskorrektur im Rahmen der kombinierten PET-CT. Da mit der Niedrigdosis-CT auch klinisch wichtige Befunde, insbesondere metastasensuspekte pulmonale Rundherde, erhoben werden können, wird die ergänzende Auswertung der Niedrigdosis-CT Komponente im Rahmen der PET-CT des Ganzkörpers empfohlen. Die Niedrigdosis-CT kann als Teil des PET-CT-Untersuchungsprotokolls, zum Beispiel bei Follow-up-Untersuchungen und bei pädiatrischen Patienten in Erwägung gezogen werden.

Tag der mündlichen Prüfung: 20.08.2010

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	1
1.1	CT	1
1.2	PET	3
1.3	PET-CT	4
1.3.1	Überblick	4
1.3.2	Ablauf einer PET-CT-Untersuchung und Standardprotokolle	5
1.3.3	Artefakte	7
1.4	Diagnostik von Lungenrundherden	8
1.4.1	Definition und Häufigkeit von Lungenrundherden	8
1.4.2	Differentialdiagnose von Lungenrundherden	8
1.4.3	Dignitätsbestimmung	9
1.4.4	Lungenrundherddiagnostik mit CT	10
1.4.5	Lungenrundherddiagnostik mit PET	12
1.4.6	Lungenrundherddiagnostik mit PET-CT	13
2	<i>Zielsetzung</i>	14
3	<i>Patienten und Methoden</i>	15
3.1	Patienten	15
3.1.1	Einschluss- und Ausschlusskriterien	15
3.1.2	Geschlechterverhältnis und Durchschnittsalter	15
3.1.3	Grunderkrankung und Untersuchungsindikation	15
3.2	Untersuchungsprotokoll der PET-CT-Untersuchung	18
3.2.1	Ablauf der Untersuchung	18
3.2.2	Untersuchungsparameter	20
3.2.3	Rekonstruktion der Bilddatensätze	21
3.3	Datenauswertung	22
3.3.1	Auswertungsbogen	22
3.3.2	Auswertung der Befunde	22
4	<i>Ergebnisse</i>	24
4.1	Auswertung der Befund der Niedrigdosis-CT	24
4.1.1	Gesamtbefunde	24
4.1.2	CT-Schädel	24
4.1.3	CT-Hals	25

4.1.4	CT-Thorax	26
4.1.5	Abdomen	28
4.1.6	Untere Extremität	30
4.1.7	Achsen- und Beckenskelett	30
4.2	Lungenbefunde in der Niedrigdosis-CT	32
4.2.1	Größenverteilung der Lungenrundherde	32
4.2.2	Anteil der PET-positiven Lungenläsionen	33
4.2.3	Detektion von Lungenmetastasen durch die Niedrigdosis-CT	35
5	<i>Diskussion</i>	38
5.1	Vorteile der PET-CT gegenüber separater PET und CT	38
5.2	Diskussion der Methode	39
5.3	Diskussion der Ergebnisse	40
5.3.1	Gesamtergebnisse	40
5.3.2	Niedrigdosis-CT-Befunde im Thorax	41
5.3.3	Niedrigdosis-CT-Befunde des Abdomens	44
5.3.4	Niedrigdosis-CT-Befunde Schädel, Hals, untere Extremität und Skelett	45
5.4	Einsatzmöglichkeiten der Niedrigdosis-CT im Rahmen der PET-CT	46
5.5	Empfehlung der Auswertung der Niedrigdosis-CT durch Radiologen	47
5.6	Limitationen dieser Arbeit	47
5.7	Fazit	48
6	<i>Literaturverzeichnis</i>	50
7	<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	68
8	<i>Tabellen- und Abbildungsverzeichnis</i>	70
9	<i>Lebenslauf</i>	73
10	<i>Danksagung</i>	74

1 Einleitung

1.1 CT

Die Computertomographie (CT) wurde 1967 von dem englischen Physiker Hounsfield entwickelt und Anfang der 1970er Jahre als Schnittbildverfahren in die klinische Diagnostik eingeführt. Im Gegensatz zur konventionellen Röntgenaufnahme wird bei der CT eine überlagerungsfreie, schichtweise Darstellung der Organe erreicht. Die weitere technische Entwicklung führte Anfang der 1990er Jahre zur Spiral-CT und ab 1998 zur Mehrzeilen-Spiral-CT, wodurch eine immer höhere räumliche Auflösung bei gleichzeitig schnellerer Untersuchung größerer Untersuchungsvolumina möglich wurde (65, 82).

Das Aufnahmeprinzip der Spiral-CT besteht darin, den Patienten mit exakt definierter Geschwindigkeit durch ein Messfeld zu bewegen, um welches die Röntgenröhre und ein gegenüberliegender Detektor auf einer Kreisbahn rotieren und dabei Röntgenstrahlung aussenden bzw. die Schwächung der Röntgenstrahlung messen. Dadurch ergibt sich im klinischen Einsatz für Röntgenröhre und Detektor eine spiralförmige Bahn um die Längsachse des Patienten. Die im Strahlendetektor gemessenen Dichteminderungen werden von einem Computer zu Volumenelementen des Körpers mit jeweils bestimmter Dichte (Voxel) umgerechnet und dann zu einem Schnittbild zusammengefügt. Die errechneten Dichtewerte werden in Hounsfield-Einheiten angegeben (65).

Die Aufnahmeparameter der Spiral-CT bedingen die Strahlendosis der Untersuchung und beeinflussen die diagnostische Bildqualität. Sie werden für die jeweilige Untersuchung und klinische Fragestellung sowie die Körpermaße des Patienten optimiert. Die Röhrenspannung (kV) bestimmt die maximale Energie der von der Röntgenröhre emittierten Röntgenquanten und reguliert damit die Härte der Röntgenstrahlung, d.h. die Durchdringungsfähigkeit durch das Gewebe. Der Röhrenstrom (mA) regelt die Menge der von der Röntgenröhre pro Zeit

emittierten Röntgenquanten. Das Produkt aus Röhrenstrom und Röhrenrotationszeit in Sekunden ist der mAS-Wert, der proportional zu der Strahlendosis während einer Rotation ist. Die Schichtkollimation oder primäre Einblendung bestimmt die Breite des Fächerstrahls und somit die räumliche Auflösung in der Patientenlängsachse. Das Verhältnis von primärer Einblendung und Tischvorschub pro Röhrenumdrehung wird als Pitch (-Faktor) bezeichnet (42, 65).

Die CT-Diagnostik ist für einen Großteil (47%) der kollektiven effektiven medizinischen Strahlendosis verantwortlich, obwohl sie nur einen geringen Anteil (6%) der radiologischen Untersuchungen darstellt (18). Da die Anzahl an CT-Untersuchungen steigt, ist von einer weiter zunehmenden Strahlenbelastung durch die CT auszugehen (18, 88, 101). Aus diesen Gründen sollten Möglichkeiten zur Dosisreduktion so konsequent wie möglich ausgenutzt werden, aber auch die klinische Indikationsstellung zu jeder Untersuchung entsprechend der Maßgabe der Röntgenverordnung (RöV) kritisch geprüft werden (ALARA-Prinzip). Generell sollten Röhrenstrom und Röhrenspannung an die Körpermaße des Patienten und die Untersuchungsindikation individuell angepasst werden. Außerdem bietet die Mehrzeilen-Spiral-CT technische Möglichkeiten zur Dosisreduktion (61): diese resultiert aus der besseren Ausnutzung der Röntgenstrahlung durch die Verwendung von mehrzeiligen Detektoren. Zudem sind durch die Entwicklung neuer Detektoren auf Keramik- und Halbleiterbasis, die gegenüber den herkömmlichen Xenondetektoren ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis bieten, Niedrigdosis-CT Untersuchungen möglich (43). Sie können insbesondere in anatomischen Regionen mit hohen Kontrasten (z.B. Lungenparenchym/Luft) eingesetzt werden. Für die Niedrigdosis-CT-Untersuchung zur Früherkennung des Bronchialkarzinoms wird eine effektive Dosis von 0,3 mSv angegeben, die vergleichbar mit einer Röntgen-Thoraxübersichtsaufnahme in zwei Ebenen ist (34). Bei den Untersuchungen in Niedrigdosis-Technik muss ein erhöhtes Bildrauschen berücksichtigt werden. Die Detektion von Lungenrundherden wird kaum beeinträchtigt, allerdings wird eine differenzierte Beurteilung von Mediastinum, Oberbauch und Thoraxwand erschwert. Eine weitere Möglichkeit die Strahlendosis zu reduzieren, bieten körperprofilabhängige Echt-

zeit-Dosismodulationen. Diese modulieren den Röhrenstrom in Abhängigkeit vom aktuell untersuchten Körperquerschnitt. So kann die diagnostische Bildqualität bei geringerer Gesamtstrahlendosis optimiert werden (42, 55, 56, 61).

1.2 PET

Die Positronenemissionstomographie (PET) steht seit etwa 30 Jahren der klinischen Diagnostik zur Verfügung und ist ein nuklearmedizinisches Schnittbildverfahren zur funktionellen Bildgebung. Sie findet ihre klinisch-diagnostische Hauptanwendung bei onkologischen Fragestellungen sowie ferner in der nicht-invasiven neurologischen und kardiologischen Bildgebung (27, 70).

Für die PET-Diagnostik werden als Strahlenquellen (Tracer) radioaktiv markierte Moleküle, wie zum Beispiel mit Fluor-18 markierte Deoxyglukose (^{18}F -FDG), verwendet. Diese Tracer werden nach intravenöser Applikation von den Zellen des Körpers entsprechend ihres jeweiligen Glukosebedarfs aufgenommen. Durch diese Anreicherungen können stoffwechselaktive Gewebe, wie Hirngewebe, Muskulatur, Entzündungsherde und die Mehrzahl der malignen Tumore dargestellt bzw. lokalisiert werden. Die FDG-PET verdankt ihren diagnostischen Wert in der onkologischen Bildgebung dem gesteigerten Glukosemetabolismus vieler maligner Tumore: diese nehmen aufgrund ihres hohen Glukosebedarfs und der Überexpression von Glukosetransportern verstärkt Glukose auf. Da sie FDG nicht verstoffwechseln, reichern es diese Tumore besonders stark an (sog. „metabolic trapping“) (45). Diese Läsionen grenzen sich gegenüber weniger Glukose-anreichernden Geweben kontrastreich ab. FDG-PET wird unter anderem für die Diagnostik von malignen Kopf-Hals-Tumoren, Lungentumoren, Pankreastumoren, kolorektalen Karzinomen, malignen Lymphomen und Melanomen verwendet (27, 36, 70, 71, 91).

Die räumliche Auflösung der PET-Scanner liegt gegenwärtig bei etwa 4 mm (104) und ermöglicht die Detektion stoffwechselgesteigerter Läsionen dieser Größenordnung. Die genaue Zuordnung einer pathologischen Anreicherung zu

einer anatomischen Struktur gestaltet sich jedoch häufig schwierig, da die PET die Morphologie nur kontrastarm darstellt. Die Befunde werden daher mit Schnittbildern aus morphologischen Verfahren (CT, MRT (Magnetresonanztomographie)) korreliert (3, 27, 70, 71, 107). Ursachen für falsch-positive Befunde in der FDG-PET liegen in der verstärkten Anreicherung von FDG in Gewebe mit physiologisch hoher Glukoseaufnahme. Dies kann bei lymphatischem Gewebe (Waldeyerscher Rachenring), im Gastrointestinaltrakt, bei der Skelettmuskulatur und dem Herzmuskel vorkommen. Diagnostische Schwierigkeiten ergeben sich auch bei Beurteilung der Nieren sowie der ableitenden Harnwege, da FDG renal eliminiert wird und deshalb dort in hoher Konzentration vorliegt (26). Zur Differenzierung entzündlicher und maligner Prozesse kann die Bestimmung des sog. standardized uptake value ($SUV = \frac{\text{Radioaktivität (kBq)} / \text{Gewebevolumen (ml)}}{\text{injizierte Dosis (kBq)} / \text{Körpergewicht (g)}}$) beitragen (83). Allerdings weist der SUV durch verschiedene Körpermaße, durch die Zeitspanne zwischen der Injektion des Tracers und der PET-Aufnahme sowie durch die Höhe des Plasmaglukosespiegels eine hohe Schwankungsbreite auf (29, 67, 99).

1.3 PET-CT

1.3.1 Überblick

Die durch Townsend und Cherry entwickelte PET-CT wurde im Jahre 2001 erstmals klinisch eingesetzt: sie kombiniert die beiden etablierten diagnostischen Verfahren Positronenemissionstomographie (PET) und Computertomographie (CT) baulich in einem Gerät. Dadurch ist eine neue diagnostische nicht-invasive bildgebende Modalität entstanden, die die Synergien von PET und CT für die Diagnose, das Staging und die Therapiekontrolle maligner Erkrankungen nutzt (13, 14, 16, 104).

Die integrierte PET-CT erlaubt die präzise anatomische Lokalisation von stoffwechselgesteigerten Läsionen in den mit identischer Patientenposition unmittelbar vor oder im Anschluss an die PET gewonnenen CT-Schnittbildern ohne zusätzliche retrospektive Koregistrierungs-Algorithmen. Die Schwächungskor-

rektur der PET-Daten kann anhand dieser CT-Daten durchgeführt werden, so dass die bisher übliche zeitintensive zusätzliche Schwächungsmessung mit radioaktiven Quellen entfällt. Dadurch kann die Untersuchungszeit der PET-CT im Vergleich zur PET um 40% verkürzt werden. Auch der diagnostische Einsatz von radioaktiven Markern mit kurzer Halbwertszeit (zum Beispiel ^{11}C -Cholin) wird durch die kürzere Untersuchungszeit der integrierten PET-CT in der klinischen Routine möglich (20, 57, 69).

Die Untersuchungsprotokolle der kombinierten PET-CT Untersuchung unterscheiden sich hinsichtlich der CT-Komponente (14, 16) und werden entsprechend der jeweiligen klinischen Fragestellung, der Histologie des vermuteten oder bekannten Primärtumors, der Verfügbarkeit zeitnah erfolgter CT-Voruntersuchungen sowie der Maßgaben der Röntgenverordnung adaptiert. Im Hinblick auf den Strahlenschutz wird in bestimmten klinischen Fällen ausschließlich eine native Niedrigdosis-CT anstelle der Kontrastmittel (KM)-gestützten Normaldosis-CT durchgeführt. Der diagnostische Wert dieser Niedrigdosis-CT im Rahmen der kombinierten PET-CT ist bislang nicht systematisch untersucht worden. Im Folgenden sollen der standardisierte Ablauf einer PET-CT-Untersuchung sowie die an unserer Institution verwendeten Untersuchungsprotokolle beschrieben werden.

1.3.2 Ablauf einer PET-CT-Untersuchung und Standardprotokolle

Eine PET-CT-Untersuchung beinhaltet folgende Untersuchungsschritte: zunächst wird ein CT-Topogramm des Patienten angefertigt, anhand dessen die anatomischen Aufnahmebereiche der CT und der PET festgelegt werden. Dann folgen üblicherweise zunächst eine native CT-Untersuchung (Abbildung 1A) in Niedrigdosistechnik des gesamten Untersuchungsbereiches, zum Beispiel von der Schädelbasis bis zur Mitte beider Oberschenkel, und anschließend die PET-Untersuchung. Die CT-Daten werden für die Schwächungskorrektur der PET verwendet. Bei entsprechender klinischer Indikation schließt sich eine KM-gestützte Normaldosis-CT der gewünschten Körperregion, zum Beispiel des

Thorax oder des Thorax und Abdomens an. Zuletzt werden die korrigierten PET-Daten (Abbildung 1B) mit den CT-Daten fusioniert und ergeben den PET-CT-Datensatz (Abbildung 1C). Aufgrund der unterschiedlichen diagnostischen Anforderungen an die CT-Komponente lassen sich vier unterschiedliche PET-CT-Protokolle unterscheiden:

Protokoll 1: *Niedrigdosis-CT ohne KM + PET*

Bei diesem Protokoll wird nach dem Topogramm eine Niedrigdosis-CT des Ganzkörpers ohne KM-Gabe durchgeführt. Sie dient der Schwächungskorrektur und der Zuordnung der PET-Befunde zu anatomischen Strukturen. Im Anschluss folgt die PET-Untersuchung. Auf eine KM-gestützte CT mit normaler Dosis wird verzichtet. Man erhält qualitativ hochwertige PET-Bilder ohne KM-induzierte Artefakte. Dieses Protokoll kommt bei Patienten infrage, die im Vorfeld der PET-CT bereits eine CT-Schnittbilddiagnostik erhalten haben. Kuehl et al. empfehlen dieses Protokoll im Rahmen von follow-up-Untersuchungen mit der PET-CT, wenn ein initiales PET-CT-Staging mit KM-gestützter CT durchgeführt wurde. Wurden nephrotoxische Chemotherapeutika verwendet, empfehlen diese Autoren, mit Hinblick auf eine Nephroprotektion auf intravenöse KM zu verzichten (72). Ohne die Verwendung von intravenösem KM können sich jedoch bei der Zuordnung fokaler Stoffwechselakzentuierungen zu anatomischen Strukturen insbesondere im Lungenhilus, im Dünndarm und Dickdarm sowie im kleinen Becken diagnostische Probleme ergeben. Hier ist im Zweifelsfalle der Vergleich mit Voraufnahmen erforderlich.

Protokoll 2: *KM-gestützte CT (Standarddosis) + PET*

Bei diesem Protokoll folgt im Anschluss an das CT-Topogramm eine KM-gestützte CT in Normaldosis-Technik, die zur Schwächungskorrektur der anschließend erstellten PET-Bilder benutzt wird (63). Dieses Vorgehen nutzt die methodischen Vorteile der integrierten Bildgebung der PET-CT am besten, da eine diagnostisch optimale Bildfusion sowie separate Auswertungen beider Modalitäten in vollem Umfang möglich sind.

Protokoll 3: *Niedrigdosis-CT + PET + KM-gestützte CT eines Körperabschnitts (Standarddosis)*

Dieses Protokoll entspricht Protokoll 1 mit zusätzlicher KM-gestützter CT eines Körperabschnitts in Standarddosis-Technik. Es kommt zur Anwendung, wenn bereits CT-Voraufnahmen vorliegen, aber die zusätzliche Untersuchung eines Körperabschnitts von besonderem diagnostischem Interesse ist.

Protokoll 4: *Niedrigdosis-CT + PET + KM-gestützte Ganzkörper-CT*

Der Ablauf dieses Protokolls erfolgt zunächst wie bei Protokoll 1, anschließend wird eine ergänzende KM-gestützte CT des Ganzkörpers in Normaldosis-Technik durchgeführt. Durch diese zeitliche Reihenfolge werden KM-induzierte Artefakte in der PET vollständig vermieden; diese können jedoch auch durch geeignete CT-Protokolle minimiert werden (63). Die Gesamtstrahlendosis ist gegenüber Protokoll 2 um den Betrag der Dosis der Niedrigdosis-CT erhöht. Außerdem ist der zeitliche Aufwand für die gesamte Untersuchung durch die zusätzliche Niedrigdosis-CT höher. Aus den beiden letztgenannten Gründen kommt dieses Konzept in der klinischen Routine kaum zur Anwendung.

1.3.3 Artefakte

Bei der PET-CT können durch verschiedene Mechanismen Artefakte in den fusionierten Datensätzen entstehen: einerseits kommt es durch Bewegung des Patienten zu Fehlern in der Koregistrierung. Andererseits können Materialien mit hoher Röntgendichte, wie z.B. Metalle und intravenös oder oral applizierte Kontrastmittel, Artefakte in der Schwächungskorrektur erzeugen. Prinzipiell kann jeder metallische Gegenstand im Körper (Katheter, Schrittmacher, Prothesen) Artefakte verursachen (49, 66). Zur Vermeidung von Bewegungsartefakten muss die Positionierung des Patienten in beiden Untersuchungsteilen (CT und PET) identisch sein. Das Zwerchfell muss durch geeignete Atemprotokolle in beiden Untersuchungsteilen eine möglichst identische Position aufweisen. Dies gelingt gut, indem man die CT-Untersuchung in normaler Ausatemungsstellung bei angehaltenem Atem durchführt, oder den Patienten frei (mit bewusst mäßi-

ger Atemexkursion) atmen lässt. Während der PET-Untersuchung sollte der Patient dann ebenso frei atmen (47, 48, 50, 103). Intravenöse KM-Gaben können prinzipiell bei der CT-basierten Schwächungskorrektur zu Artefakten führen, jedoch wird der diagnostische Wert der PET-CT bei optimiertem Akquisitionsprotokoll durch intravenöse KM kaum beeinträchtigt (110). Wasserlösliche orale KM sind zusätzlich zu empfehlen, da diese nur zu geringfügigen Artefakten führen (37). Bei entsprechendem Verdacht sollten die nicht korrigierten PET-Bilder zum Ausschluss von Artefakten hinzugezogen werden (14).

1.4 Diagnostik von Lungenrundherden

1.4.1 Definition und Häufigkeit von Lungenrundherden

Ein Lungenrundherd ist eine annähernd runde, im Durchmesser weniger als 3 cm messende, von Lungenparenchym umgebene Läsion. Als Raumforderung bezeichnet man Parenchym-läsionen in der Lunge, die größer als 3 cm sind (7, 85, 87, 97, 100). Vor Einführung der Computertomographie beschränkte sich der Nachweis von Lungenrundherden primär auf die projektionsradiographische Thoraxübersichtsaufnahme. Pro Jahr erfordern in den USA etwa 150.000 der zufällig entdeckten Lungenrundherde eine weitere Abklärung (86). Durch die wesentlich höhere räumliche Auflösung und den zunehmenden klinischen Einsatz der CT wurden in der vergangenen Dekade immer mehr Lungenrundherde unklarer Dignität nachgewiesen: so detektierten verschiedene Screening-Untersuchungen mittels Niedrigdosis-CT an Risikopatientenkollektiven (Raucher über 50 Jahre) Lungenrundherde bei fast der Hälfte aller Patienten (31, 59, 96).

1.4.2 Differentialdiagnose von Lungenrundherden

Die Differentialdiagnose von Lungenrundherden ist umfangreich: hinsichtlich des Ausbreitungsmusters werden solitäre gegenüber multiplen Läsionen und bezüglich der Genese werden neoplastische gegenüber entzündlichen, infektiösen, vaskulären und traumatischen Läsionen differenziert. Bei solitären Läsio-

nen reicht die Differentialdiagnose von malignen Prozessen, z.B. pulmonalen Metastasen, einem primären Bronchialkarzinom und anderen malignen Tumoren (z.B. Karzinoid, Sarkom), über benigne Primärtumore (z.B. Papillom, Fibrom) bis hin zu dysontogenetischen Tumoren (z.B. Hamartom, Endometriose). Weiterhin sind differentialdiagnostisch Fehlbildungen (bronchogene Zysten, Sequester), vaskuläre Läsionen (arteriovenöse Malformationen, Aneurysmata von Pulmonalarterien und -venen) und pulmonale Infektionen abzugrenzen.

Beim Nachweis multipler Läsionen in beiden Lungenflügeln umfasst die Differentialdiagnose neben Lungenmetastasen zusätzlich auch pulmonale Manifestationen maligner Lymphome und des Kaposi Sarkoms. Hier sind aber auch nichtmaligne Läsionen wie intrapulmonale Lymphknoten, fokale Infektionen, Lungenabszesse, postentzündliche Granulome und Manifestationen von Systemerkrankungen (z.B. Berylliose, Silikose) abzugrenzen (30, 87, 94, 97, 98).

1.4.3 Dignitätsbestimmung

Bei Lungenrundherden ist die Dignitätsbestimmung die zentrale diagnostische Herausforderung. Klinische Parameter und anamnestische Angaben der/des Patientin/Patienten sind geeignet, das individuelle Risiko für die Malignität eines Rundherdes abzuschätzen: das Risiko steigt mit langjährigem Nikotinkonsum, steigendem Lebensalter, neu aufgetretenen Hämoptysen und dem Vorliegen einer malignen Erkrankung. Das Spektrum an diagnostischen Maßnahmen reicht von den bildgebenden Verfahren wie Röntgenaufnahmen, CT sowie PET bzw. PET-CT (die MRT ist derzeit noch nicht klinisch etabliert) bis zu invasiven Maßnahmen wie der transbronchialen Biopsie, der CT-gesteuerten Punktion, der videoassistierten Thorakoskopie und der diagnostischen Segmentresektion bzw. Lobektomie. In der CT-Diagnostik geben morphologische Charakteristika wichtige Hinweise auf die Dignität einer Läsion: so steigt mit zunehmender Größe die Malignitätswahrscheinlichkeit stark an. Zusätzliche Informationen wie Randbegrenzung, Verkalkungsmuster, Wachstumsrate und Kontrastmittelanreicherung helfen bei der Risikoabschätzung, können jedoch im Einzelfall invasive Verfahren und die damit verbundene Möglichkeit zur Histologiegewinnung nicht

ersetzen. Um die Diagnostik für den Patienten möglichst schonend und effizient zu gestalten, wurden in der Literatur verschiedene diagnostische Algorithmen vorgeschlagen (59, 78, 85, 86, 96, 97, 98).

1.4.4 Lungenrundherddiagnostik mit CT

Die CT ist das derzeit sensitivste Verfahren zum Nachweis pulmonaler Rundherde und eignet sich damit für die frühe Detektion und Lokalisation von Lungenmetastasen und primären malignen Lungentumoren. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung kann es Rundherde mit einer Größe ≤ 2 mm nachweisen (12, 58, 79, 97, 107). Morphologische Details der Rundherde wie der Nachweis intraläsionaler Verkalkungen, einer Randbegrenzung sowie die Röntgendichte und Größe der Rundherde können bei der Unterscheidung zwischen benignen und malignen Lungenrundherden helfen (97, 98): im Falle des Nachweises von Verkalkungen gelten die Verkalkung des ganzen Herdes, dichte Kalkansammlungen im Zentrum sowie Rundherde mit schollenartigen Verkalkungen als gutartig. Andererseits werden stippchenartige Ausziehungen und exzentrisch angeordnete Verkalkungen eher malignen Erkrankungen zugeordnet. Auch können Metastasen von Osteosarkomen durch Osteoidbildung Verkalkungen vortäuschen und so fälschlicherweise für benigne gehalten werden. Die sog. corona radiata gilt als Hinweis auf Malignität; strahlenförmige Ausläufer des Herdes in das umliegende Lungenparenchym werden als sog. Pleurafinger bezeichnet. Eine glatte Randbegrenzung des Lungenrundherdes spricht für Benignität, Unschärfe gilt als Hinweis auf einen malignen Prozess (86, 97, 112, 113). Lungenrundherde mit einem hohen Fettanteil, detektierbar durch die fettisointense Dichte in der Thorax-CT, entsprechen mit hoher Wahrscheinlichkeit Hamartomen. Bei arteriovenösen Fisteln sind kräftige Kontrastmittelanreicherungen sowie die beteiligten Gefäße darstellbar. Ein Aerobronchogramm und Pseudokavitationen sind häufiger bei malignen (30%) als bei benignen (5%) Läsionen nachzuweisen (97). Bei Lungenrundherden steigt die Wahrscheinlichkeit der Malignität mit der Größe des Herdes: so ist der überwiegende Teil der Rundherde ≥ 2 cm maligne (87, 97, 98). Außerdem ist die Wachstumsge-

schwindigkeit des Volumens der Lungenrundherde, die durch CT-Verlaufs-kontrolluntersuchungen (vorzugsweise in Niedrigdosis-Technik) dokumentiert werden kann, ein Dignitätskriterium: bei malignen Läsionen wird eine Volumenverdopplung innerhalb von 30 bis 400 Tagen angenommen. Falls das Volumen eines Rundherdes im Verlauf von zwei Jahren konstant bleibt, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer gutartigen Läsion auszugehen (97, 109). Die computergestützte automatische Volumenmessung bietet insbesondere bei kleinen Rundherden (< 10 mm) die Möglichkeit einer exakten und reproduzierbaren Volumenbestimmung; somit lassen sich auch bei kleinen Rundherden geringe Größenzunahmen im Verlauf detektieren (79). Bei Lungenrundherden größer als drei Zentimeter Durchmesser ist aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit eines malignen Befundes eine chirurgische Therapie indiziert (87, 97, 98).

Lungenmetastasen imponieren in der CT-Schnittbildgebung typischerweise als scharf begrenzte, runde und weichteilisdense Läsionen. Sie entstehen durch hämatogene Aussaat von Tumorzellen und sind daher meist multipel und bilateral lokalisiert. Aufgrund der verstärkten Durchblutung der basalen Lungenabschnitte liegt ein großer Teil der Metastasen in den basalen und peripheren Abschnitten der Lunge. Der Nachweis von Lungenmetastasen bedeutet ein sog. M1-Stadium (nach TNM) und beeinflusst damit die Therapiestratifizierung maligner Erkrankungen (30, 35). Die entsprechend den Vorgaben der Leitlinien durchgeführte Mehrzeilen-Spiral-CT des Thorax, d.h. mit geringer Schichtdicke und überlappender Bildrekonstruktion, erlaubt eine sehr sensitive Detektion von Lungenrundherden (41). Auch bei reduzierter Strahlendosis (Niedrigdosis-CT) ist die Sensitivität für die Detektion für Rundherde > 5 mm nahezu unverändert, sinkt allerdings etwas bei Rundherden ≤ 5 mm (30, 34, 59, 96). Die Niedrigdosis-CT hat sich in Studien als geeignet erwiesen, Tumore bei Rauchern in frühen Stadien zu diagnostizieren und einer adäquaten Therapie zuzuführen. Das Risiko fortgeschrittener Lungentumore und die Anzahl von Todesfällen durch Lungentumore wurden durch dieses Vorsorgeprogramm jedoch nicht signifikant

gesenkt. Daher wird dieses Screening weiterhin nur in klinischen Studien empfohlen (8, 32, 33).

1.4.5 Lungenrundherddiagnostik mit PET

Der Nutzen der FDG-PET in der Rundherddiagnostik konnte in einigen Studien belegt werden. Für die Unterscheidung zwischen malignen und benignen Rundherden wurden eine Sensitivität bis zu 96% und eine Spezifität bis zu 78% berichtet (14, 21, 54, 60, 77). Besonders hilfreich ist der Einsatz der FDG-PET bei Patienten mit unklarem CT-Befund und einer niedrigen Malignitätswahrscheinlichkeit, da in diesem Fall ein negativer PET-Befund die Malignitätswahrscheinlichkeit auf 1% senkt. Diese Patienten können mittels Thorax-CT (am sinnvollsten mittels Niedrigdosis-CT) im Verlauf kontrolliert werden und sind nicht dem Risiko invasiver diagnostischer Maßnahmen ausgesetzt (53, 87). Die FDG-PET eignet sich zudem zum nicht-invasiven Ausschluss bzw. Nachweis von Metastasen von Kopf-Hals Tumoren, des Bronchialkarzinoms, kolorektaler Karzinome, des malignen Melanoms und der malignen Lymphome (35, 105).

Allerdings gibt es bei der Beurteilung von Lungenrundherden mittels PET-Scanner verschiedene methodische Probleme. PET-Scanner der aktuellen Generation haben eine räumliche Auflösung von etwa 4 mm (104). Bei der Dignitätsbestimmung von Rundherden < 10 mm ermittelten Herder et al. eine Sensitivität von 93% und eine Spezifität von 77% (53, 60, 68). Die Spezifität der PET war jedoch gering, wenn im Patientenkollektiv viele entzündlich-bedingte Rundherde vorlagen, da entzündliche Erkrankungen, zum Beispiel Sarkoidose, Silikose und andere granulomatöse Erkrankungen und infektiöse Erkrankungen wie Tuberkulose oder Pilzinfektionen aufgrund der FDG-Aufnahme maligne Erkrankungen vortäuschen können (1, 9, 19, 52). Zum Nachweis maligner Rundherde empfehlen manche Autoren eine zweizeitige PET-Akquisition, da maligne Rundherde über einen längeren Zeitraum FDG anreichern als entzündliche Rundherde (1, 25, 80). Ein weiteres Problem ergibt sich bei Karzinoiden und

dem bronchoalveolären Karzinom, da diese kaum FDG anreichern und sich so dem Nachweis entziehen können (23, 39, 51, 62).

1.4.6 Lungenrundherddiagnostik mit PET-CT

Während für die Diagnostik von Lungenrundherden mit separat akquirierter PET (sog. stand-alone PET) und CT zahlreiche Studien (21, 31, 60, 96, 108) vorliegen, ist die diagnostische Wertigkeit der integrierten PET-CT bislang wenig untersucht. Eine aktuelle Arbeit von Kim et al. (68) vergleicht die Genauigkeit der PET-CT bei der Dignitätsbestimmung pulmonaler Rundherde mit separat akquirierter PET und CT - wobei die CT jedoch ohne intravenöse KM-Applikation erfolgte: für die PET-CT wird eine hohe Sensitivität von 97% und eine Spezifität von 85% angegeben. Diese Werte werden durch die Kombination der anatomischen und funktionellen Bildgebung erklärt, wobei sich die Sensitivität der CT (93%) und die Spezifität der PET (85%) ergänzen und so zu einer signifikant höheren diagnostischen Genauigkeit der PET-CT führen. Für Läsionen < 10 mm wurde eine Sensitivität und Spezifität von 100% errechnet, jedoch wurden in der Studie lediglich 42 Lungenrundherde ausgewertet. In einer weiteren Studie wurde die Genauigkeit der PET-CT mit KM-gestützter CT bei der Dignitätsbestimmung pulmonaler Rundherde untersucht und ebenfalls eine hohe Sensitivität (92%) und eine hohe rechnerische Spezifität (100%) ermittelt (83). Eine dritte Studie verglich die native PET-CT mit einer separaten dynamischen KM-gestützten CT bei 119 Patienten mit unklaren Lungenrundherden: auch hier wurde eine Überlegenheit der PET-CT in der Charakterisierung von Lungenrundherden beschrieben (111). Diese ersten Arbeiten zeigen die hohe diagnostische Genauigkeit der PET-CT bei der Charakterisierung unklarer pulmonaler Rundherde.

2 Zielsetzung

Die vorgelegte Arbeit evaluiert die diagnostische Wertigkeit der Niedrigdosis-CT im Rahmen der kombinierten ¹⁸F-FDG PET-CT des Ganzkörpers. Der Einsatz der PET-CT nimmt in den letzten Jahren stark zu und löst zunehmend die alleinige PET ab. Mehrere Studien haben den Vorteil der PET-CT in der Diagnostik maligner Erkrankungen gegenüber den Einzelmodalitäten PET und CT gezeigt (4, 5, 22, 76, 89, 95).

Für die PET-CT muss je nach klinischer Fragestellung ein geeignetes Untersuchungsprotokoll gewählt werden, das sich hinsichtlich der CT-Komponente (KM-gestützte Standarddosis-CT versus native Niedrigdosis-CT) unterscheidet. Beide CT-Datensätze können zur Schwächungskorrektur und zur anatomischen Zuordnung stoffwechselgesteigerter Läsionen verwendet werden. Bei Organen mit hohen Kontrasten führt die Dosisreduktion der Niedrigdosis-CT nicht zu einem substantiellen Verlust an Sensitivität, so dass sich kleine Lungenrundherde mit der Niedrigdosis-CT ebenso gut nachweisen lassen wie mit der Standarddosis-CT (34, 46, 93). Die Detektion und Dignitätsbeurteilung dieser Lungenrundherde hat eine hohe Bedeutung bei den Patienten, die mit einer onkologischen Fragestellung in der PET-CT untersucht werden, da es sich um Lungenmetastasen handeln kann. Für das Staging und die Therapiekontrolle ist das Vorhandensein von Lungenmetastasen (M1 nach TNM) von großer Bedeutung.

Ziel dieser Arbeit ist es, bei 243 Patienten, die mittels ¹⁸F-FDG PET-CT mit Niedrigdosis-CT-Komponente untersucht wurden, alle klinisch relevanten Befunde der Niedrigdosis-CT systematisch zu erfassen und zu dokumentieren. Von besonderem Interesse ist der Nachweis pulmonaler Rundherde anhand der Niedrigdosis-CT, die in einer gesonderten Auswertung betrachtet werden. Weiterhin wird geprüft, ob sich eine generelle Empfehlung für die Auswertung der Niedrigdosis-CT im Rahmen der kombinierten PET-CT ableiten lässt.

3 Patienten und Methoden

3.1 Patienten

3.1.1 Einschluss- und Ausschlusskriterien

Die vorliegende Studie basiert auf der retrospektiven Auswertung von Untersuchungsbefunden der kombinierten PET-CT: eingeschlossen wurden Patienten, die zwischen dem 24.10.2005 und dem 30.05.2007 eine PET-CT-Untersuchung mit Niedrigdosis-CT-Komponente am Universitätsklinikum Münster erhielten. Die 243 Patienten wurden aus der stationären Versorgung des Universitätsklinikums Münster sowie ambulant zugewiesen. Im angegebenen Untersuchungszeitraum erhielten neun Patienten mit maligner Grunderkrankung eine PET-CT-Verlaufskontrolle.

3.1.2 Geschlechterverhältnis und Durchschnittsalter

Von den 243 in die Studie eingeschlossenen Patienten waren 90 (37%) Frauen und 153 (63%) Männer. Das Durchschnittsalter der Patienten betrug 48,5 Jahre. Der jüngste Patient war zwei Monate alt, der älteste 90 Jahre. Das Durchschnittsalter der Männer betrug 51,3 Jahre im Vergleich zu 46,4 Jahren bei den weiblichen Patienten.

3.1.3 Grunderkrankung und Untersuchungsindikation

Grunderkrankung

Die Patienten in dieser Studie wiesen ein breites Spektrum an Grunderkrankungen auf: bei 197 Patienten lagen maligne Erkrankungen oder der klinische Verdacht auf eine maligne Erkrankung vor. 46 Patienten hatten entzündliche oder infektiöse Erkrankungen. Von den malignen Erkrankungen waren solide Tumore die häufigste Grunderkrankung (127 von 197 Patienten), 37 Patienten hatten nicht-solide Tumore. Bei 26 Patienten lag ein *cancer of unknown primary* (CUP), das heißt eine Tumorerkrankung mit unklarem Primärtumor, vor. Bei

weiteren sieben Patienten bestand klinischer Tumorverdacht. Bei den Patienten mit entzündlichen Erkrankungen waren ein Morbus Crohn (N=14) und Fieber unklarer Ursache (N=12) die häufigsten Erkrankungen (siehe Tabelle 1).

Grunderkrankung		Entzündliche Erkrankungen	
Maligne Erkrankungen	197		46
Gastrointestinale Tumore	40	Morbus Crohn	14
Colon- und Rektum-CA	13	HIV	3
Ösophagus-CA	11	Fieber unklarer Ursache, Fokussuche	12
Pankreas-CA	9	Sepsis	4
Magen-CA	5	Endokarditis	2
Hepatozelluläres-CA	1	Milzabszess	1
Mundboden-CA	1		
Klinischer Malignomverdacht	33	Herzklappenersatz	2
Cancer of Unknown Primary	26	Herzinsuffizienz	1
B-Symptomatik	2	Arteriitis Temporalis	1
Erhöhte Tumormarker (CEA, NSE)	2	SCLE	1
Unklare Raumforderung im Felsenbein	1	Kutaner Lupus erythematoses	1
Unklarer Mediastinaltumor	1	GvHR des Gastrointestinaltraktes	1
Unklare zerebrale Raumforderung	1		
Lymphome	31	Marfan-Syndrom	1
B-NHL	15	V. a. entzündlich bedingten thorakalen Querschnitt	1
Morbus Hodgkin	11	Chronische Wundheilungsstörung	1
Multiples Myelom	3		
T-NHL	1		
Lymphomatoide Granulomatose	1		
Gynäkologische Tumore	21		
Mamma-CA	13		
Chorion-CA	2		
Keimzelltumor	2		
Ovarial-CA	1		
Cervix-CA	1		
Endometrioides Cervix-CA	1		
Leiomyosarkom	1		
Dermatologische Tumore	15		
Malignes Melanom	15		
Knochentumore	15		
Ewing-Sarkom	7		
Langerhans-Zell-Histiozytose	3		
Osteosarkom	2		
Chondrosarkom	2		
Langerhans-Zell-Sarkom	1		
Lungentumore	12		
Bronchial-CA	10		
Verdacht auf Bronchial-CA	1		
Pleuramesotheliom	1		
Urologische Tumore	11		
Prostata-CA	4		
Nierenzell-CA	3		
Hodentumor	2		
Nephroblastom	1		
Urothel-CA	1		
Leukämien	6		
Akute lymphatische Leukämie	3		
Chronisch lymphatische Leukämie	2		
Akute myeloische Leukämie	1		
Sonstige Tumore	6		
Phäochromozytom	2		
Medulloblastom	1		
Tritontumor	1		
Akustikusneurinom	1		
Erdheim-Chester-Erkrankung	1		
Schilddrüse	4		
Papilläres Schilddrüsen-CA	2		
Follikuläres Schilddrüsen-CA	2		
Weichteiltumore	3		
Myelosarkom	1		
Weichteilsarkom	1		
Synovialsarkom	1		

Tabelle 1: Grunderkrankungen

Untersuchungsindikation

Die Indikation zur PET-CT-Untersuchung war bei 104 der 197 Patienten mit malignen Erkrankungen die Erstdiagnose und bei 93 Patienten eine Verlaufs- bzw. Therapiekontrolle maligner Erkrankungen. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Untersuchungsindikationen.

Untersuchungsindikation	
Maligne Erkrankungen	197
Erstdiagnose	104
Verlaufs- und Therapiekontrolle	93
Entzündliche Erkrankungen	46
Erstdiagnose	39
Verlaufskontrolle	7
Gesamt	243

Tabelle 2: Indikation der Untersuchung

3.2 Untersuchungsprotokoll der PET-CT-Untersuchung

3.2.1 Ablauf der Untersuchung

Die Patienten wurden im Rahmen des ärztlichen Aufklärungsgespräches mittels der im Institut für Klinische Radiologie sowie der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin verwendeten standardisierten Aufklärungsbögen über den Nutzen und die Risiken der CT-Untersuchung bzw. der PET-Untersuchung ausführlich informiert und erklärten in Schriftform ihr Einverständnis zu beiden Untersuchungen. Im Anschluss wurde den Patienten das Atemprotokoll für die CT-Untersuchung erläutert.

Vor der Untersuchung hielten die Patienten eine mindestens achtstündige Nahrungskarenz ein. Der aktuelle Blutzuckerwert wurde vor intravenöser Applikation des radioaktiven Tracers kontrolliert; dieser sollte vor der PET-CT-Untersuchung unter 120 mg/dl liegen, um eine homogene Tracer-Aufnahme zu gewährleisten. Bei Diabetikern wurden ein Nüchtern-Blutzuckerwert bis 150 mg/dl akzeptiert. Die Aktivität des applizierten Tracers wurde an das Körpergewicht des jeweiligen Patienten angepasst: Erwachsene erhielten eine Dosis von 4 MBq ¹⁸F-FDG pro kg Körpergewicht, während Kindern 3 MBq ¹⁸F-FDG pro kg Körpergewicht appliziert wurden.

Nach intravenöser Applikation des Tracers wurden die Patienten angewiesen, sich möglichst wenig zu bewegen und in einem Liegesessel bis zum Beginn der PET-CT-Untersuchung zu ruhen, um auf diese Weise die Aufnahme des Tracers in die Muskulatur möglichst gering zu halten und Muskelartefakte zu vermeiden. Außerdem wurden die Patienten angewiesen, bis zum Beginn der Untersuchung möglichst wenig zu sprechen, damit die Kehlkopfmuskulatur möglichst wenig Tracer anreicherte. Auf eine Prämedikation mit Benzodiazepinen zur Muskelrelaxation wurde verzichtet. Die Anreicherungsphase (die Zeit von der Infusion des Tracers bis zur Untersuchung) betrug 60 min. Während der ersten halben Stunde nach Infusion des Tracers wurden den Patienten 500 bis 1000 ml einer isotonischen 0,9%igen Natriumchlorid-Lösung intravenös appliziert, um die renale Ausscheidung des FDG zu verbessern. Unmittelbar vor Untersuchungsbeginn entleerten die Patienten die Harnblase. Zur Vermeidung metallinduzierter Artefakte in der PET-CT-Untersuchung legten die Patienten vor Untersuchungsbeginn alle metallischen Gegenstände ab. Danach wurden die Patienten mit Hilfe spezieller Lagerungshilfen möglichst bequem auf dem Untersuchungstisch mit dem Kopf in Richtung der Scanneröffnung gelagert. Die Patienten wurden gebeten, die Arme so weit wie möglich über den Kopf zu heben, um Überlagerungsartefakte im Bereich des Rumpfes zu vermeiden.

Zu Beginn der Untersuchung wurde ein CT-Topogramm zur Planung der gesamten Untersuchung vom Scheitel bis zum proximalen Oberschenkel angefer-

tigt. Im Anschluss erfolgte die Niedrigdosis-CT, die den gewünschten Untersuchungsabschnitt für die PET-Untersuchung umfasste (Abbildung 1A). Die Niedrigdosis-CT erfolgte in flacher Expiration: die gewählte Atemlage entsprach damit annähernd der Atemmittellage während der Akquisition der FDG-PET (106). Die Aufnahmebereiche der PET-Untersuchung (Bettpositionen) wurden entsprechend der Vorgabe der Niedrigdosis-CT festgelegt. Bei Patienten mit einem Body-Mass-Index (BMI) über 25 betrug die Messzeit drei Minuten pro Bettposition. Lag der BMI unter 25, wurden 2,5 Minuten pro Bettposition gemessen. Bei der Festlegung der Bettpositionen wurde darauf geachtet, dass sich die Aufnahmen aus den einzelnen Bettpositionen knapp überlappten.

Die Studie wurde an einem kombinierten PET-CT (Biograph Sensation 16[®], Siemens Molecular Imaging, Siemens Medical Solutions, Hoffmann Estates, Ill., Forchheim, Deutschland) durchgeführt: dieses Gerät bestand aus einem Positronenemissionstomographen, der mit Lutetium-Oxyorthosilikat (LSO) Kristalltechnologie und sog. pico[®]-Elektronik ausgestattet war, und einem 16-Zeilen-Computertomographen (Somatom Sensation 16[®]).

3.2.2 Untersuchungsparameter

In der Niedrigdosis-CT wurden folgende Parameter verwendet: Die Röhrenspannung betrug 120 KV, der effektive Röhrenstrom lag aufgrund der Verwendung der Online-Dosismodulation CareDose[®] (Siemens) zwischen 13 und 20 mAs. Die Detektorkollimation wurde mit 16 x 1,5 mm festgelegt, der Tischvorschub betrug 30 mm pro Rotation; daraus ergab sich ein Pitchfaktor von 1,25. Der Bildausschnitt (field of view (FOV)) wurde an die Patientengröße angepasst.

3.2.3 Rekonstruktion der Bilddatensätze

Aus den Rohdaten der Niedrigdosis-CT wurden verschiedene Rekonstruktionen angefertigt: eine erste Rekonstruktion wurde zur Schwächungskorrektur der PET-Rohdaten erstellt (Abbildung 1B). Weiterhin wurden aus den Rohdaten der Niedrigdosis-CT verschiedene Rekonstruktionen mit einer Schichtdicke von jeweils 2 mm und einer Überlappung (Inkrement) von 1 mm rekonstruiert. Je nach interessierendem Organgebiet wurden unterschiedliche Faltungskerne (*kernel*) verwendet, die sogenannte Mediastinalfenster-Ausspielung (B 30-Kernel), die sogenannte Lungenfenster-Ausspielung (B 50) und die sogenannte Knochenfenster-Ausspielung (B 60).

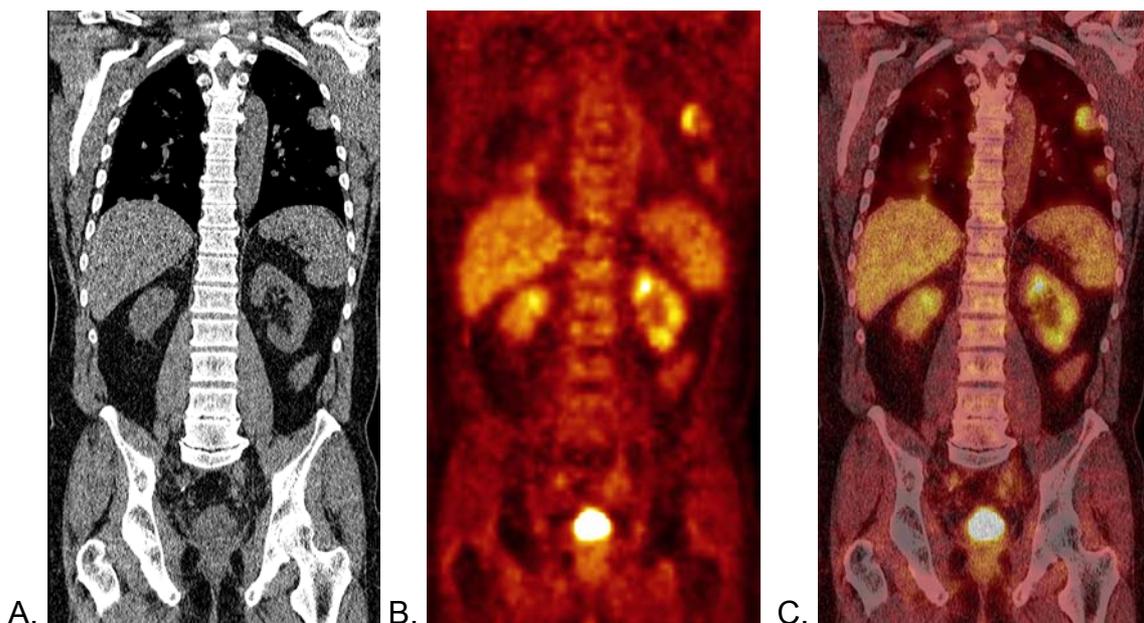


Abbildung 1 A bis C:
Verwendung der Daten der Niedrigdosis-CT (koronare Schichtführung; A.) zur Absorptionskorrektur der PET-Daten (B.) und zur Bildfusion (C.)

3.3 Datenauswertung

3.3.1 Auswertungsbogen

Zur systematischen Erfassung der Befunde der PET-CT wurde ein Auswertungsbogen erstellt, der die Befunde der Niedrigdosis-CT und der PET-Untersuchung getrennt aufführte. Die Befunde wurden nach Körperregionen unterteilt. Zusätzlich wurden die biographischen Daten der Patienten (z.B. Geburtsdatum, Geschlecht), deren Grunderkrankung und die klinische Fragestellung der Untersuchung erfasst. Die Befunde wurden in einer Tabelle mit den oben aufgeführten Kategorien zusammengefasst, so konnten die Befunde nach Organgebieten getrennt ausgewertet werden. Die Datenverarbeitung erfolgte mit der Tabellenkalkulations-Software Excel (Microsoft® 2004). Für die Auswertung wurden die CT-Befunde folgenden anatomischen Regionen zugeordnet:

1. CT-Schädel
2. CT-Hals
3. CT-Thorax
4. CT-Abdomen
5. CT-Untere Extremität
6. CT-Knochen

3.3.2 Auswertung der Befunde

Die Auswertung der PET-Untersuchung erfolgte durch jeweils zwei Nuklearmediziner der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin des Universitätsklinikums Münster, während die CT-Untersuchungen von jeweils zwei Radiologen des Instituts für Klinische Radiologie ausgewertet wurden. Die Befunde der Niedrigdosis-CT wurden von Mitarbeitern des Instituts für Klinische Radiologie vor den arbeitstäglichen Konferenzen in Unkenntnis des Befundes der FDG-PET-Untersuchung in den für diese Studie konzipierten Auswertungsbogen eingetragen. Im Rahmen der beiden arbeitstäglichen PET-CT-Konferenzen wurden die Befunde zusammengetragen und abschließend bewertet.

In die Auswertung der Niedrigdosis-CT wurden Befunde mit klinischer Relevanz aufgenommen, die von beiden Radiologen des Instituts für Klinische Radiologie in den Auswertungsbogen eingetragen wurden. Es wurden keine CT-Befunde wie zum Beispiel Operationsnarben, Clips, Hüftgelenkspaltenprothesen oder Schrittmacher aufgenommen.

Bezüglich der systematischen Auswertung der pulmonalen Rundherde erfolgte eine ergänzende dezidierte Auswertung der Niedrigdosis-CT: alle Lungenrundherde wurden mit Größenangabe aufgenommen und nach Größe sortiert in einem Diagramm aufgetragen. Dann wurden die Rundherde zu Größenkategorien von jeweils 5 mm (≤ 5 mm; 6-10 mm bis 26-30 mm; ≥ 30 mm) zusammengefasst. In den beschriebenen Größenkategorien wurde der jeweilige Anteil der FDG-PET glukosestoffwechselaktiven Rundherde an der Gesamtzahl der Rundherde einer Größenkategorie bestimmt. Weiterhin erfolgte eine Berechnung des SUV der PET-positiven Rundherde in Bezug zu der Größe. Außerdem erfolgte eine Auswertung der PET-CT Befunde bezüglich des Nachweises von Lungenmetastasen bzw. metastasenverdächtigen Rundherden, die in der PET keine ($\text{SUV} \leq 1,5$) oder nur eine geringfügige ($\text{SUV} 1,5$ bis $3,0$) Stoffwechselaktivierung aufwiesen (95).

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung der Befund der Niedrigdosis-CT

4.1.1 Gesamtbefunde

Insgesamt wurden 777 Befunde erhoben; bei weiblichen Patienten wurden 289, bei männlichen Patienten wurden 488 Befunde nachgewiesen. Die Anzahl der klinischen Befunde betrug im Durchschnitt 3,2 (Frauen 3,21 Befunde; Männer 3,19 Befunde) pro Patient.

Tabelle 3 zeigt eine Auflistung der CT-Befunde getrennt nach anatomischen Regionen. Am häufigsten fanden sich klinische Befunde im Thorax, gefolgt von Abdomen und Skelett.

Untersuchungsregion der CT	
Kopf	27
Hals	19
Thorax	458
Abdomen	152
Untere Extremität	4
Skelett	117
Gesamt	777

Tabelle 3: Befunde nach Untersuchungsregionen der Niedrigdosis-CT

4.1.2 CT-Schädel

In dieser Region gab es insgesamt 27 Befunde, davon waren 24 in den Nasennebenhöhlen lokalisiert. In der Mehrzahl der Fälle war der sinus maxillaris betroffen; es handelte sich um Schwellungen der Schleimhäute der Nasennebenhöhlen und Flüssigkeitsansammlungen in den Nasennebenhöhlen im Sinne von akuten bzw. chronischen Sinusitiden.

4.1.3 CT-Hals

Es wurden insgesamt 19 Befunde nachgewiesen, davon waren die meisten Befunde im Parenchym der Schilddrüse lokalisiert.

Schilddrüsenparenchym

Im Schilddrüsenparenchym fanden sich strumigene bzw. regressive Veränderungen (N=13).

Gefäße

Bei einer Patientin wurde als Zufallsbefund eine einseitige klinisch asymptomatische Stenose der arteria carotis interna nachgewiesen.

Lymphknoten

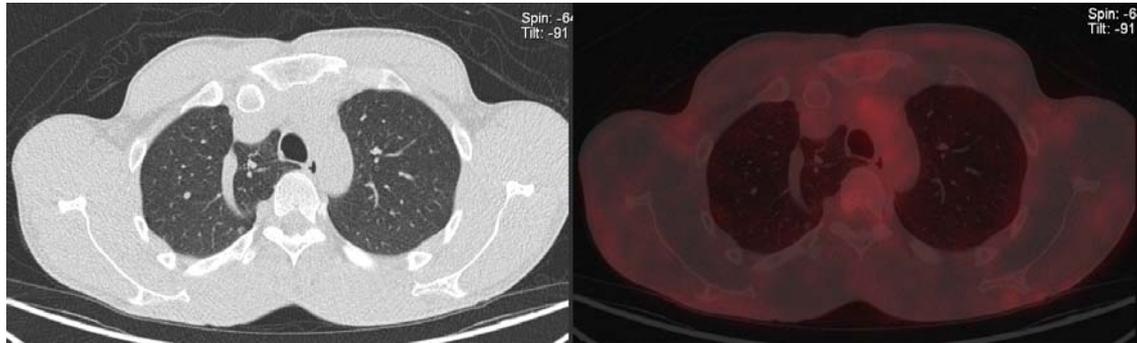
Es wurden cervikale und submandibuläre Lymphknoten nachgewiesen (siehe Tabelle 4).

Lymphknoten	
Cervikale LK bis 10 mm	3
Cervikale LK > 10 mm	1
Submandibuläre LK > 10 mm	1
Gesamt	5

Tabelle 4: Nachweis von Lymphknoten in der Niedrigdosis-CT des Halses

4.1.4 CT-Thorax

Insgesamt gab es in der CT-Untersuchung des Thorax 458 Befunde (Abbildung 2), davon hatten die Parenchyembefunde den größten Anteil.



A.

B.

Abbildung 2:

Nachweis anatomischer Normvarianten, z.B. eines lobus venae azygos, anhand der Niedrigdosis-CT (A.). Diese Normvariante ist in der FDG-PET nicht nachzuweisen. Fusionierter PET-CT-Datensatz (B.)

Den größten Teil der Parenchyembefunde machten Rundherde der Lunge aus (N=197): am häufigsten lagen kleine Rundherde bis 5 mm Durchmesser vor (N=94), gefolgt von Rundherden bis 10 mm Durchmesser (N=45). Im Kapitel 4.2. dieser Arbeit folgt eine differenzierte Subanalyse der pulmonalen Rundherde unter besonderer Berücksichtigung der Befunde der FDG-PET. Des Weiteren wurden narbige Parenchymveränderungen (N=11), Belüftungsstörungen (N=8) und Bullae (N=4) nachgewiesen. In den serösen Höhlen des Thorax wies die Niedrigdosis-CT bei 18 Patienten Pleuraergüsse, Pleuraschwelen (N=5), Perikardergüsse (N=5) und Perikardverkalkungen (N=1) vor.

Gefäße

Die Niedrigdosis-CT der thorakalen Gefäße zeigte insgesamt 131 Befunde, am häufigsten kalzifizierte Gefäßwandveränderungen der thorakalen Gefäße bzw. der Koronargefäße (siehe Tabelle 5).

Gefäßbefunde	
Arteriosklerose	68
Koronarsklerose	44
Mitralklappenverkalkungen	4
Aortenklappenverkalkungen	12
Aortenektasie	2
Aortenaneurysma	1
Gesamt	131

Tabelle 5: Gefäßbefunde in der Niedrigdosis-CT des Thorax

Lymphknoten

Im Thorax wurden 57 Lymphknoten beschrieben, die nach anatomischer Lokalisation und ihrer Größe differenziert wurden. Dabei waren mediastinale Lymphknoten mit 67% am häufigsten, diese wurden bei 21 Patienten nachgewiesen (siehe Tabelle 6).

LK Thorax	
Mediastinale LK bis 10 mm	20
Mediastinale LK > 10 mm	19
Hiläre LK bis 10 mm	6
Hiläre LK > 10 mm	3
Axilläre LK bis 10 mm	4
Axilläre LK > 10 mm	5
Gesamt	57

Tabelle 6: Lymphknoten des Thorax in der Niedrigdosis-CT

4.1.5 Abdomen

Die Tabelle 7 listet die mittels Niedrigdosis-CT im Abdomen erhobenen Befunde auf. Bei den Parenchymbefunden hatten die Befunde der Oberbauchorgane den größten Anteil. An den Nieren fielen Zysten (N=18) und verkalkte Konkremente (N=4) auf, weiterhin bei jeweils einem Patienten ein gedoppeltes Nierenbeckenkelchsystem und ein verschmälertes Nierenparenchym bei bekannter Nierenerkrankung auf. Bei den Befunden im Leberparenchym handelte es sich um Zysten (N=10), Verkalkungen (N=1), (postoperative) Aerobilie (N=1), eine ausgeprägte steatosis hepatis (N=1), multiple Metastasen (N=1) und um eine metastasenverdächtige Läsion. Im linken Oberbauch wurden Nebenmilzen (N=8) und bei 5 Patienten eine Splenomegalie beschrieben.

Oberbauchorgane	
Niere	24
Leber	15
Milz	13
Gallenblase	9
Darm	6
Pankreas	2
Nebenniere	1
Gesamt	70

Tabelle 7: Organzuordnung der Niedrigdosis-CT Befunde im Oberbauch

Bei acht Patienten lag eine Cholezystolithiasis vor, ein Patient hatte einen Gallenblasenhydrops. Im Bereich des Darmes wurden Sigmadivertikulose (N=4), eine Verkalkung im Zökalpol sowie eine Wandverdickung unklarer Ätiologie beschrieben.

Die in den Beckenorganen erhobenen Befunde sind in Tabelle 8 zusammengefasst: in der Prostata waren Organhypertrophien (N=5) und Verkalkungen (N=3) beschrieben; ein Patient hatte eine Hydrozele. Bei jeweils einer Patientin wurden Uterusmyome und Verkalkungen des Uterus nachgewiesen. Im Becken wurden bei 20 Patienten Phlebolithen und bei fünf Patienten Verkalkungen des plexus pampiniformis dokumentiert.

Beckenorgane	
Prostata	8
Testis	1
Uterus	2
Ovar	1
Gesamt	12

Tabelle 8: Organzuordnung der Niedrigdosis-CT Befunde im Becken

Abdominell wurden insgesamt 38 Lymphknoten beschrieben, der Durchmesser der Mehrzahl der Lymphknoten betrug < 10 mm (Tab. 9).

Regionen	
Mesenteriale LK bis 10 mm	12
Mesenteriale LK >10 mm	3
Retroperitoneale LK	12
- davon: paraaortale LK bis 10 mm	7
- davon: paraaortale LK >10 mm	2
- davon: paravertebrale LK bis 10 mm	3
LK im kleinen Becken bis 10 mm/> 10 mm	3/0
Inguinale LK bis 10 mm	5
Inguinale LK >10 mm	3
Gesamt	38

Tabelle 9: Lymphknoten des Abdomens/Beckens in der Niedrigdosis-CT

4.1.6 Untere Extremität

In der unteren Extremität wurden bei zwei Patienten Weichteilverkalkungen und ein gluteales Spritzengranulom beschrieben, zusätzlich fiel eine Venenektasie auf. In dieser anatomischen Region gab es keine Lymphknotenbefunde.

4.1.7 Achsen- und Beckenskelett

Insgesamt wurden 117 Skelettbefunde (Abbildung 3) erhoben (siehe Tabelle 10): degenerative Veränderungen der Wirbelsäule und des Beckenskeletts stellen dabei den größten Anteil.

Skelett	
Wirbelsäule: Degenerative Veränderungen	57
Becken: Degenerative Veränderungen	16
Skoliose der Wirbelsäule	10
Metastasensuspekte osteolytische Läsionen	10
Osteome	10
Knochenzysten	3
Nicht näher klassifiziert	11
Gesamt	117

Tabelle 10: Befunde des Achsen- und Beckenskeletts in der Niedrigdosis-CT

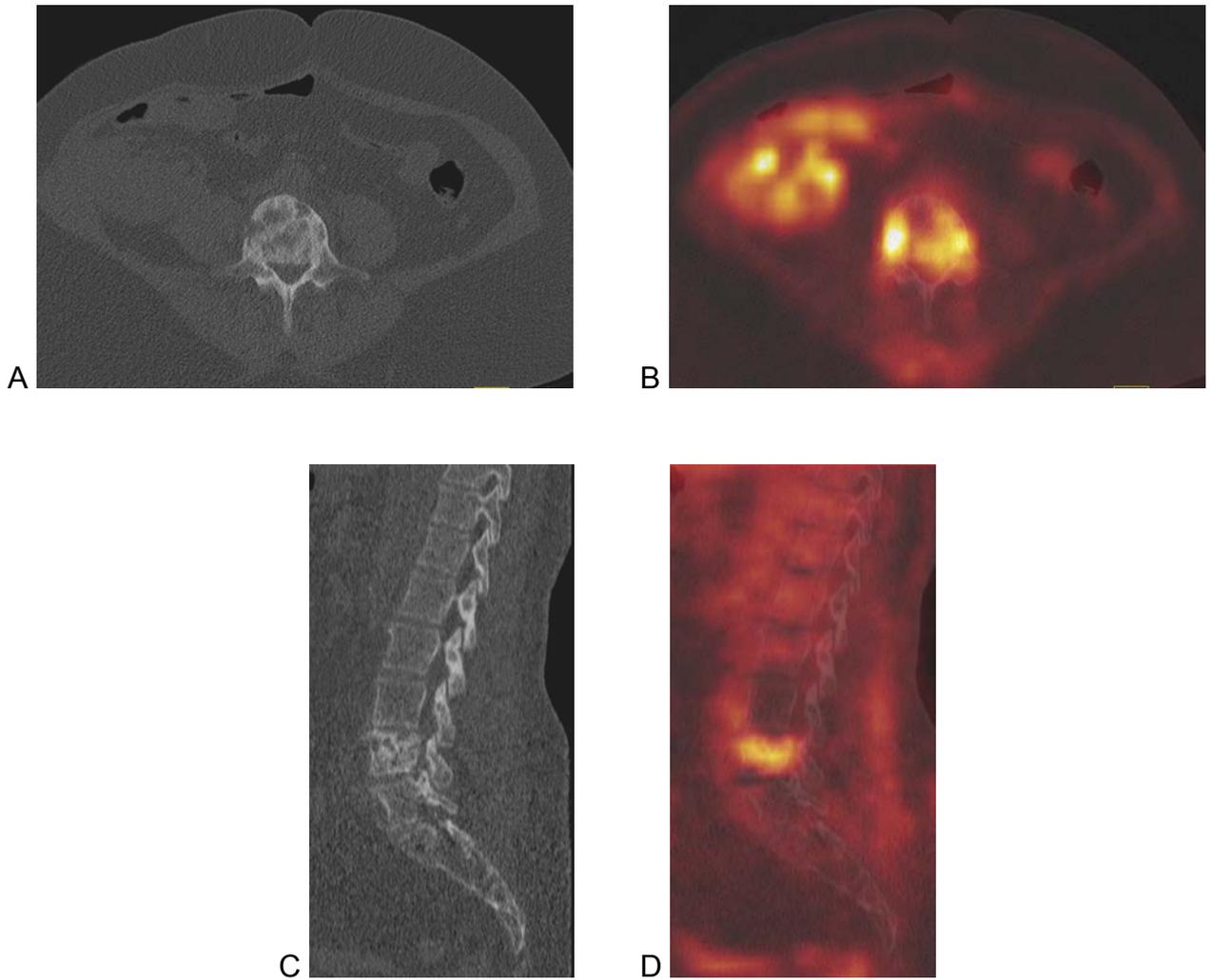


Abbildung 3:
 Niedrigdosis-CT (A., C.) und fusionierter FDG PET-CT-Datensatz (B., D.) einer 52-jährigen Patientin mit histologisch gesichertem Mammakarzinom. Stoffwechselaktive ossäre Metastase im 4. Lendenwirbelkörper (A. und B. axiale Schichtführung; C. und D. sagittale Schichtführung).

4.2 Lungenbefunde in der Niedrigdosis-CT

4.2.1 Größenverteilung der Lungenrundherde

In dieser Subanalyse wurden die Lungenrundherde als häufigster Befund genauer untersucht. Diese Auswertung bezieht sich auf insgesamt 200 Lungenrundherde und pulmonale Raumforderungen, deren Größe in der Niedrigdosis-CT bestimmt wurde. Die Lungenrundherde hatten folgende Größenverteilung (siehe Abbildung 4): 64% der Rundherde wiesen 5 mm oder weniger im Durchmesser auf, von diesen waren Rundherde mit 3 mm Durchmesser am häufigsten. Die Rundherde mit Durchmessern von 6 bis 10 mm waren mit 22% weniger häufig. Nur 14% der Rundherde und pulmonalen Raumforderungen waren > 10 mm.

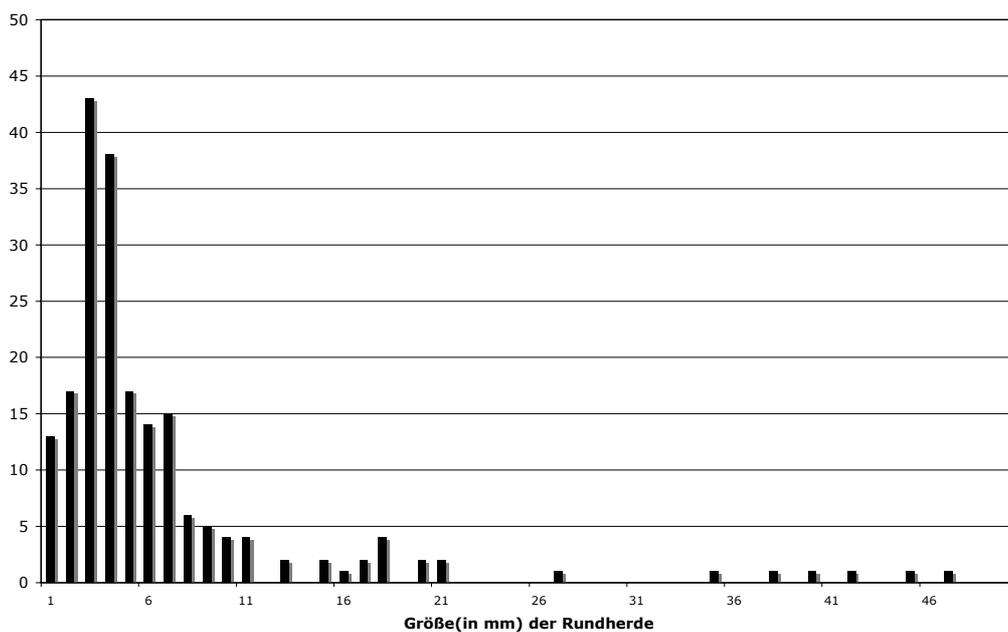
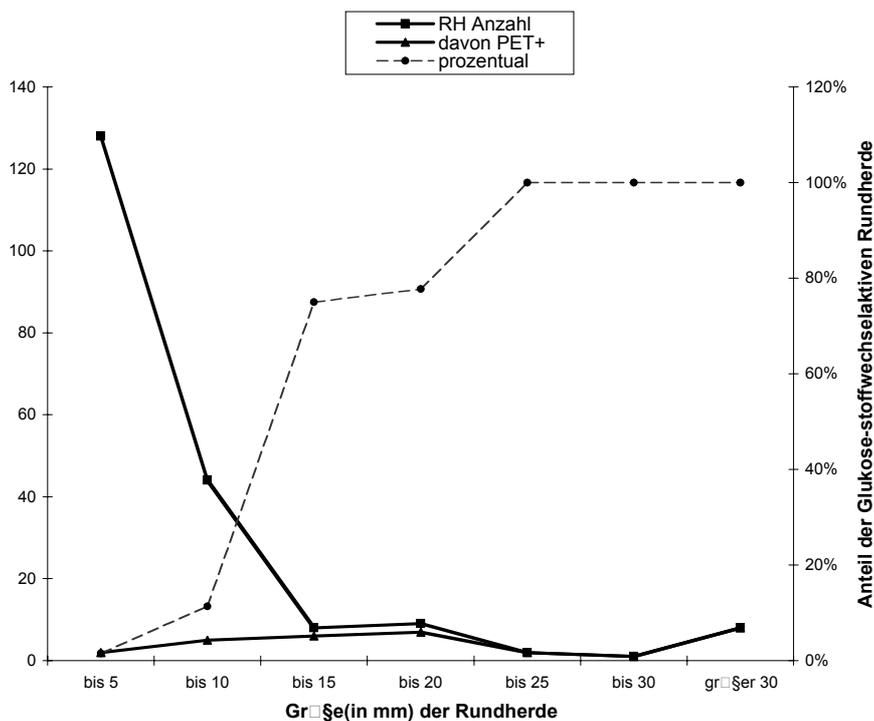


Abbildung 4:
Größenverteilung der pulmonalen Rundherde und Raumforderungen in der Niedrigdosis-CT

4.2.2 Anteil der PET-positiven Lungenläsionen

Eine Lungenläsion wurde in dieser Auswertung analog zur Arbeit von Strobel et al. ab einem SUV-Wert von $\geq 1,5$ als Glukose-anreichernd und somit PET-positiv definiert (95). Insgesamt zeigten 31 Rundherde einen gesteigerten Glukose-Stoffwechsel ($SUV > 1,5$). Diese 31 in der PET glukosestoffwechselaktiven Lungenläsionen sind in Bezug auf ihre Größe anders verteilt als die Gesamtzahl der Rundherde. Der Anteil der stoffwechselaktiven Läsionen an der Gesamtzahl der Rundherde und Raumforderungen einer Größenkategorie steigt mit der Größe der Rundherde. Nur 2% der Rundherde bis 5 mm Größe weisen einen gesteigerten Glukosestoffwechsel (mittlerer SUV 2,4) auf. Damit lassen sich 98% dieser Rundherde nur in der Niedrigdosis-CT



detektieren.

Abbildung 5:

Anteil der Lungenrundherde mit Stoffwechselsteigerung im Verhältnis zur Größe der Läsionen

Im Gegensatz dazu reicherten sämtliche Läsionen größer als 20 mm (N=11) vermehrt Glukose an (mittlerer SUV 6,7). Während von den Rundherden in der Kategorie von 6 bis 10 mm Größe nur 11% Glukose anreichern (mittlerer SUV

2,0), steigt dieser Anteil bei den Rundherden bis 15 mm auf 75% (mittlerer SUV 2,1). Die Abbildung 5 fasst die Lungenläsionen entsprechend ihrer Größe zu Gruppen zusammen; diese zeigt den Anteil der Läsionen, die in der PET eine Glukose-Stoffwechselsteigerung aufweisen, im absoluten und prozentualen Verhältnis zu der Gesamtzahl der Lungenläsionen (Abbildung 6).

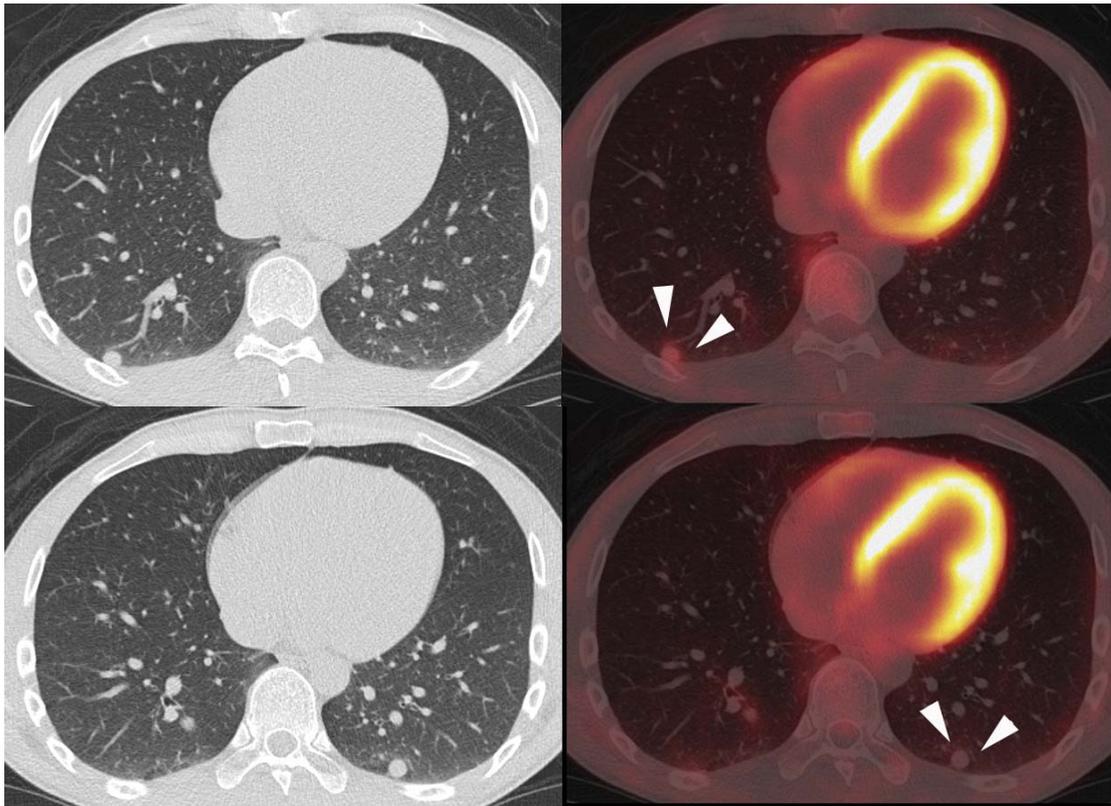


Abbildung 6:
Niedrigdosis-CT (sog. Lungenfenster-Rekonstruktion als 5 mm MIP-Rekonstruktion; linksseitige Spalte) und fusionierter FDG PET-CT-Datensatz (rechtsseitige Spalte) eines 34-jährigen Patienten mit histologisch gesichertem Rhabdomyosarkom des rechten Unterschenkels. Stoffwechselaktive pulmonale Metastase im dorsalen rechten Unterlappen; dagegen ist eine kontralaterale Metastase im dorsalen Unterlappen links stoffwechsellinaktiv und nur in der Niedrigdosis-CT zu detektieren (Pfeile).

4.2.3 Detektion von Lungenmetastasen durch die Niedrigdosis-CT

Bei insgesamt neun Patienten, d.h. bei 4,6% der 197 Patienten mit onkologischen Fragestellungen, wurden Lungenmetastasen und metastasenverdächtige Lungenrundherde nur in der Niedrigdosis-CT (Abbildung 7) detektiert (Tabelle 12).

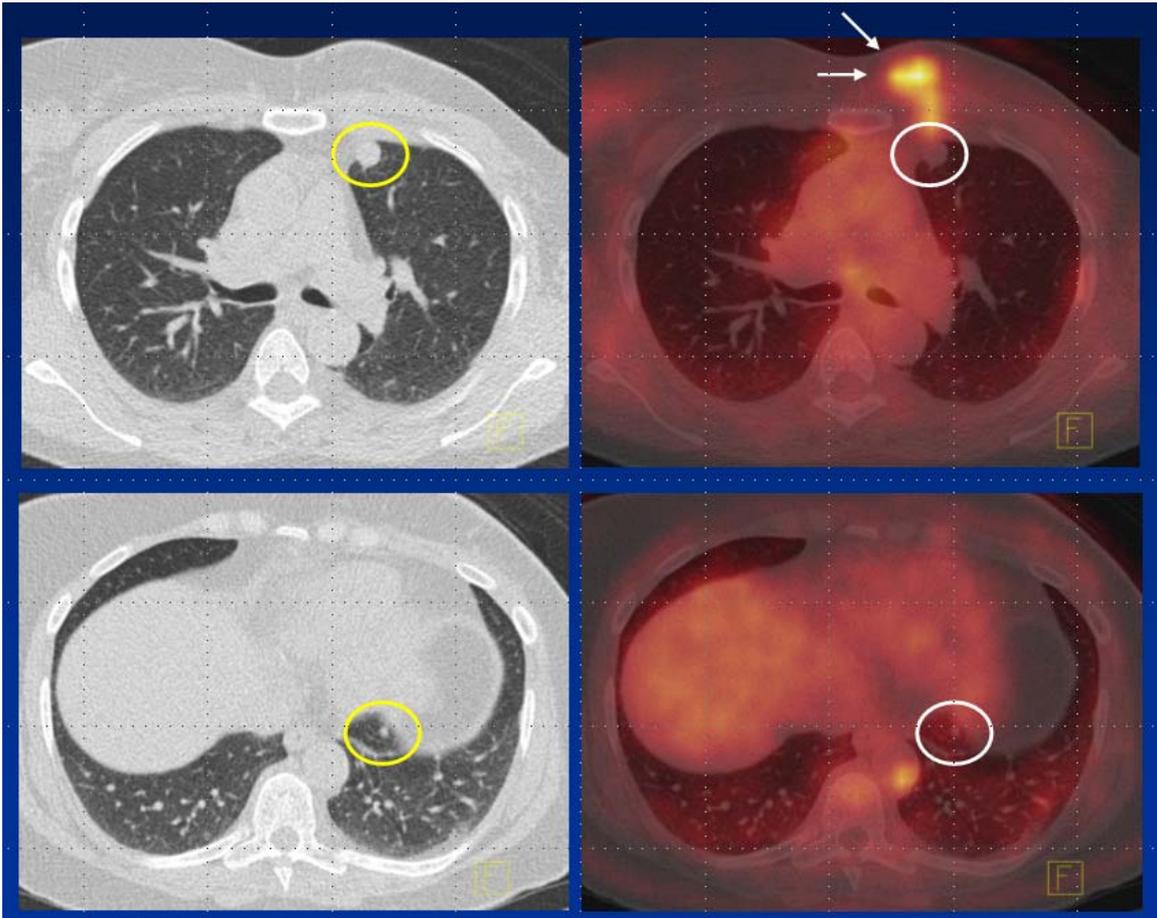


Abbildung 7:
Niedrigdosis-CT (sog. Lungenfenster-Rekonstruktion als 5 mm MIP-Rekonstruktion; linksseitige Spalte) und fusionierter FDG PET-CT-Datensatz (rechtsseitige Spalte) einer 52-jährigen Patientin mit histologisch gesichertem Mammakarzinom; stoffwechselaktive Primärtumormanifestation (Pfeil). Stoffwechsellinaktive pulmonale Metastasen im linken Ober- und Unterlappen, die nur in der Niedrigdosis-CT zu detektieren sind (gelber/weißer Kreis).

Pat.-Nr.	Geschl.	Alter	Primärtumor	CT des Thorax (Niedrigdosis-Technik)	SUV
1	W	29	Chondrosarkom	multiple Metastasen	2,0
2	M	33	Sarkom	multiple Metastasen	<1,5
3	M	69	Rektum-Ca	multiple metastasenverdächtige Rundherde	<1,5
4	W	58	Malignes Melanom	multiple metastasenverdächtige Rundherde	<1,5
5	W	64	Malignes Melanom	größenprogrediente Lun- genmetastase	<1,5
6	W	63	Zervix-Ca	metastasenverdächtiger Rundherd	<1,5
7	W	70	Mamma-Ca	Verdacht auf multiple Lungenmetastasen	<1,5
8	M	68	Nierenzell-Ca	Verdacht auf multiple Lungenmetastasen	<1,5
9	W	64	Mamma-Ca	Verdacht auf singuläre Lungenmetastase	<1,5

Tabelle 12:

In der Niedrigdosis-CT detektierte Lungenmetastasen bzw. metastasenverdächtige Lungenrundherde mit Befundkorrelation zur FDG-PET (SUV = standardized uptake value; W = weiblich, M = männlich).

Diese Läsionen wiesen in der PET in acht von neun Fällen (89%) keinen erhöhten Glukosestoffwechsel (Abbildung 8), d.h. einen SUV < 1,5, auf; nur bei einer Patientin wurde in der PET eine geringfügige Anreicherung (SUV 2,0) gemessen (95).

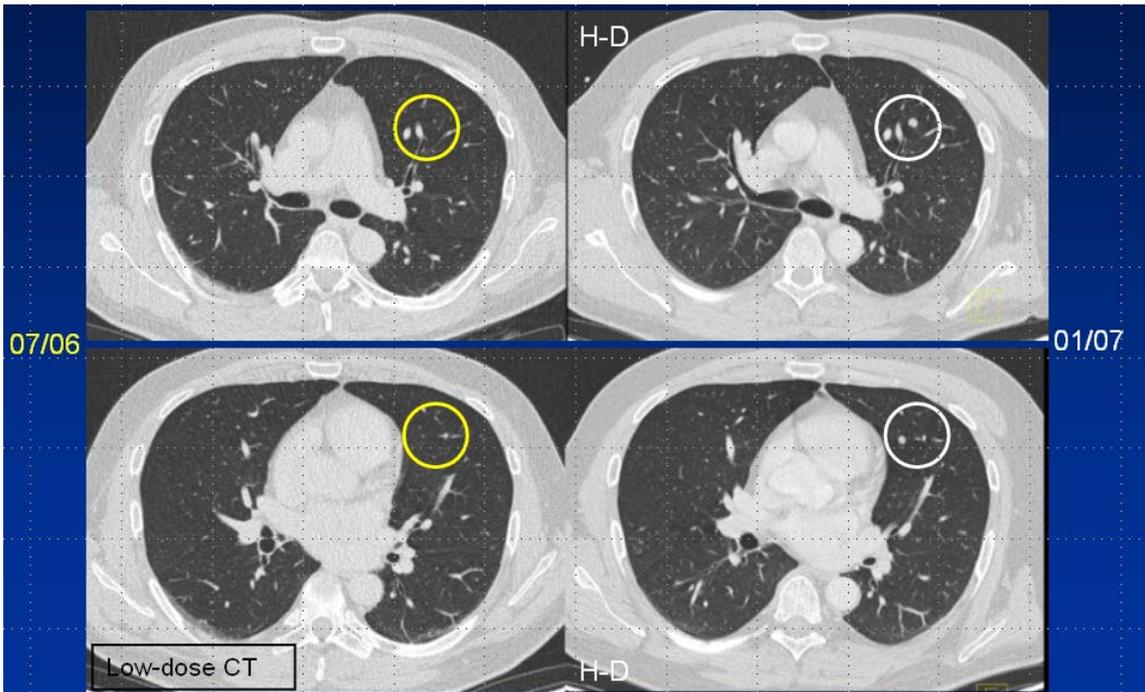


Abbildung 8:
 Verlaufsuntersuchung eines 24-jährigen Patienten mit Sarkom des linken Humerus. Niedrigdosis-CT (Lungenfenster-Rekonstruktion als 1 mm MIP-Rekonstruktion; linksseitige Spalte) und Normaldosis-Thorax-CT (H-D, Lungenfenster-Rekonstruktion 1 mm; rechtsseitige Spalte). Progress der pulmonalen Metastasierung zwischen 07/06 und 01/07 (gelber/weißer Kreis) bei gleichwertiger diagnostischer Qualität beider Modalitäten.

5 Diskussion

5.1 Vorteile der PET-CT gegenüber separater PET und CT

Die PET-CT-Diagnostik hat sich in den vergangenen Jahren in der onkologischen Bildgebung etabliert (14, 104). Dieses verdankt sie den Vorteilen, die sich aus der Kombination zweier etablierter nicht-invasiver Modalitäten ergeben. Der diagnostische Zugewinn der PET-CT gegenüber den Einzelmethoden für das Staging maligner Erkrankungen konnte in einigen Studien gezeigt werden: so fanden Bar-Shalom et al. (10) in einer prospektiven Studie an 204 Patienten mit unterschiedlichen onkologischen Fragestellungen einen Zugewinn an diagnostischer Information durch Einsatz der PET-CT bei 49% der Patienten, bei 14% der Patienten wurde dadurch zusätzlich die Therapie beeinflusst. Antoch et al. fanden in einer Studie an 260 Patienten mit verschiedenen onkologischen Erkrankungen durch Anwendung der PET-CT einen die Therapie verändernden Zugewinn an diagnostischer Information gegenüber der CT bei 15% der Patienten, gegenüber der PET bei 17% der Patienten und gegenüber der Befundung von PET und CT in visueller Korrelation bei 6% der Patienten (3). Auch für das Staging des nicht-kleinzelligen Bronchialkarzinoms konnte eine erhöhte Genauigkeit durch Einsatz der PET-CT in mehreren Studien gezeigt werden (5, 22, 75, 76, 95). Weiterhin wurde bei der Dignitätsbestimmung pulmonaler Rundherde eine Überlegenheit der PET-CT gegenüber der KM-gestützten CT beschrieben (111); in diesem Zusammenhang konnten Kim et al. eine höhere Genauigkeit der PET-CT gegenüber PET und CT zeigen (68). Für das Staging kolorektaler Karzinome wurde ebenfalls eine höhere diagnostische Genauigkeit der PET-CT gegenüber der PET nachgewiesen (24).

Die Gründe für die höhere Exaktheit des Tumorstagings durch die Anwendung der PET-CT liegen in der Kombination von morphologischer und funktionaler Information. So verbessert die CT die Beurteilung der Ausdehnung des Primärtumors und dessen Infiltration in benachbarte Strukturen. Bei Lymphknoten, deren Dignität mit der CT anhand morphologischer Parameter nicht in allen Fäl-

len abschließend beurteilt werden kann, ist die zusätzliche funktionelle Information der PET oft entscheidend für die Therapie (104). Kleine Metastasen, die aufgrund ihrer geringen Glukoseanreicherung (cut-off Wert SUV < 3; Referenz 95) der Detektion durch die PET entgehen, können wiederum in einigen Fällen lediglich durch die CT diagnostiziert werden (95). Hier zeigt sich der synergistische Effekt der PET-CT. Weitere Vorteile liegen in der kürzeren Untersuchungszeit der kombinierten PET-CT gegenüber der PET, da die Daten der CT-Untersuchung für die Schwächungskorrektur der PET-Daten verwendet werden können. Bei onkologischen Patienten verkürzt sich die Gesamtuntersuchungszeit durch die gleichzeitige Akquisition der PET- und CT-Bilder. Daraus resultieren ein besserer Patientenkomfort und eine höhere Auslastung der Geräte (16).

5.2 Diskussion der Methode

In die vorliegende Studie wurden 243 Patienten mit verschiedenen Grunderkrankungen und Fragestellungen eingeschlossen. Sie bietet insofern einen Überblick über die klinischen Befunde, die in einem heterogenen Patientenkollektiv durch die Niedrigdosis-CT erhoben werden können. Aufgrund der verschiedenen Grunderkrankungen ist die Anzahl der einzelnen Tumorentitäten begrenzt: die häufigsten klinischen Fragestellungen waren CUP (N=26), es folgten maligne Melanome sowie die NHL der B-Zell-Reihe (jeweils N=15). Die kleinen Patientenzahlen schränken generelle Empfehlungen zu einzelnen Grunderkrankungen ein.

Wichtige Parameter der Niedrigdosis-CT sind die enge Schichtkollimation (16x1,5 mm), die Röhrenspannung (120 kV) sowie das geringe Röhrenstromzeitprodukt (13-20 mAs_{eff}). Durch die enge Schichtkollimation sowie die Bildrekonstruktion mit geringer Schichtdicke und geringem Inkrement werden hochauflösende CT-Bilder möglich. Die gewählten Parameter für Röhrenspannung und Röhrenstromzeitprodukt führen zu einer mittleren Strahlendosis von 2,3 mSv; damit ist die mittlere Strahlendosis für den Patienten um den Faktor 6,1 gegenüber einer KM-gestützten CT (14,1 mSv) verringert (17). Der Begriff

der Niedrigdosis-CT ist in Bezug auf die Höhe der Strahlendosis bisher nicht eindeutig definiert. In der Literatur wird der Begriff Niedrigdosis-CT für einen großen Dosisbereich mit Stromstärken von 30 bis 100 mAs verwendet (17, 73). In diesem Dosisbereich variiert die Bildqualität erheblich. Die vorliegende Studie evaluiert die Befunde in Niedrigdosis-CT-Aufnahmen mit einem noch geringeren Röhrenstromzeitprodukt von 13-20 mAs. Soweit uns bekannt, handelt es sich um die erste Studie, die Niedrigdosis-CT-Aufnahmen des Ganzkörpers mit einer Stromstärke von ≤ 20 mAs systematisch auswertet. Bisher liegen lediglich zwei Studien vor, die im Rahmen der PET-CT den zusätzlichen Wert der nicht KM-gestützten CT zur Schwächungskorrektur der PET-Daten untersuchen. In diesen Arbeiten wird jedoch mit höheren Dosiswerten als in der vorliegenden Studie gearbeitet, das heißt mit einem Röhrenstromzeitprodukt zwischen 40 und 80 mAs (84, 95).

5.3 Diskussion der Ergebnisse

5.3.1 Gesamtergebnisse

In dieser Studie wurden insgesamt 777 Befunde erhoben, die nur durch die Auswertung der Niedrigdosis-CT und nicht durch die PET detektiert werden konnten. Dies entspricht 3,2 CT-Befunden pro Patient und ist vergleichbar mit den Resultaten einer Ganzkörper-CT Screening-Studie, die bei 1192 Patienten 2,8 Befunde pro Patient registrierte (44).

Bei der großen Zahl der Befunde stellt sich die Frage nach der klinischen Relevanz für den einzelnen Patienten. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Zusammensetzung des Patientenkollektivs zu betrachten. Mehr als 80% der Patienten wurden aufgrund onkologischer Fragestellungen untersucht. Für diese Patienten sind solche Befunde von besonderer Relevanz, die sich auf ihre Tumorerkrankung beziehen. Bei einem Großteil der Niedrigdosis-CT Befunde handelt es sich, bezogen auf die Fragestellung der Patienten insofern um Nebenbefunde, die für das Staging der Tumorerkrankung nicht relevant sind: zu nennen sind die arteriosklerotischen Gefäßveränderungen, Phlebolithen, dege-

nerative Wirbelsäulen- und Beckengelenkveränderungen, Gallensteine, Sinusitiden und Strumen.

5.3.2 Niedrigdosis-CT-Befunde im Thorax

Von den insgesamt 777 Befunden waren 59% im Thorax lokalisiert, wobei es sich in der Mehrzahl um Lungenparenchyembefunde handelte. 57% der beschriebenen Lymphknotenbefunde waren im Thorax lokalisiert, und auch die große Anzahl von 131 Gefäßbefunden (29% der Thoraxbefunde) ist bemerkenswert. Die Häufigkeit dieser Befunde ist mit der guten Nachweisbarkeit durch die Thorax-CT aufgrund des hohen Kontrastes des Lungenparenchyms, der guten Abgrenzbarkeit Calcium-haltiger Gefäßwandveränderungen sowie mit den ausgeprägten Dichteunterschieden zwischen Lymphknoten und Fettgewebe bei adipösen Patienten zu erklären.

In der Lunge gab es die größte Anzahl an Einzelbefunden. Von besonderem diagnostischem Interesse für die onkologischen Patienten ist der Nachweis einer pulmonalen Metastasierung. Dies war bei neun Patienten (4,6% der Patienten mit onkologischer Fragestellung) der Fall. Hier führt die Detektion von Metastasen durch eine dezidierte Auswertung der Niedrigdosis-CT zu klinisch wichtigen zusätzlichen Informationen für die einzelnen Patienten. Die Häufigkeit dieser Befunde korreliert gut mit denen der Studie von Strobel et al. (95): diese Autorengruppe untersuchte den Einfluss der CT zur Schwächungskorrektur im Rahmen der PET-CT auf die Genauigkeit in der Detektion von Metastasen bei Patienten mit malignen Melanomen. Sie fanden bei sieben von 124 Patienten (5,6%) Metastasen (in 4 Fällen Lungenmetastasen, 3,2% der Patienten), die nur durch die Niedrigdosis-CT erfasst wurden, da die Metastasen in der PET nur geringfügige (SUV 1,5 bis 3,0) oder keine (SUV bis 1,5) Mehranreicherung zeigten. Die Studie unterschied sich allerdings in einigen Punkten vom vorliegenden Studiendesign: zum einen lagen die verwendeten Parameter der Niedrigdosis-CT (40 mAs, 140 kV) höher, zum anderen wurde mit 4,25 mm eine wesentlich breitere Schichtkollimation rekonstruiert. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in

der Verwendung eines vierzeiligen CT (Discovery LS, GE Health Systems, Milwaukee, Wis.), die nur die Akquisition höherer Schichtdicken (> 1 mm) erlaubt. Die Auswertung der PET-CT-Bilder erfolgte durch zwei Nuklearmediziner, und nicht, wie in der vorliegenden Studie, durch sowohl zwei Radiologen als auch zwei Nuklearmediziner. Die Ergebnisse in Bezug auf die Häufigkeit der Detektion von Lungenmetastasen mit der Niedrigdosis-CT waren mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit vergleichbar.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt 200 pulmonale Rundherde und Raumforderungen beschrieben. Sie waren damit der häufigste Befund, wobei 111 Rundherde einen Durchmesser < 5 mm aufwiesen. Weniger als 2% dieser Rundherde zeigten in der PET eine erhöhte Tracer-Aufnahme. Es ist bekannt, dass ein Großteil kleiner und zufällig gefundener Rundherde gutartig ist (11, 78). Für das Management kleiner Lungenrundherde, die anhand von Thorax-CT-Aufnahmen zufällig gefunden werden, hat die Fleischner Society 2005 eine Richtlinie herausgegeben (78): diese äußert sich kritisch über die von Ost und Tan herausgegebenen Richtlinien für Nachsorgeuntersuchungen in dreimonatigen Intervallen bei allen unklaren Lungenrundherden (86, 97) und fordern eine je nach Größe des Rundherdes und dem Risikoprofil des Patienten differenziertere Vorgehensweise. Rundherde < 5 mm bei Patienten mit niedrigem Risiko für Malignität erfordern ihrer Meinung nach keinerlei Nachsorgeuntersuchungen. Allerdings fordern sie Nachsorgeuntersuchungen für Patienten mit dem Vorliegen oder dem klinischen Verdacht auf maligne Tumore, die potenziell in die Lunge metastasieren; diese richten sich nach dem Behandlungsprotokoll und der jeweiligen klinischen Situation. Insofern beeinflussen die in dieser Studie gefundenen Lungenrundherde die sich anschließenden Verlaufskontrollen für die entsprechenden Patienten.

Die geringe Sensitivität der PET für die Detektion von Lungenmetastasen und malignen Rundherden < 10 mm ist aus anderen Studien bekannt (28, 54, 81). Eine retrospektive Studie von Reinhardt et al. kommt zu dem Ergebnis, dass die Sensitivität der PET im Rahmen der PET-CT für Lungenmetastasen < 11 mm

deutlich abnimmt. Für Lungenmetastasen mit einem Durchmesser von 5-7 mm liegt die Sensitivität in dieser Studie nur bei 41% (90). Verschiedene Gründe kommen für die geringe Sensitivität in Frage. Einerseits liegt die räumliche Auflösung der PET-Scanner im Bereich von 4 mm (104). Andererseits ist auch die Koregistrierung der kleinen Lungenrundherde in der CT und der PET durch die Atembewegungen oft inkongruent. Dies betrifft vor allem die basal gelegenen Lungenrundherde, deren Nachweis durch eine Bewegung von 1-2 cm in kranio-kaudaler Richtung erschwert ist. Dadurch werden die gemessenen SUV-Werte fälschlicherweise reduziert und somit die Detektion der Rundherde durch die PET erschwert (40, 47, 50). Außerdem sind bei Beurteilung von kleinen Lungenrundherden mit der PET Partialvolumeneffekte zu berücksichtigen, das heißt, dass am Rand der Läsion neben dem Rundherd auch die Stoffwechselaktivität des Lungengewebes gemessen wird. Da dieses hauptsächlich aus Luft besteht und deshalb nicht verstärkt Glukose anreichert, ergeben sich falsch niedrige SUV-Werte, die die Detektion beeinträchtigen (102).

Auch der Lymphknotenstatus der Patienten ist für das Tumor-Staging von Interesse. In dieser Studie wurden 100 Lymphknoten verschiedener Größenkategorien durch die Niedrigdosis-CT entdeckt. Davon hatten 63 einen Durchmesser bis 10 mm und 37 maßen mehr als 10 mm. Die Dignitätsbeurteilung dieser Lymphknoten erfolgte für die klinische Diagnostik in erster Linie anhand der PET-Befunde, da die geringen Kontraste der Lymphknoten zur Umgebung deren Beurteilung in der Niedrigdosis-CT erschweren. Eine aktuelle Studie von la Fougère et al. über Lymphom-Patienten untermauert diese Ergebnisse (73): hierbei wurde in Restaging-Untersuchungen für die Niedrigdosis-CT (20 mAs) eine wesentlich geringere Sensitivität bei der Beurteilung von Lymphknoten gefunden als bei KM-gestützter CT, PET und PET-CT. Allerdings ermittelten die Autoren keine signifikanten Unterschiede zwischen PET-Niedrigdosis-CT und PET-KM-gestützter-CT für das Staging der Lymphome. Sie verweisen aber auf die erschwerte Beurteilbarkeit der Lymphknoten mit der Niedrigdosis-CT aufgrund fehlender i.v.-Kontrastierung und verminderter Bildqualität. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Rodriguez-Vigil et al. (92). Die Überlegenheit der

PET gegenüber der CT für das Lymphknotenstaging konnte in einer weiteren Studie gezeigt werden (74), auch bei der Beurteilung mediastinaler Lymphknoten von Patienten mit nicht-kleinzelligem Bronchialkarzinom ist die PET in Sensitivität und Spezifität der CT überlegen (27).

5.3.3 Niedrigdosis-CT-Befunde des Abdomens

Im Abdomen waren 152 Befunde nachzuweisen, davon waren 57% in den parenchymatösen Organen lokalisiert. Die meisten organbezogenen Befunde waren ohne spezifischen Krankheitswert, es handelte sich um Befunde wie Leber- und Nierenzysten, Nebenmilzen oder Cholezystolithiasis. In einem Fall wurden Lebermetastasen eines Mamma-Ca beschrieben. Bei der Korrelation mit den PET-Befunden stellte sich heraus, dass die größeren Metastasen stark FDG anreicherten, einige kleinere Lebermetastasen in der PET aber keine fokale FDG-Anreicherung aufwiesen. Bei diesem Patient stützte sich der Befund also auf die Kombination aus PET und CT. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es sich bei den beschriebenen Befunden im Abdomen um Nebenbefunde im Sinne der Fragestellung handelt.

Für die Beurteilung des Abdomens mit der KM-gestützten CT im Rahmen der PET-CT werden bei aktuellen Untersuchungsprotokollen für die 16-Zeilen CT im klinischen Alltag höhere Röhrenstromzeitprodukte bis 200 mAs verwendet (17). Im Gegensatz dazu lagen die Röhrenstromzeitprodukte der Niedrigdosis-CT in der vorliegenden Studie bei lediglich 13-20 mAs. Die Beurteilung der abdominalen anatomischen Strukturen wurde demnach einerseits durch die fehlende KM-Applikation sowie durch das niedrigere Röhrenstromzeitprodukt erschwert.

In einer dieser Arbeit ähnlichen Studie untersuchten Osman et al. (84) die Häufigkeit zufälliger Befunde in der CT zur Schwächungskorrektur der PET-CT. Sie werteten die CT-Bilder von 250 Patienten mit onkologischen Fragestellungen aus und fanden bei 3% der Patienten klinisch bedeutende Befunde: vier unklare

Nierenläsionen, eine Lendenwirbelmetastase, eine Leberzirrhose und ein Aortenaneurysma. Das Aortenaneurysma wurde reseziert, wohingegen die anderen Befunde nur zum Teil radiologisch und in keinem Fall histologisch bestätigt wurden. Die Studie unterscheidet sich in zwei wesentlichen Punkten von der vorliegenden Arbeit: erstens verwendeten Osman et al. unterschiedliche CT-Parameter (140 kV, 80 mAs) und zweitens schlossen sie Lungenrundherde < 7 mm von der Auswertung aus. Der Schwerpunkt der Befunde liegt aufgrund des Studiendesigns und der verwendeten CT-Parameter auf den soliden Organen, während die vorliegende Arbeit schon aufgrund der niedrigeren Strahlendosis eher auf die Lungenrundherde fokussiert ist. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass zwar wenige Befunde erhoben wurden, diese aber klinische Relevanz hatten. Aus diesem Grund empfehlen sie, die CT-Bilder zur Schwächungskorrektur von einem in CT-Diagnostik ausgebildeten Radiologen auswerten zu lassen, um keine PET-negativen Befunde in der PET-CT zu übersehen.

5.3.4 Niedrigdosis-CT-Befunde Schädel, Hals, untere Extremität und Skelett

In diesen Untersuchungsbereichen waren nur wenige Befunde nachzuweisen. Diese lagen zum größten Teil in Strukturen mit starken Kontrasten. Aufgrund der guten Beurteilbarkeit des knöchernen Skeletts sowie der pneumatisierten Nasennebenhöhlen waren degenerative Wirbelsäulen- und Beckengelenksveränderungen und Sinusitiden die häufigsten Befunde. Im Halsbereich waren die Schilddrüsenbefunde am häufigsten; dabei führte in zwei Fällen das Vorliegen hypodensierender Knoten zur Empfehlung weiterer diagnostischer Abklärung. Die geringe Anzahl der Befunde an der unteren Extremität ist am ehesten dadurch zu erklären, dass sie nach distal maximal bis zum mittleren Oberschenkel aufgenommen wurde. Bis auf zwei abklärungswürdige Schilddrüsenbefunde waren alle anderen Befunde benigne. Insofern handelt es sich ebenfalls um Nebenbefunde in Bezug auf die Fragestellungen der Patienten.

5.4 Einsatzmöglichkeiten der Niedrigdosis-CT im Rahmen der PET-CT

Als Indikation zum Einsatz der Niedrigdosis-CT im Rahmen der PET-CT hat sich in aktuellen Studien das Staging und Restaging von Patienten mit malignen Lymphomen erwiesen (74, 92). Rodriguez-Vigil et al. führten bei 47 Patienten mit histologisch gesicherten malignen Lymphomen das primäre PET-CT-Staging mit zwei verschiedenen Protokollen durch: PET-KM-gestützte-CT versus PET-Niedrigdosis-CT. Sie fanden eine gute Korrelation zwischen den beiden Untersuchungen und konnten keine signifikanten Unterschiede in der Staging-Genauigkeit feststellen. Sie empfehlen daher zum primären Staging von Patienten mit malignen Lymphomen ein PET-CT-Protokoll mit Niedrigdosis-CT im Sinne einer Reduktion der Strahlenbelastung der Patienten. In Fällen mit unklarer FDG-Mehranreicherung empfehlen sie zur anatomischen Korrelation ein KM-gestütztes CT anzuschließen (92). La Fougère et al. verglichen in einem Patientenkollektiv von 45 Patienten mit Morbus Hodgkin oder Non-Hodgkin-Lymphomen die Genauigkeit des Restaging durch PET-KM-gestützte-CT versus PET-Niedrigdosis-CT. Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden PET-CT-Protokollen nachgewiesen werden. Allerdings erschwerte die verminderte Bildqualität und fehlende i.v.-Kontrastierung der Niedrigdosis-CT die Beurteilbarkeit unklarer FDG-Mehranreicherungen und die anatomische Ausdehnung dieser Herde (74). Elstrom et al. zeigten in einer retrospektiven Arbeit, dass bei dem Staging von Patienten mit malignen Lymphomen eine KM-gestützte CT gegenüber einer PET-Niedrigdosis-CT keine zusätzlichen diagnostisch relevanten Informationen bietet (38). Die PET-Niedrigdosis-CT ist also bei Staging und Restaging von Patienten mit malignen Lymphomen indiziert.

5.5 Empfehlung der Auswertung der Niedrigdosis-CT durch Radiologen

Am Universitätsklinikum Münster wird die PET-CT gemeinsam von der Klinik und Poliklinik für Nuklearmedizin, dem Institut für Klinische Radiologie und der Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie betrieben. Die drei Kliniken arbeiten bei der Auswertung der PET-CT-Bilder im klinischen Alltag zusammen. So erstellen die Radiologen die CT-Befunde, während die Nuklearmediziner die PET-Bilder auswerten. Die Ergebnisse werden im Rahmen der zweimal täglich stattfindenden Konferenzen zu einer abschließenden Diagnose vereint. Dieses Vorgehen entspricht der Empfehlung von Antoch et al. (2, 15). In der vorliegenden Arbeit konnten einige wichtige Befunde in der Niedrigdosis-CT erhoben werden. Die Ergebnisse rechtfertigen die Auswertung von Niedrigdosis-CT-Bildern durch Radiologen, die in der Auswertung von CT-Aufnahmen geschult sind.

5.6 Limitationen dieser Arbeit

Die Aussagekraft dieser Studie ist durch einige Faktoren eingeschränkt: zum einen handelte es sich um eine einzeitige Erhebung der Daten in Bezug auf den einzelnen Patienten. Es wurden keine Vorbefunde oder Befunde von anschließenden Untersuchungen einbezogen. Es gibt also keine Bestätigung der Befunde im Verlauf. Auch wurden wesentliche Befunde wie die Lungenmetastasen nicht histologisch bestätigt. Dieses Vorgehen wäre ethisch nur im Einzelfall zu rechtfertigen. Insofern existiert kein intrinsischer diagnostischer Goldstandard, an dem die Befunde der Studie verifiziert worden sind. Es ist darauf hinzuweisen, dass die in dieser Studie akquirierten CT-Bilder für die Diagnose von Lungenrundherden keine optimale Qualität besaßen. Zur Koregistrierung mit den PET-Daten wurden die CT-Aufnahmen in milder Expirationsstellung durchgeführt. Dagegen wird eine Thorax-CT standardisiert in tiefer Inspiration durchgeführt, um eine optimale Darstellung, insbesondere der basalen Lungenabschnitte, zu erreichen. Dieses ist von besonderer Bedeutung, da Lungenmetastasen überwiegend in den basalen Lungenabschnitten nachzuweisen sind (35). Jürgens et al. konnten zeigen, dass die Detektion von Rundherden bei inspiratori-

scher Niedrigdosis-CT zuverlässiger gelingt als bei KM-gestützter CT in milder Expirationslage (64). In einer nahezu zeitgleichen Studie verglichen Aquino et al. (6) im Rahmen der PET-CT die nicht KM-gestützte CT zur Schwächungskorrektur mit einer KM-gestützten Thorax-CT in tiefer Inspiration. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass bei 18% der Patienten in der Thorax-CT in tiefer Inspiration zusätzliche Lungenrundherde entdeckt wurden. Einschränkend muss hier auf Bewegungsartefakte hingewiesen werden, die in der Studie von Aquino et al. durch die freie Atmung der Patienten während der CT zur Schwächungskorrektur entstanden. Es kann also davon ausgegangen werden, dass aufgrund der unterschiedlichen Atemlage während der CT in der vorliegenden Studie einige Rundherde oder Metastasen nicht detektiert wurden.

Bezüglich der visuellen, nicht automatisierten Rundherddetektion beschreiben Wormanns et al. zwar eine Steigerung der Sensitivität um 10% anhand von Thorax-CT-Aufnahmen durch die sequentielle Befundung durch zwei Radiologen im Gegensatz zu einem Untersucher. Insgesamt werden durch diese gemeinsame Auswertung jedoch weniger als 80% der Rundherde erkannt. Dies war bei kleinen Rundherden (< 5 mm) unabhängig davon, ob Niedrigdosis-CT oder Standarddosis-CT-Aufnahmen ausgewertet wurden (108).

5.7 Fazit

In der vorliegenden PET-CT-Studie wurde die Niedrigdosis-CT erfolgreich für die Zuordnung von stoffwechselaktiven Läsionen zu anatomischen Strukturen und zur Schwächungskorrektur der PET-Daten eingesetzt. Die Auswertung der Niedrigdosis-CT-Bilder durch Radiologen bringt darüber hinaus in der onkologischen Bildgebung einen Zugewinn an diagnostischen Informationen und zusätzlichen Befunden: besonders deutlich zeigte sich dies bei der Beurteilung des Lungenparenchyms mit den immanenten hohen Kontrasten in Verbindung mit der hohen räumlichen Auflösung der dünnenschichtigen Niedrigdosis-CT. Die Detektion von Lungenmetastasen bei neun Patienten und die häufig gefundenen Lungenrundherde zeigen die Stärke der Niedrigdosis-CT in dieser anatomi-

schen Region. Dies bedeutet nicht, dass eine Niedrigdosis-CT den gleichen diagnostischen Wert wie eine im Rahmen der PET-CT akquirierte KM-gestützte CT hat. Trotzdem lassen sich mit der Niedrigdosis-CT klinisch wichtige Befunde detektieren, die durch die alleinige Auswertung der PET-Daten nicht diagnostiziert werden. Aus diesem Grund sollten Niedrigdosis-CT Aufnahmen durch in der CT-Diagnostik geschulte Radiologen ausgewertet werden. In bestimmten klinischen Situationen ist die Anwendung von Niedrigdosis-CT-Protokollen ausreichend: Zu nennen sind hier Patienten, bei denen vor der PET-CT schon umfangreiche zeitnahe Schnittbild-Aufnahmen (CT/MRT) vorliegen. Insbesondere kommen Patienten mit malignen Lymphomen in Betracht, die unter Therapie bzw. in den Verlaufskontrollen keine FDG-positiven Läsionen mehr aufweisen. Auch bei pädiatrischen Patienten werden mit Rücksicht auf deren erhöhte Strahlensensibilität Niedrigdosis-CT-Protokolle bevorzugt. Um die Wertigkeit der Niedrigdosis-CT im Rahmen der PET-CT genauer zu bestimmen, sind jedoch weitere Studien erforderlich.

6 Literaturverzeichnis

1. Alavi A, Gupta N, Alberini JL et al. (2002)
Positron emission tomography imaging in nonmalignant thoracic disorders.
Semin Nucl Med 32:293-321
2. Antoch G, Forsting M (2004)
How much CT does PET/CT need?
Nuklearmedizin 43:141-142
3. Antoch G, Saoudi N, Kuehl H et al. (2004)
Accuracy of whole-body dual-modality fluorine-18-2-fluoro-2-deoxy-D-glucose positron emission tomography and computed tomography (FDG-PET/CT) for tumor staging in solid tumors: comparison with CT and PET.
J Clin Oncol 22:4357-4368
4. Antoch G, Vogt FM, Bockisch A, Ruehm SG (2004)
Whole-body tumor staging: MRI or FDG-PET/CT?
Radiologe 44:882-888
5. Antoch G, Stattaus J, Nemat AT et al. (2003)
Non-small cell lung cancer: dual-modality PET/CT in preoperative staging.
Radiology 229:526-533
6. Aquino SL, Kuester LB, Muse VV, Halpern EF, Fischman AJ (2006)
Accuracy of transmission CT and FDG-PET in the detection of small pulmonary nodules with integrated PET/CT.
Eur J Nucl Med Mol Imaging 33:692-696

7. Austin JH, Muller NL, Friedman PJ et al. (1996)
Glossary of terms for CT of the lungs: recommendations of the Nomenclature Committee of the Fleischner Society.
Radiology 200:327-331

8. Bach PB, Jett JR, Pastorino U, Tockman MS, Swensen SJ, Begg CB (2007)
Computed tomography screening and lung cancer outcomes.
JAMA 297:953-961

9. Bakheet SM, Saleem M, Powe J, Al-Amro A, Larsson SG, Mahassin Z (2000)
F-18 fluorodeoxyglucose chest uptake in lung inflammation and infection.
Clin Nucl Med 25:273-278

10. Bar-Shalom R, Yefremov N, Guralnik L et al. (2003)
Clinical performance of PET/CT in evaluation of cancer: additional value for diagnostic imaging and patient management.
J Nucl Med 44:1200-1209

11. Bellomi M, Veronesi G, Rampinelli C, Ferretti S, De Fiori E, Maisonneuve P (2007)
Evolution of lung nodules < or =5 mm detected with low-dose CT in asymptomatic smokers.
Br J Radiol 80:708-712

12. Beyer F, Zierott L, Fallenberg EM et al. (2007)
Comparison of sensitivity and reading time for the use of computer-aided detection (CAD) of pulmonary nodules at MDCT as concurrent or second reader.
Eur Radiol 17:2941-2947

13. Beyer T, Townsend DW, Brun T et al. (2000)
A combined PET/CT scanner for clinical oncology.
J Nucl Med 41:1369-1379

14. Blodgett TM, Meltzer CC, Townsend DW (2007)
PET/CT: form and function.
Radiology 242:360-385

15. Blodgett TM, McCook BM, Federle MP (2006)
Positron emission tomography/computed tomography: protocol issues and options.
Semin Nucl Med 36:157-168

16. Bockisch A, Beyer T, Antoch G et al. (2004)
Principles of PET/CT and clinical application.
Radiologe 44:1045-1054

17. Brix G, Lechel U, Glatting G et al. (2005)
Radiation exposure of patients undergoing whole-body dual-modality ¹⁸F-FDG PET/CT examinations.
J Nucl Med 46:608-613

18. Brix G, Nekolla E, Griebel J (2005)
Radiation exposure of patients from diagnostic and interventional X-ray procedures. Facts, assessment and trends.
Radiologe 45:340-349

19. Brudin LH, Valind SO, Rhodes CG et al. (1994)
Fluorine-18 deoxyglucose uptake in sarcoidosis measured with positron emission tomography.
Eur J Nucl Med 21:297-305

20. Burger C, Goerres G, Schoenes S, Buck A, Lonn AH, Von Schulthess GK (2002)
PET attenuation coefficients from CT images: experimental evaluation of the transformation of CT into PET 511-keV attenuation coefficients.
Eur J Nucl Med Mol Imaging 29:922-927
21. Bury T, Dowlati A, Paulus P et al. (1996)
Evaluation of the solitary pulmonary nodule by positron emission tomography imaging.
Eur Respir J 9:410-414
22. Cerfolio RJ, Ojha B, Bryant AS, Raghuveer V, Mountz JM, Bartolucci AA (2004)
The accuracy of integrated PET-CT compared with dedicated PET alone for the staging of patients with nonsmall cell lung cancer.
Ann Thorac Surg 78:1017-23; discussion 1017-23
23. Cheran SK, Nielsen ND, Patz EF Jr. (2004)
False-negative findings for primary lung tumors on FDG positron emission tomography: staging and prognostic implications.
AJR Am J Roentgenol 182:1129-1132
24. Cohade C, Osman M, Leal J, Wahl RL (2003)
Direct comparison of (18)F-FDG PET and PET/CT in patients with colorectal carcinoma.
J Nucl Med 44:1797-1803
25. Conrad GR, Sinha P (2003)
Narrow time-window dual-point 18F-FDG PET for the diagnosis of thoracic malignancy.
Nucl Med Commun 24:1129-1137

26. Cook GJ, Fogelman I, Maisey MN (1996)
Normal physiological and benign pathological variants of 18-fluoro-2-deoxyglucose positron-emission tomography scanning: potential for error in interpretation.
Semin Nucl Med 26:308-314
27. Czernin J, Phelps ME (2002)
Positron emission tomography scanning: current and future applications.
Annu Rev Med 53:89-112
28. Dewan NA, Shehan CJ, Reeb SD, Gobar LS, Scott WJ, Ryschon K (1997)
Likelihood of malignancy in a solitary pulmonary nodule: comparison of Bayesian analysis and results of FDG-PET scan.
Chest 112:416-422
29. Dewan NA, Gupta NC, Redepenning LS, Phalen JJ, Frick MP (1993)
Diagnostic efficacy of PET-FDG imaging in solitary pulmonary nodules. Potential role in evaluation and management.
Chest 104:997-1002
30. Diederich S (2004)
Radiological diagnosis of pulmonary metastases: imaging findings and diagnostic accuracy.
Radiologe 44:663-670
31. Diederich S, Wormanns D, Semik M et al. (2002)
Screening for early lung cancer with low-dose spiral CT: prevalence in 817 asymptomatic smokers.
Radiology 222:773-781

32. Diederich S, Wormanns D, Heindel W (2001)
Low-dose CT: new tool for screening lung cancer?
Eur Radiol 11:1916-1924
33. Diederich S, Wormanns D, Heindel W (2001)
Bronchial carcinoma screening with low dosage CT. Current status.
Radiologe 41:256-260
34. Diederich S, Lenzen H, Windmann R et al. (1999)
Pulmonary nodules: experimental and clinical studies at low-dose CT.
Radiology 213:289-298
35. Dienemann H, Hof H, Debus J, Drings P (2004)
Lungenmetastasen.
Onkologe 10:458-473
36. Dietlein M, Schicha H (2003)
Reimbursement of the PET in oncology in Europe: a questionnaire based survey.
Nuklearmedizin 42:80-85
37. Dizendorf EV, Treyer V, Von Schulthess GK, Hany TF (2002)
Application of oral contrast media in coregistered positron emission tomography-CT.
AJR Am J Roentgenol 179:477-481
38. Elstrom RL, Leonard JP, Coleman M, Brown RK (2008)
Combined PET and low-dose, noncontrast CT scanning obviates the need for additional diagnostic contrast-enhanced CT scans in patients undergoing staging or restaging for lymphoma.
Ann Oncol 19:1770-1773

39. Erasmus JJ, McAdams HP, Patz EF Jr, Coleman RE, Ahuja V, Goodman PC (1998)

Evaluation of primary pulmonary carcinoid tumors using FDG PET.

AJR Am J Roentgenol 170:1369-1373

40. Erdi YE, Nehmeh SA, Pan T et al. (2004)

The CT motion quantitation of lung lesions and its impact on PET-measured SUVs.

J Nucl Med 45:1287-1292

41. Fischbach F, Knollmann F, Griesshaber V, Freund T, Akkol E, Felix R (2003)

Detection of pulmonary nodules by multislice computed tomography: improved detection rate with reduced slice thickness.

Eur Radiol 13:2378-2383

42. Fuchs T, Kalender WA (2001)

Fundamentals of multi-slice spiral CT.

Röntgenpraxis 53:127-133

43. Fuchs T, Kachelriess M, Kalender WA (2000)

Direct comparison of a xenon and a solid-state CT detector system: measurements under working conditions.

IEEE Trans Med Imaging 19:941-948

44. Furtado CD, Aguirre DA, Sirlin CB et al. (2005)

Whole-body CT screening: spectrum of findings and recommendations in 1192 patients.

Radiology 237:385-394

45. Gallagher BM, Fowler JS, Gutterson NI, MacGregor RR, Wan CN, Wolf AP (1978)

Metabolic trapping as a principle of oradiopharmaceutical design: some factors responsible for the biodistribution of [18F] 2-deoxy-2-fluoro-D-glucose.

J Nucl Med 19:1154-1161

46. Gartenschlager M, Schweden F, Gast K et al. (1998)

Pulmonary nodules: detection with low-dose vs conventional-dose spiral CT.

Eur Radiol 8:609-614

47. Goerres GW, Burger C, Kamel E et al. (2003)

Respiration-induced attenuation artifact at PET/CT: technical considerations.

Radiology 226:906-910

48. Goerres GW, Burger C, Schwitter MR, Heidelberg TN, Seifert B, von Schulthess GK (2003)

PET/CT of the abdomen: optimizing the patient breathing pattern.

Eur Radiol 13:734-739

49. Goerres GW, Ziegler SI, Burger C, Berthold T, Von Schulthess GK, Buck A (2003)

Artifacts at PET and PET/CT caused by metallic hip prosthetic material.

Radiology 226:577-584

50. Goerres GW, Kamel E, Seifert B et al. (2002)

Accuracy of image coregistration of pulmonary lesions in patients with non-small cell lung cancer using an integrated PET/CT system.

J Nucl Med 43:1469-1475

51. Goldsmith SJ, Kostakoglu L (2000)
Role of nuclear medicine in the evaluation of the solitary pulmonary nodule.
Semin Ultrasound CT MR 21:129-138
52. Goo JM, Im JG, Do KH et al. (2000)
Pulmonary tuberculoma evaluated by means of FDG PET: findings in 10 cases.
Radiology 216:117-121
53. Gould MK, Sanders GD, Barnett PG et al. (2003)
Cost-effectiveness of alternative management strategies for patients with solitary pulmonary nodules.
Ann Intern Med 138:724-735
54. Gould MK, Maclean CC, Kuschner WG, Rydzak CE, Owens DK (2001)
Accuracy of positron emission tomography for diagnosis of pulmonary nodules and mass lesions: a meta-analysis.
JAMA 285:914-924
55. Greess H, Baum U, Wolf H et al. (2001)
Dose reduction in spiral-CT: detection of pulmonary coin lesions with and without anatomically adjusted modulation of tube current.
Fortschr Röntgenstr 173:466-470
56. Greess H, Wolf H, Baum U et al. (2000)
Dose reduction in computed tomography by attenuation-based on-line modulation of tube current: evaluation of six anatomical regions.
Eur Radiol 10:391-394

57. Hany TF, Steinert HC, Goerres GW, Buck A, von Schulthess GK (2002)
PET diagnostic accuracy: improvement with in-line PET-CT system: initial results.

Radiology 225:575-581

58. Henschke CI, Yankelevitz DF (2008)
CT screening for lung cancer: update 2007.

Oncologist 13:65-78

59. Henschke CI, McCauley DI, Yankelevitz DF et al. (1999)
Early Lung Cancer Action Project: overall design and findings from baseline screening.

Lancet 354:99-105

60. Herder GJ, Golding RP, Hoekstra OS et al. (2004)
The performance of (18)F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography in small solitary pulmonary nodules.

Eur J Nucl Med Mol Imaging 31:1231-1236

61. Herzog P, Jakobs TF, Wintersperger BJ, Nikolaou K, Becker CR, Reiser MF (2002)

Radiation dose and dose reduction in multidetector row CT (MDCT).

Radiologe 42:691-696

62. Higashi K, Ueda Y, Seki H et al. (1998)

Fluorine-18-FDG PET imaging is negative in bronchioloalveolar lung carcinoma.

J Nucl Med 39:1016-1020

63. Juergens KU, Oei ML, Weckesser M et al. (2008)
**Whole-body imaging of oncologic patients using 16-channel PET-CT.
Evaluation of an i.v. contrast enhanced MDCT protocol.**
Nuklearmedizin 47:30-36
64. Juergens KU, Weckesser M, Stegger L et al. (2006)
**Tumor staging using whole-body high-resolution 16-channel PET-CT:
does additional low-dose chest CT in inspiration improve the detection of
solitary pulmonary nodules?**
Eur Radiol 16:1131-1137
65. Kalender WA (1999)
Basics and techniques of spiral CT.
Radiologe 39:809-19; quiz 819
66. Kamel EM, Burger C, Buck A, von Schulthess GK, Goerres GW (2003)
**Impact of metallic dental implants on CT-based attenuation correction in a
combined PET/CT scanner.**
Eur Radiol 13:724-728
67. Keyes JW, Jr. (1995)
SUV: standard uptake or silly useless value?
J Nucl Med 36:1836-1839
68. Kim SK, Allen-Auerbach M, Goldin J et al. (2007)
Accuracy of PET/CT in characterization of solitary pulmonary lesions.
J Nucl Med 48:214-220
69. Kinahan PE, Townsend DW, Beyer T, Sashin D (1998)
Attenuation correction for a combined 3D PET/CT scanner.
Med Phys 25:2046-2053

70. Kletter K, Becherer A (1999)
FDG-PET in oncology. Methodological principles and clinical applications.
Radiologe 39:600-609
71. Kostakoglu L, Agress H,Jr, Goldsmith SJ (2003)
Clinical role of FDG PET in evaluation of cancer patients.
Radiographics 23:315-40; quiz 533
72. Kuehl H, Veit P, Rosenbaum SJ, Bockisch A, Antoch G (2007)
**Can PET/CT replace separate diagnostic CT for cancer imaging?
Optimizing CT protocols for imaging cancers of the chest and abdomen.**
J Nucl Med 48 Suppl 1:45S-57S
73. la Fougere C, Pfluger T, Schneider V et al. (2008)
**Restaging of Patients with Lymphoma Comparison of low dose CT
(20mAs) with contrast enhanced diagnostic CT in combined
[18F]-FDG PET/CT.**
Nuklearmedizin 47: 37-42
74. la Fougere C, Hundt W, Brockel N et al. (2006)
**Value of PET/CT versus PET and CT performed as separate investigations
in patients with Hodgkin's disease and non-Hodgkin's lymphoma.**
Eur J Nucl Med Mol Imaging 33:1417-1425
75. Lardinois D (2006)
New horizons in staging for non-small-cell lung cancer.
J Clin Oncol 24:1785-1787
76. Lardinois D, Weder W, Hany TF et al. (2003)
**Staging of non-small-cell lung cancer with integrated positron-emission
tomography and computed tomography.**
N Engl J Med 348:2500-2507

77. Lowe VJ, Fletcher JW, Gobar L et al. (1998)
Prospective investigation of positron emission tomography in lung nodules.
J Clin Oncol 16:1075-1084
78. MacMahon H, Austin JH, Gamsu G et al. (2005)
Guidelines for management of small pulmonary nodules detected on CT scans: a statement from the Fleischner Society.
Radiology 237:395-400
79. Marten K, Engelke C (2007)
Computer-aided detection and automated CT volumetry of pulmonary nodules.
Eur Radiol 17:888-901
80. Matthies A, Hickeson M, Cuchiara A, Alavi A (2002)
Dual time point 18F-FDG PET for the evaluation of pulmonary nodules.
J Nucl Med 43:871-875
81. Nomori H, Watanabe K, Ohtsuka T, Naruke T, Suemasu K, Uno K (2004)
Evaluation of F-18 fluorodeoxyglucose (FDG) PET scanning for pulmonary nodules less than 3 cm in diameter, with special reference to the CT images.
Lung Cancer 45:19-27
82. Ohnesorge B, Flohr T, Schaller S et al. (1999)
The technical bases and uses of multi-slice CT.
Radiologe 39:923-931

83. Orlacchio A, Schillaci O, Antonelli L et al. (2007)
Solitary pulmonary nodules: morphological and metabolic characterisation by FDG-PET-MDCT.
Radiol Med (Torino) 112:157-173
84. Osman MM, Cohade C, Fishman EK, Wahl RL (2005)
Clinically significant incidental findings on the unenhanced CT portion of PET/CT studies: frequency in 250 patients.
J Nucl Med 46:1352-1355
85. Ost D, Fein A (2004)
Management strategies for the solitary pulmonary nodule.
Curr Opin Pulm Med 10:272-278
86. Ost D, Fein AM, Feinsilver SH (2003)
Clinical practice. The solitary pulmonary nodule.
N Engl J Med 348:2535-2542
87. Ost D, Fein A (2000)
Evaluation and management of the solitary pulmonary nodule.
Am J Respir Crit Care Med 162:782-787
88. Prokop M (2002)
Radiation dose and image quality in computed tomography.
Fortschr Röntgenstr 174:631-636
89. Reinartz P, Wieres FJ, Schneider W, Schur A, Buell U (2004)
Side-by-side reading of PET and CT scans in oncology: which patients might profit from integrated PET/CT?
Eur J Nucl Med Mol Imaging 31:1456-1461

90. Reinhardt MJ, Wiethoelter N, Matthies A, et al (2006)
PET recognition of pulmonary metastases on PET/CT imaging: impact of attenuation-corrected and non-attenuation-corrected PET images.
Eur J Nucl Med Mol Imaging 33:134-139
91. Reske SN, Kotzerke J (2001)
FDG-PET for clinical use. Results of the 3rd German Interdisciplinary Consensus Conference, "Onko-PET III", 21 July and 19 September 2000.
Eur J Nucl Med 28:1707-1723
92. Rodriguez-Vigil B, Gomez-Leon N, Pinilla I et al. (2006)
PET/CT in lymphoma: prospective study of enhanced full-dose PET/CT versus unenhanced low-dose PET/CT.
J Nucl Med 47:1643-1648
93. Rusinek H, Naidich DP, McGuinness G et al. (1998)
Pulmonary nodule detection: low-dose versus conventional CT.
Radiology 209:243-249
94. Seo JB, Im JG, Goo JM, Chung MJ, Kim MY (2001)
Atypical pulmonary metastases: spectrum of radiologic findings.
Radiographics 21:403-417
95. Strobel K, Dummer R, Husarik DB, Perez Lago M, Hany TF, Steinert HC (2007)
High-risk melanoma: accuracy of FDG PET/CT with added CT morphologic information for detection of metastases.
Radiology 244:566-574
96. Swensen SJ, Jett JR, Hartman TE et al. (2003)
Lung cancer screening with CT: Mayo Clinic experience.
Radiology 226:756-761

97. Tan BB, Flaherty KR, Kazerooni EA, Iannettoni MD, American College of Chest Physicians (2003)

The solitary pulmonary nodule.

Chest 123:89S-96S

98. Tang AW, Moss HA, Robertson RJ (2003)

The solitary pulmonary nodule.

Eur J Radiol 45:69-77

99. Thie JA (2004)

Understanding the standardized uptake value, its methods, and implications for usage.

J Nucl Med 45:1431-1434

100. Tuddenham WJ (1984)

Glossary of terms for thoracic radiology: recommendations of the Nomenclature Committee of the Fleischner Society.

AJR Am J Roentgenol 143:509-517

101. Van der Molen AJ, Veldkamp WJ, Geleijns J (2007)

16-slice CT: achievable effective doses of common protocols in comparison with recent CT dose surveys.

Br J Radiol 80:248-255

102. Vansteenkiste JF, Stroobants SG (2001)

The role of positron emission tomography with 18F-fluoro-2-deoxy-D-glucose in respiratory oncology.

Eur Respir J 17:802-820

103. Vogel MN, Brechtel K, Klein MD et al. (2007)
Evaluation of different breathing and contrast-protocols concerning quality and alignment in 18F-FDG PET/CT.
Fortschr Röntgenstr 179:72-79
104. von Schulthess GK, Steinert HC, Hany TF (2006)
Integrated PET/CT: current applications and future directions.
Radiology 238:405-422
105. Weber WA, Avril N, Schwaiger M (1999)
Relevance of positron emission tomography (PET) in oncology.
Strahlenther Onkol 175:356-373
106. Weckesser M, Stegger L, Juergens KU, Wormanns D, Heindel W, Schober O (2006)
Correlation between respiration-induced thoracic expansion and a shift of central structures.
Eur Radiol 16:1614-1620
107. Wormanns D, Roos N, Heindel W (2003)
Wertigkeit bildgebender Verfahren bei malignen pulmonalen Erkrankungen.
Onkologe 9:232-246
108. Wormanns D, Ludwig K, Beyer F, Heindel W, Diederich S (2005)
Detection of pulmonary nodules at multirow-detector CT: effectiveness of double reading to improve sensitivity at standard-dose and low-dose chest CT.
Eur Radiol 15:14-22

109. Yankelevitz DF, Henschke CI (1997)

Does 2-year stability imply that pulmonary nodules are benign?

AJR Am J Roentgenol 168:325-328

110. Yau YY, Chan WS, Tam YM et al. (2005)

Application of intravenous contrast in PET/CT: does it really introduce significant attenuation correction error?

J Nucl Med 46:283-291

111. Yi CA, Lee KS, Kim BT et al. (2006)

Tissue characterization of solitary pulmonary nodule: comparative study between helical dynamic CT and integrated PET/CT.

J Nucl Med 47:443-450

112. Zerhouni EA, Stitik FP, Siegelman SS et al. (1986)

CT of the pulmonary nodule: a cooperative study.

Radiology 160:319-327

113. Zwirwich CV, Vedal S, Miller RR, Muller NL (1991)

Solitary pulmonary nodule: high-resolution CT and radiologic-pathologic correlation.

Radiology 179:469-476

7 Abkürzungsverzeichnis

BMI	Body-Mass-Index
CA	Karzinom
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
CUP	Cancer of Unknown Primary
dl	Deziliter
d.h.	das heißt
FDG	¹⁸ F-fluorodeoxyglukose
FOV	Field of View
g	Gramm
HIV	Humanes Immundefizienz Virus
IKR	Institut für Klinische Radiologie des Universitätsklinikums Münster
i.v.	intravenös
kBq	Kilobecquerel
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht
KM	Kontrastmittel
kV	Kilovolt
LK	Lymphknoten
mA	Milliampere
mAs	Milliamperesekunde
MBq	Megabecquerel
mg	Milligramm
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MRT	Magnetresonanztomographie
mSv	Millisievert
PET	Positronenemissionstomographie

PET-CT	Positronenemissionstomographie-Computertomographie
RH	Lungenrundherd
RöV	Röntgenverordnung
SUV	Standardized Uptake Value

8 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Grunderkrankungen _____	17
Tabelle 2: Indikation der Untersuchung _____	18
Abbildung 1 A bis C: _____	21
Verwendung der Daten der Niedrigdosis-CT (koronare Schichtführung; A.) zur Absorptionskorrektur der PET-Daten (B.) und zur Bildfusion (C.) _____	21
Tabelle 3: Befunde nach Untersuchungsregionen der Niedrigdosis-CT _____	24
Tabelle 4: Nachweis von Lymphknoten in der Niedrigdosis-CT des Halses _____	25
Abbildung 2: _____	26
Nachweis anatomischer Normvarianten, z.B. eines lobus venae azygos, anhand der Niedrigdosis-CT (A.). Diese Normvariante ist in der FDG-PET nicht nachzuweisen. Fusionierter PET-CT-Datensatz (B.) _____	26
Tabelle 5: Gefäßbefunde in der Niedrigdosis-CT des Thorax _____	27
Tabelle 6: Lymphknoten des Thorax in der Niedrigdosis-CT _____	27
Tabelle 7: Organzuordnung der Niedrigdosis-CT Befunde im Oberbauch _____	28
Tabelle 8: Organzuordnung der Niedrigdosis-CT-Befunde im Becken _____	29
Tabelle 9: Lymphknoten des Abdomens/Beckens in der Niedrigdosis-CT _____	29
Tabelle 10: Befunde des Achsen- und Beckenskeletts in der Niedrigdosis-CT _____	30
Abbildung 3: _____	31
Niedrigdosis-CT (A., C.) und fusionierter FDG PET-CT-Datensatz (B., D.) einer 52-jährigen Patientin mit histologisch gesichertem Mammakarzinom. Stoffwechselaktive ossäre Metastase im 4. Lendenwirbelkörper (A. und B. axiale Schichtführung; C. und D. sagittale Schichtführung). _____	31

Abbildung 4:	32
Größenverteilung der pulmonalen Rundherde und Raumforderungen in der Niedrigdosis-CT	32
Abbildung 5:	33
Anteil der Lungenrundherde mit Stoffwechselsteigerung im Verhältnis zur Größe der Läsionen	33
Abbildung 6:	34
Niedrigdosis-CT (sog. Lungenfenster-Rekonstruktion als 5 mm MIP- Rekonstruktion; linksseitige Spalte) und fusionierter FDG PET- CT-Datensatz (rechtsseitige Spalte) eines 34-jährigen Patienten mit histologisch gesichertem Rhabdomyosarkom des rechten Unterschenkels. Stoffwechselaktive pulmonale Metastase im dorsalen rechten Unterlappen; dagegen ist eine kontralaterale Metastase im dorsalen Unterlappen links stoffwechsellinaktiv und nur in der Niedrigdosis-CT zu detektieren (Pfeile).	34
Abbildung 7:	35
Niedrigdosis-CT (sog. Lungenfenster-Rekonstruktion als 5 mm MIP- Rekonstruktion; linksseitige Spalte) und fusionierter FDG PET- CT-Datensatz (rechtsseitige Spalte) einer 52-jährigen Patientin mit histologisch gesichertem Mammakarzinom; stoffwechselaktive Primärtumormanifestation (Pfeil). Stoffwechsellinaktive pulmonale Metastasen im linken Ober- und Unterlappen, die nur in der Niedrigdosis-CT zu detektieren sind (gelber/weißer Kreis).	35
Tabelle 12:	36
In der Niedrigdosis-CT detektierte Lungenmetastasen bzw. metastasenverdächtige Lungenrundherde mit Befundkorrelation zur FDG-PET (SUV = standardized uptake value; W = weiblich, M = männlich).	36
Abbildung 8:	37
Verlaufsuntersuchung eines 24-jährigen Patienten mit Sarkom des linken Humerus. Niedrigdosis-CT (Lungenfenster-Rekonstruktion	

als 1 mm MIP-Rekonstruktion; linksseitige Spalte) und Normaldosis-Thorax-CT (H-D, Lungenfenster-Rekonstruktion 1 mm; rechtsseitige Spalte). Progress der pulmonalen Metastasierung zwischen 07/06 und 01/07 (gelber/weißer Kreis) bei gleichwertiger diagnostischer Qualität beider Modalitäten. _____ 37

9 Lebenslauf

10 Danksagung

Ich danke Herrn Priv.-Doz. Dr. Kai-Uwe Jürgens für die erstklassige Betreuung während der Promotion.

Meinen Eltern möchte ich für die Unterstützung meiner gesamten Ausbildung inklusive der Dissertation von Herzen danken.

Besonderer Dank gilt auch meinen Freunden und Verwandten, die mich im Laufe dieser Arbeit begleitet haben.