

Entwicklung eines webbasierten Analysetools für Headerdaten von DICOM-RT-Datensätzen aus der Strahlentherapie mittels JavaScript

Spezialisierungsbericht zur Masterarbeit im Studiengang
Medizinische Physik der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Robby Hesse

10. Februar 2022

Erstgutachter:

Dr. Fred Röhner, PhD MD
Klinik für Strahlentherapie
und Radioonkologie
Universitätsklinikum Bonn

Zweitgutachter:

Priv.-Doz. Dr. Götz Lehmann
Institut für Theoretische Physik I
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Abstract[†]

The internationally established DICOM standard (**D**igital **I**maging and **C**ommunications in **M**edicine) was created to guarantee the archiving and exchange of medical data uniformly. The corresponding DICOM files usually have the extension .dcm and are available in binary or text format, depending on the data type. They contain the actual DICOM objects as sequences of encoded attributes that uniquely characterize the object. In the case of a CT image in radiotherapy, for example, these attributes contain the binary image data itself, as well as additional information about, among other things, the acquisition parameters and the imaging device used to acquire the image. To read the contents of DICOM files and make them usable, special applications are required to parse the header data with the attributes. However, most of these applications have to be installed locally as third-party software on the workstation, which may be problematic in hospital IT or at least involves increased effort.

The purpose of this preliminary work is to become familiar with the methodology of browser-based import and analysis of unknown DICOM datasets, as well as with the DICOM-RT header information relevant to radiotherapy. The goal is to use this knowledge to develop a simple application to analyze and visualize a DICOM test dataset. In the subsequent master's thesis, the entire radiation treatment planning will be visualized with this developed tool based on more complex data sets to, for example, reconstruct the performed treatment and the radiation doses applied to external patients with incomplete therapy documentation and thus to be able to take them into account for further treatment planning.

[†]This translated abstract was inserted on 5th June 2022 for publication, after the thesis was already submitted.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis	II
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Krebs in Deutschland	2
2.2 Einführung in die Strahlentherapie	3
2.3 Behandlungsprozess in die Strahlentherapie (Workflow)	5
2.4 DICOM Allgemein	7
2.4.1 DICOM Model of the Real World	7
2.4.2 Dateiformat, Attribute und Data Dictionary	8
2.4.3 Gruppen, Module, Information Entities und IODs	10
2.4.4 SOP-Klassen und Konformitätserklärungen	12
2.5 DICOM-RT-Daten in der Strahlentherapie	14
2.5.1 DICOM-RT-Objekte der ersten Generation	14
2.5.2 DICOM-RT-Objekte der zweiten Generation	17
3 Voruntersuchung des Testdatensatzes	18
4 Entwicklung des Analysetools	21
4.1 Anforderungskatalog und Auswahl der Skriptsprache	21
4.2 Benutzeroberfläche (Frontend)	23
4.3 Arbeitsweise des Skriptes (Backend)	25
5 Zusammenfassung und Ausblick	28
Literaturverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
A Anhang	X
A.1 Modultabelle RT Image IOD (Ausschnitt)	X
A.2 Attribute nach Vorkommnis in den Testdatensatz-Dateien	XI

Abkürzungs- und Akronymverzeichnis

AAPM	<i>American Association of Physicists in Medicine</i>
ACR	<i>American College of Radiology</i>
AE	<i>Application Entity</i> ; ein Gerät, das einen DICOM-Dienst als Service Class Provider (SCP) anbieten oder als Service Class User (SCU) nutzen kann
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i> ; Formatierungssprache zur Gestaltung von Webseiten
CT	<i>Computertomographie</i> ; ein Verfahren zur medizinischen Bildgebung
CTV	<i>Clinical Target Volume</i> ; umfasst GTV und die mikroskopische Tumorausbreitung
DCMTK	<i>DICOM ToolKit</i> ; Open-Source Sammlung von Bibliotheken und Anwendungen zum Untersuchen, Erzeugen und Konvertieren von DICOM-Bilddateien [1]
dcmjs	JavaScript-Cross-Compilation des DCMTK [2]
DICOM	<i>Digital Imaging and Communications in Medicine</i> ; offener Standard zur Speicherung und zum Austausch von Informationen im medizinischen Bilddatenmanagement [3]
DICOM-RT	Erweiterung des DICOM Standards für Anwendungen in der Strahlentherapie
DRR	<i>Digital rekonstruierte Röntgenbilder</i> ; aus den CT-Bilddaten errechnete Röntgenbilder für die Bestrahlungsplanung
DVH	<i>Dosis-Volumen-Histogramm</i> ; Darstellung der Dosiswerte als Häufigkeitsverteilung in den Organ- und Zielvolumen für die Bestrahlungsplanung
GTV	<i>Gross Tumor Volume</i> ; umfasst makroskopische Ausdehnung des Tumors
HTML	<i>Hypertext Markup Language</i> ; Auszeichnungssprache zur strukturierten Darstellung von Inhalten im Webbrowser
ID	kurz für UID
IE	<i>Information Entity</i> ; Entität aus dem realen Leben (z.B. Patient, Studie, Gerät)
IRTG	<i>Image Guided Radiotherapy</i> ; Bildgeführte Strahlentherapie
IOD	<i>Information Object Definition</i> ; Klassendefinition von DICOM Objekten mit allen Attributen, durch welche die Objekte beschrieben werden können
JavaScript	Objektorientierte Skriptsprache u.a. zur Entwicklung von interaktiven und dynamischen Elementen im Webbrowser

MATLAB	Software zur Lösung numerischer Probleme mittels Matrizen (Name abgeleitet von <i>Matrix Laboratory</i>) und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse [4]
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MRT	<i>Magnetresonanz-Tomografie</i> ; ein Verfahren zur medizinischen Bildgebung
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PACS	<i>Picture Archiving and Communication System</i> ; System zur Verwaltung und Archivierung von medizinischen Bildern und Daten
PET	<i>Positronen-Emissions-Tomografie</i> ; ein Verfahren zur medizinischen Bildgebung
PHP	Skriptsprache zur Erstellung dynamischer Webseiten und Webanwendungen
PTV	<i>Planning Target Volume</i> ; umfasst das PTV und einen Sicherheitssaum
ROI	<i>Region of Interest</i>
RT	<i>Radiotherapy</i> ; Strahlentherapie
RTOG	<i>Radiation Therapy Oncology Group</i>
SCP	<i>Service Class Provider</i> ; eine AE, welche ein SOP anbietet
SCU	<i>Service Class User</i> ; eine AE, welche ein SOP eines anderen AE nutzt
SLD	<i>Sublethal Damage</i> ; Subletale Strahlenschäden
SOP	<i>Service-Object Pair</i> ; funktionelle Grundeinheit von DICOM, bestehend aus einem Service (z.B. „abspeichern“) und einem Objekt, auf den dieser Service angewandt wird (z.B. „CT-Bild“)
UID	<i>Unique Identifier</i> ; eindeutiger Schlüssel, um DICOM Objekte verschiedener Hierarchieebenen untereinander zuordnen zu können
UV	Ultraviolettstrahlung
VM	<i>Value Multiplicity</i> ; Definition der Anzahl von Werten in einem DICOM Attribut
VR	<i>Value Representation</i> ; Definition des Formats inkl. der maximalen Länge bzw. des Zeichensatzes eines DICOM Attributs
WG-07	<i>Working Group 7: Radiotherapy</i> ; Arbeitsgruppe, die sich mit der Erweiterung des DICOM Standards für die Strahlentherapie beschäftigt

1 Einleitung

Krebserkrankungen stellen in Deutschland die zweithäufigste Todesursache hinter kardiovaskulären Erkrankungen dar und jährlich erkranken hierzulande fast eine halbe Million Menschen neu an einer Krebsart. Eine moderne Therapiemethode neben der aggressiven Chemotherapie und der chirurgischen Entfernung des Tumorgewebes ist die Strahlentherapie. Hierbei werden die Tumorzellen überwiegend mit ionisierender Photonen- oder Elektronenstrahlung behandelt, wodurch es zu Schäden in den krankhaften Zellen kommt. Dabei kann unter anderem die Reproduktionsfähigkeit oder auch der Stoffwechsel der Zellen gestört werden, was letztlich zum kontrollierten und gewünschten Tod der Krebszellen führt.

Ziel der Strahlentherapie ist es dabei, Risikoorgane im Zielvolumen und gesundes Gewebe bestmöglich zu schonen und die Strahlung konzentriert im Tumorgewebe zu deponieren. Dazu bedarf es einer umfangreichen Bestrahlungsplanung, bei der zahlreiche medizinische Daten wie Computertomographie-Aufnahmen (CT) zur regelmäßigen Lagerungskontrolle des Patienten, Therapiepläne mit den verordneten Strahlungsdosen oder auch Protokolle über die durchgeführten Behandlungseinheiten (Treatment Records) akquiriert werden. Um die Archivierung und den Austausch dieser Daten zwischen verschiedenen Geräten und Nutzern (auch außerhalb der Klinik) in einheitlicher Form zu gewährleisten, wird hierbei der seit 1993 unter diesem Namen international etablierte DICOM Standard (**D**igital **I**maging and **C**ommunications in **M**edicine) verwendet. Die zugehörigen DICOM-Dateien tragen in der Regel die Endung .dcm und liegen abhängig vom jeweiligen Datentyp in Binär- oder Textformat vor. In ihnen sind die eigentlichen DICOM Objekte als Abfolgen von codierten Attributen gespeichert, welche das Objekt eindeutig charakterisieren. Bei einer CT-Aufnahme in der Strahlentherapie sind in diesen Attributen die binären Bilddaten selbst enthalten, sowie zusätzlichen Informationen unter anderem über die zur Bildaufnahme verwendeten Aufnahmeparameter und -geräte.

Um den Inhalt der DICOM-Dateien auszulesen und nutzbar machen zu können, sind spezielle Anwendungen notwendig, welche die Headerdaten mit den Attributen parsen¹ können. Die meisten dieser Anwendungen müssen jedoch lokal als Fremdsoftware auf dem Arbeitsrechner installiert werden, was in der Klinik-IT unter Umständen problematisch sein kann oder zumindest mit erhöhtem Aufwand verbunden ist.

Diese Vorarbeit soll daher dazu dienen, sich mit der Methodik des browserbasierten Imports und der Analyse von unbekanntem DICOM-Datensätzen, sowie mit den in der Strahlentherapie relevanten DICOM-Headerinformationen vertraut zu machen. Ziel ist es, mit diesem Wissen eine einfache Anwendung zu entwickeln, mit der zunächst ein DICOM-Testdatensatz analysiert und visualisiert werden kann. In der thematisch anschließenden Masterarbeit soll dann anhand komplexerer Datensätze die gesamte Bestrahlungsplanung mit Hilfe des entwickelten Tools visualisiert werden, um beispielsweise bei externen Patienten mit lückenhafter Therapiedokumentation die bereits erfolgte Behandlung, sowie die applizierten Strahlungsdosen rekonstruieren und somit für die weitere Bestrahlungsplanung berücksichtigen zu können.

¹Parsen (vom englischen *to parse*: „analysieren“) meint die Zerlegung und Umwandlung beispielsweise eines Datensatzes oder einer Zeichenkette in ein für die Weiterverarbeitung geeigneteres Format.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Krebs in Deutschland

Der Sammelbegriff Krebs umfasst Erkrankungen, bei denen sich Körperzellen unkontrolliert vermehren und dabei gesundes Gewebe und Organe schädigen oder gar zerstören, sogenannte „böartige Neubildungen“. Normalerweise herrscht im Körper ein Gleichgewicht zwischen Zellwachstum und Zelltod. Durch vielfältige Ursachen wie Strahlenexposition, einem ungesunden Lebensstil (Rauchen, Übergewicht, übermäßiger Alkoholkonsum), rein genetischen Faktoren, aber auch bloßen Zufall kann dieses Gleichgewicht derart gestört werden, dass der programmierte Zelltod (Apoptose) nicht mehr stattfindet. Die dabei entstehenden Geschwülste (Tumore bzw. Neoplasien) können an verschiedensten Organen auftreten und auch über Lymph- und Blutbahnen wandern, wodurch sich später in anderen Organen Tochtergeschwülste (Metastasen) bilden können. [5–7]

Jährlich erkranken fast eine halbe Million Menschen in Deutschland neu an verschiedenen Krebsarten und aufgrund der demographischen Entwicklung ist mit einem Anstieg der Neuerkrankungsrate um etwa 23% bis 2030 zu rechnen [8]. Der Behandlungserfolg und damit die Überlebensrate hängt oft vom Zeitpunkt der Entdeckung und dem Stadium der Erkrankung ab, denn mit fortschreitendem Wachstum steigt das Risiko für gestreute Metastasen und 90% der in Verbindung mit Krebs stehenden Todesfälle sind auf Metastasierung zurückzuführen [9]. Generell stellen Krebserkrankungen sowohl für Männer als auch für Frauen in Deutschland mit Abstand die zweithäufigste Todesursache hinter kardiovaskulären Erkrankungen (Herz-Kreislauf) dar. In Abb. 2.1 wird exemplarisch der prozentuale Anteil der häufigsten Krebsarten bei allen Neuerkrankungen in Deutschland im Jahr 2018 getrennt nach Geschlechtern aufgeführt. [8, 10]

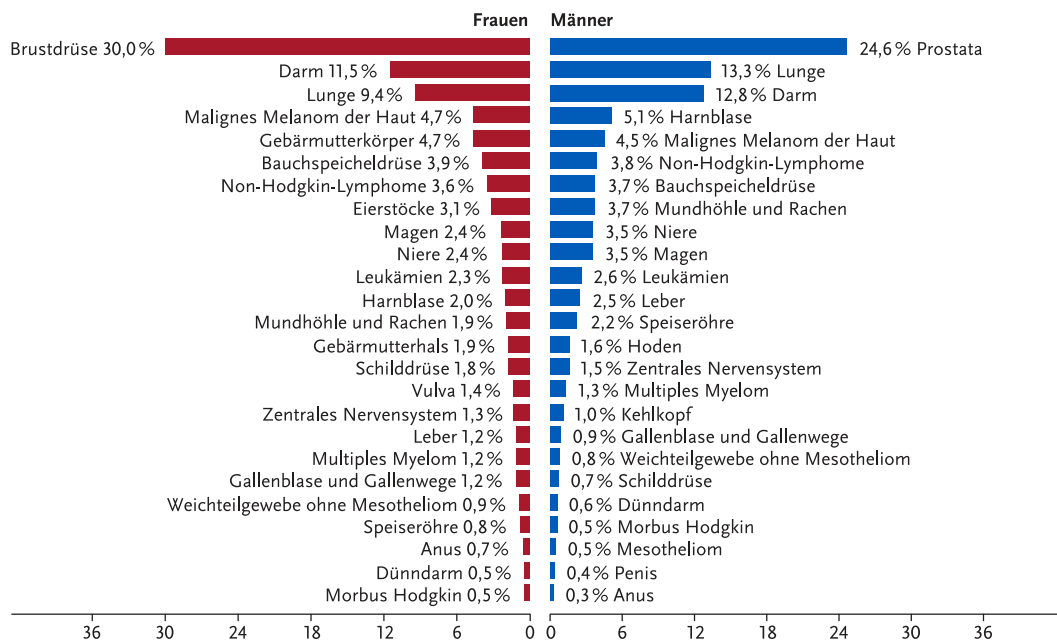


Abb. 2.1: Prozentualer Anteil der häufigsten Tumorlokalisationen an allen Krebsneuerkrankungen in Deutschland im Jahr 2018 ohne nicht-melanotischen Hautkrebs. [übernommen aus 8, Abb. 3.0.1]

2.2 Einführung in die Strahlentherapie

Die Strahlentherapie stellt neben chirurgischen Eingriffen und begleitender Chemotherapie eine wichtige Säule der modernen Krebstherapie dar. Etwa 45 bis 50% aller Krebspatienten können geheilt werden und davon erhalten heute ca. 50 bis 60% eine auf Heilung abzielende strahlentherapeutische Behandlung, oft in Kombination mit einer der anderen Therapieformen [11]. Bei der Strahlentherapie handelt es sich um lokale Behandlungen mit ionisierender Strahlung wie hochenergetische Photonen- oder Elektronenstrahlen. Seltener werden die Patienten auch mit Partikeln wie schweren Ionen oder Protonen bestrahlt. Die physikalische Grundlage ist dabei ein Energieübertrag an biologisches Gewebe mit dem Ziel, durch die deponierte Energie die Reparaturmechanismen der Tumorzellen zu schädigen und so einen kontrollierten Zelltod herbeizuführen. Durch die von der Zelle absorbierte Energie der ionisierenden Strahlung werden Elektronen aus den Molekülen herausgeschlagen (Ionisation) oder direkt chemische Bindungen in den Molekülen zerstört. Dabei entstehen chemisch hochreaktive und aggressive Moleküle (freie Radikale), welche dann mit den anderen Zellmolekülen reagieren und so direkt oder indirekt z.B. Proteine oder die DNA mit den Erbinformationen schädigen, insbesondere wenn es zu DNA-Doppelstrangbrüchen kommt. Dies kann zum Verlust der Reproduktionsfähigkeit der Zelle, zur Störung des Zellstoffwechsels oder der Zellfunktion, oder bei entsprechend hoher Strahlungs-dosis auch direkt zum Zelltod führen. Die strahlenbiologische Wirkung auf die Zellen ist dabei nicht nur von der Strahlungsart, sondern auch von der Zellzyklusphase, in der sich die Zellen während der Bestrahlung befanden, und von der Sauerstoffsättigung der Zellen abhängig. [5, 12, 13]

Strahlenschäden können von gesunden Zellen in gewissem Maße repariert werden, so wie es tagtäglich in unseren Zellen bei Schäden durch beispielsweise UV-Strahlung oder Höhenstrahlung während eines Fluges passiert. In der Strahlentherapie sind die eigentlich schwerwiegendsten Strahlenschädigungen wie die Hemmung der Zellproliferation (Zellteilung und -wachstum) und der Zelltod in Tumorgewebe jedoch gewünscht. Man macht sich daher zunutze, dass Tumorzellen anders auf hochenergetische Bestrahlung reagieren als gesunde Zellen, da sie meist strahlenempfindlicher sind. Das resultiert einerseits aus der hohen Teilungsrate der Krebszellen durch eine verkürzte Zellzykluszeit, wodurch sich die Zellen auch statistisch häufiger in strahlensensiblen Zellzyklen befinden, und zum anderen aus dem erhöhten Anteil an gut durchbluteten (hohe Sauerstoffsättigung) und sich schnell teilenden Zellen im Tumorgewebe. Die Strahlenempfindlichkeit kann auch durch Radiosensitizer oder Temperaturerhöhung künstlich verstärkt werden, um bessere Therapieergebnisse zu erzielen. [12, 14, 15]

Subletale Strahlenschäden (SLDs) sind im Gegensatz zu letalen Zellschädigungen, welche unweigerlich zum Zelltod führen, in der Regel reparabel. Dies ist auch in den typischen Schulterkurven in Abb. 2.2 erkennbar. In geringeren Dosisbereichen können die Zellen die SLDs häufiger reparieren und mit ansteigender Strahlendosis kommt es dann zu einem exponentiellen Anstieg der Strahlenschäden, welche von den Zellen nicht mehr repariert werden können und zum Zelltod führen. Dies ist in der halblogarithmischen Darstellung in Abb. 2.2 entsprechend als linearer Abfall des Anteils an überlebenden Zellen unterhalb der „Schulter“ sichtbar. Es zeigte sich jedoch auch, dass gesunde Zellen SLDs nach einer Bestrahlung schneller reparieren können als

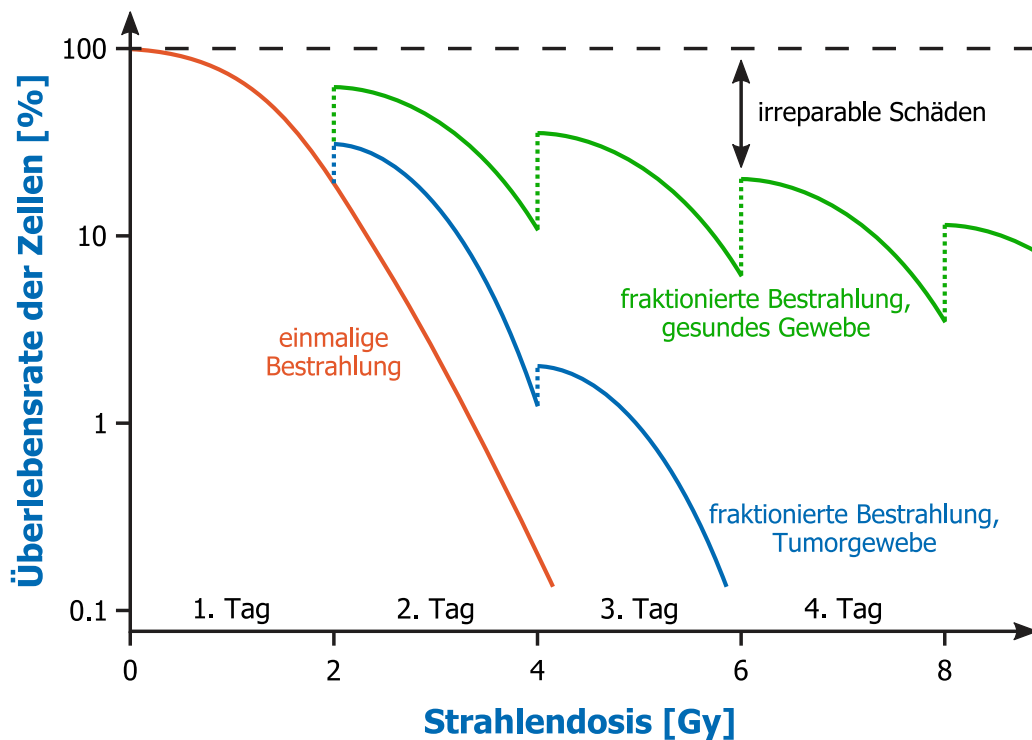


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Zellüberlebenskurven bei einmaliger und fraktionierter Bestrahlung. Bei Einzeitbestrahlung (orange) wird gesundes und Tumorgewebe gleichermaßen zerstört, während bei fraktionierter Bestrahlung das gesunde Gewebe (grün) sich gegenüber dem Tumorgewebe (blau) schneller regenerieren kann. Es können aber nicht alle subletalen Strahlenschäden vom gesunden Gewebe repariert werden. [nach 14, Abb. A-2.6]

bestrahlte Tumorzellen. Dies macht man sich zunutze, indem die zu verabreichende Gesamtdosis in mehrere Einzeldosen aufgeteilt wird (Fraktionierung). Die Abstände zwischen den einzelnen Fraktionen werden dabei so kurz gewählt, dass das gesunde Gewebe genügend Zeit zur Erholung hat, jedoch ohne dass sich das Tumorgewebe in ähnlichem Maße reparieren kann. Um den gesunden Zellen diese Reparatur zu ermöglichen, müssen zwischen zwei Bestrahlungen mindestens 6 Stunden liegen. Durch den dadurch insgesamt längeren Behandlungszeitraum steigt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass ruhende Tumorzellen (G_0 -Phase) oder Zellen in strahlenresistenten Zellzyklusphasen in strahlensensiblere Zyklusphasen (M-, G_2 -Phase) übergehen. Durch die geringeren Einzeldosen werden außerdem die akuten Nebenwirkungen der Bestrahlung reduziert. Da nicht nur das Fraktionierungsschema mit den Einzel- und Gesamtdosen abhängig von der zu behandelnden Erkrankung ist, sondern auch die umliegenden Risikoorgane, die Wahl der Strahlenart und der Bestrahlungstechnik, sowie die Erreichbarkeit des Zielvolumens hinsichtlich der Patientenlagerung berücksichtigt werden müssen, werden für jeden Patienten und für jede Behandlung individuelle Bestrahlungspläne erstellt. [12, 14, 16]

2.3 Behandlungsprozess in die Strahlentherapie (Workflow)

Der Ablauf einer strahlentherapeutischen Behandlung folgt stets einem sich prinzipiell ähnelndem Schema, welches den Arbeitsalltag in der Klinik bestimmt. Die einzelnen Teilprozesse greifen dabei wie Kettenglieder ineinander über, weshalb in der Literatur oft von der „Strahlentherapie-kette“ oder „Qualitätskette“ die Rede ist. Dieser Ablauf ist in Abb. 2.3 schematisch dargestellt und sieht im Wesentlichen folgendermaßen aus [15, 17–22]:

- Der Patient erhält die Diagnose (in der Regel von seinem Hausarzt) und wird zu einem Facharzt überwiesen. Der Facharzt veranlasst je nach Fall verschiedene diagnostische Bildgebungsverfahren (CT, MRT, PET), um den Tumorherd zu lokalisieren. Wenn die Tumorthherapie dies erfordert, stellt er die zwingend notwendige rechtfertigende Indikation für eine Bestrahlung nach § 83 Absatz 3 StrlSchG und § 119 StrlSchV und überweist den Patienten an eine strahlentherapeutische Einrichtung.
- Der Patient wird in der Strahlentherapie vorstellig und sein Fall wird im Tumorboard behandelt. Auf Basis des Befunds, welcher unter anderem das Tumorstadium beinhaltet, erstellen die involvierten Spezialisten der fallspezifischen Fachrichtungen (Onkologen, Strahlentherapeuten, Radiologen, Chirurgen, Urologen, Dermatologen, Neurologen, etc.) gemäß den onkologischen Leitlinien [23] den medizinischen Behandlungsplan, inklusive der eventuell notwendigen zusätzlichen Therapien.
- Basierend auf dem medizinischen Behandlungsplan erfolgt dann die **medizinphysikalische Bestrahlungsplanung**. Hierzu wird zunächst ein Planungs-CT erstellt, für welches unmittelbar vorher eine Immobilisierung des Patienten mittels standardisierten Kissen und Polstern erfolgt. Diese Lagerungsposition muss später exakt reproduziert werden können, um in jeder Therapiesitzung die Bestrahlung entsprechend des ursprünglichen Planes zu gewährleisten. Mit Hilfe des Planungs-CTs werden dann von den Ärzten die Risikoorgane und die Zielvolumina (vgl. Kapitel 2.5.1) definiert, wobei eventuell zusätzliche MRT-Studien für die Konturierung notwendig sein können. Die Medizinphysiker legen anschließend die Bestrahlungsparameter und die -technik, sowie die Strahlenfelder fest. Anschließend wird die notwendige Strahlendosierung berechnet. Der Bestrahlungsplan bzw. vielmehr die Dosisverteilung muss anschließend von den Fachärzten hinsichtlich der medizinischen Machbarkeit evaluiert werden. Erst nach erfolgreicher Evaluation und Freigabe des Plans darf die Bestrahlung am Patienten durchgeführt werden.
- Um zu gewährleisten, dass die tatsächlich erfolgte Bestrahlung am Therapiegerät auch den beabsichtigten Bestrahlungsplänen entspricht, werden die Geräte regelmäßig gewartet und einer technischen Qualitätssicherung inkl. Dosimetriemessungen unterzogen, bevor an ihnen eine Behandlung der Patienten erfolgen kann. Einmalig vor der Bestrahlung wird daher auch der individuelle Bestrahlungsplan des Patienten am Gerät überprüft.
- Wenn der Plan freigegeben wurde, wird mit dem Patienten die geplante Fraktionierung (vgl. Kapitel 2.2) besprochen und entsprechende Behandlungstermine vereinbart. Zu den

einzelnen Bestrahlungseinheiten wird der Patient wieder exakt wie während des Planungs-CTs positioniert. Dies wird in der Regel mittels CT-Aufnahmen kontrolliert (sog. *Image Guided Radiotherapy*, IGRT), wobei die Patientenlagerung solange angepasst wird, bis die Konturen der organischen Strukturen in beiden Aufnahmen sich bestmöglich überlagern. Nachdem erneut verifiziert wurde, dass es sich um den korrekten Patienten entsprechend des Bestrahlungsplans handelt und dieser passend positioniert wurde, wird die eigentliche **Bestrahlung des Patienten** durchgeführt.

- Um den Therapieerfolg zu überprüfen, erfolgt eine medizinische Qualitätssicherung der Behandlung. Treten im Laufe des Behandlungszeitraumes Nebenwirkungen auf oder stimmen die Strukturen nicht mehr mit dem Planungs-CT überein, weil sich beispielsweise die Physiologie des Patienten verändert hat oder der Tumor im Verlauf der Behandlung geschrumpft ist, müssen die Pläne entsprechend angepasst werden. Nach abgeschlossener Behandlung muss sich der Patient zur Sicherstellung des langfristigen Therapieerfolgs regelmäßigen einer Nachsorge unterziehen. Bei fortschreitender Erkrankung, Rezidiven oder auftretenden Nebenwirkungen werden gegebenenfalls weitere Therapien notwendig.

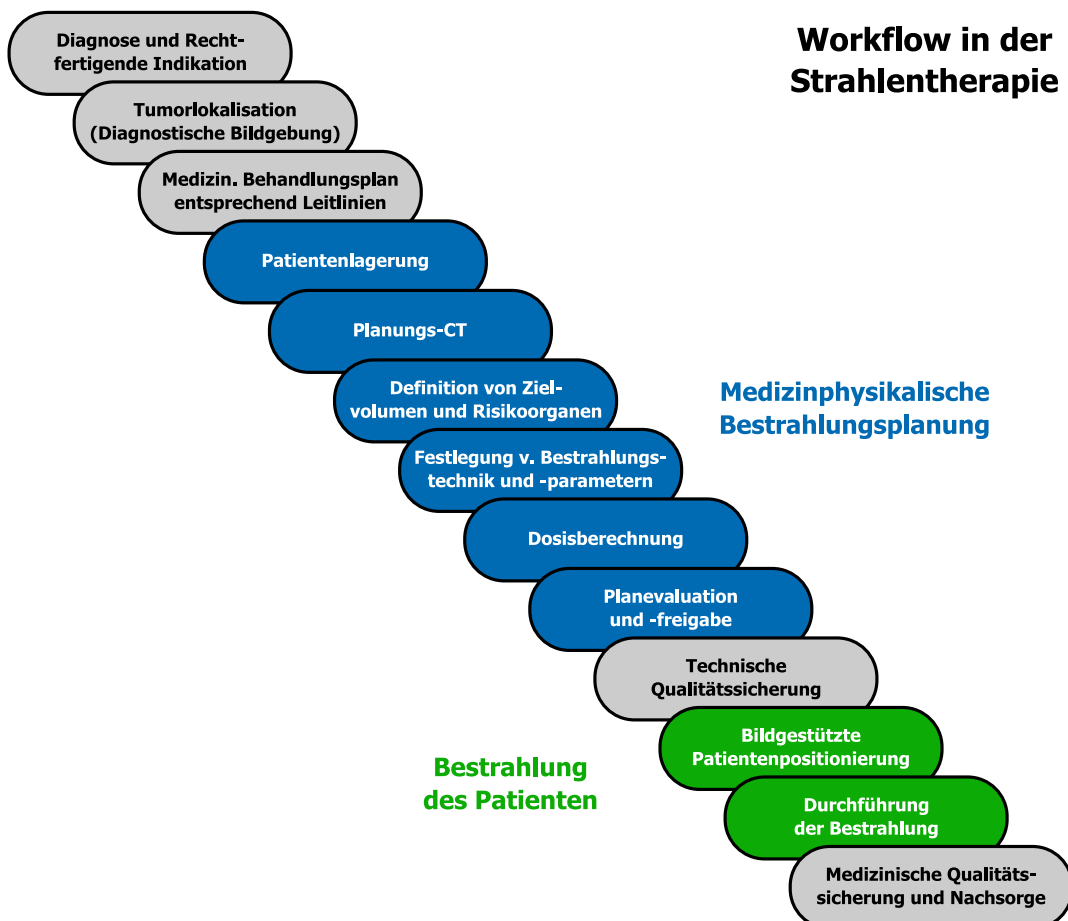


Abb. 2.3: Workflow in der Strahlentherapie von der Diagnose bis zur Nachsorge als Qualitätsskette mit ineinandergreifenden Teilprozessen. [eigene Darstellung basierend auf 15, Abb. 19.1 u. 22, Abb. 1 bzw. 19, Abb. 1]

2.4 DICOM Allgemein

In der modernen Medizin spielen bildgebende Verfahren wie CT oder MRT für die Diagnostik eine zentrale Rolle. Die dabei entstehenden digitalen Bilddaten und Zusatzinformationen müssen unter anderem zwischen Geräten verschiedener Hersteller ausgetauscht und in den IT-Systemen der Arztpraxen, Krankenhäusern und Forschungszentren zur weiteren Verwendung und zur Dokumentation² archiviert werden. Anfang der 1980er Jahre wurde eine Arbeitsgruppe zwischen Interessenvertretern der Anwender (American College of Radiology, ARC) und der Hersteller (National Electrical Manufacturers Association, NEMA) gegründet, welche 1985 eine erste Version eines offenen Standards für die Speicherung und den Austausch medizinischer Bilddaten veröffentlichten. Dieser ACR/NEMA-Standard wurde seit dem ständig aktualisiert und in seiner dritten Version 1993 in DICOM (**D**igital **I**maging and **C**ommunications in **M**edicine) umbenannt. Die aktuellste Version des DICOM Standards ist 2021b und besteht aus 22 Teilen³, welche von mehreren unabhängigen Arbeitsgruppen kontinuierlich weiterentwickelt werden. [24–27]

2.4.1 DICOM Model of the Real World

Der DICOM Standard ist objektorientiert aufgebaut, was bedeutet dass in einem *Model of the Real World* [28] Objekte der realen (medizinischen) Welt wie Patienten, Studien, Messungen, Bilder und ähnliches definiert wurden. Diese Objekte (in DICOM als *Information Objects* bezeichnet) bestehen aus mehreren Attributen (Metainformationen), in denen die Eigenschaften der Objekte näher definiert sind. Das Objekt *Patient* wird damit, wie in Abb. 2.4 schematisch illustriert, beispielsweise über seine Attribute wie *Name*, *Geschlecht* oder *Alter* näher beschrieben. Die zu einem Objekt zugehörigen Attribute sind in den standardisierten *DICOM Information Object Definitions* (IODs) festgelegt, wobei eine IOD nicht eine spezifische Instanz eines realen Objektes darstellt, sondern eher einer Klassendefinition von realen Objekten entspricht, welche die gleichen Eigenschaften bzw. Attribute teilen [29].

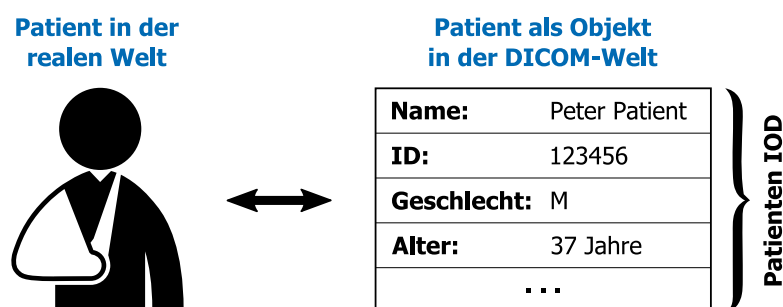


Abb. 2.4: Das Analogon des realen Patienten ist das DICOM Objekt *Patient*, welches durch seine einzelnen Attribute wie Alter oder Geschlecht näher definiert wird, entsprechend der zugehörigen IOD. [nach 24, Fig. 2]

²Aufzeichnungen, sowie Bild- und Untersuchungsdaten zu Anwendungen von Strahlung bei der Behandlung von Menschen sind beispielsweise nach § 85 Absatz 2 StrlSchG 30 Jahre aufzubewahren.

³Die Teile 9 und 13 sind jedoch veraltet und nicht mehr Bestandteil des aktuellen Standards.

Das DICOM Modell der realen Welt besteht vereinfacht aus 4 Objektebenen: Patienten, Studien, Serien und Instanzen (Abb. 2.5). Jede Ebene kann dabei mehrere Unterebenen haben. So kann ein Patient mehreren Untersuchungen (Studien) unterzogen werden, welche wiederum eine oder mehrere Bildserien enthalten können. Die Einzelaufnahmen innerhalb der jeweiligen Serien bilden dann die Instanz-Ebene. Jedes Objekt besitzt dabei einen eindeutigen Identifikationsschlüssel (Unique Identifier, UID, kurz ID), welcher zur Zuordnung auch in den Objekten der nachfolgenden Ebenen hinterlegt sein muss. [24]

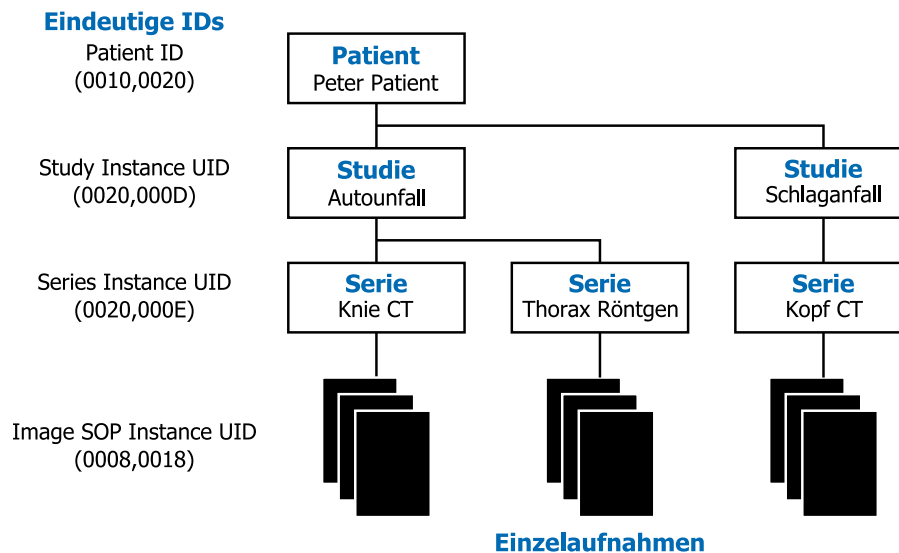


Abb. 2.5: Grundlegende Hierarchie der *DICOM Information Objects*. Jede Ebene kann mehrere Unterebenen haben. Die Zuordnung erfolgt über eindeutige IDs der Objekte. [nach 24, Fig. 15]

2.4.2 Dateiformat, Attribute und Data Dictionary

Die binären DICOM Dateien tragen in der Regel die Endung *.dcm* und bestehen aus jeweils genau einem DICOM Objekt (*Data Set*) und einem vorangestellten Header (Abb. 2.6). Der Dateiheder enthält

- eine 128 Byte umfassende Präambel, deren Struktur und Inhalt sich nach der verwendeten DICOM Anwendung richtet,
- den standardisierten, aus den Buchstaben **DICM** bestehenden Präfix (demnach 4 Byte), welcher andere Anwendungen auf das DICOM Dateiformat hinweist
- und die DICOM Metadaten mit den in Gruppe 0002 [30] festgelegten Informationen.

Die Data Sets repräsentieren die im vorherigen Abschnitt dargestellten Instanzen der *DICOM Information Objects* aus dem Modell der realen Welt. Sie setzen sich wiederum aus Abfolgen von codierten Attributen (*Data Elements*) zusammen, entsprechend der zugehörigen IOD des Objektes. [24, 31]

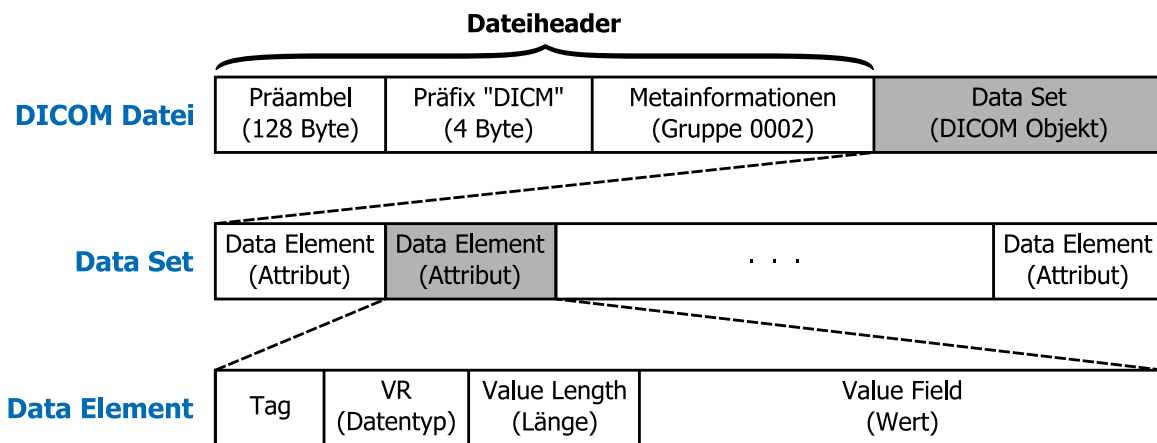


Abb. 2.6: DICOM-Dateien bestehen aus einer Vielzahl von Attributen in binärem Format, welche sich wiederum aus 4 Blöcken zusammensetzen: Dem 16-bit Data Element Tag, dem optionalen Datentyp (VR), der Länge der Werte und die Attributwerte selbst. [nach 31, Figure 7.1-1 u. 24, Fig. 72]

Von diesen standardisierten DICOM Attributen gibt es mehrere Tausend, die im *DICOM Data Dictionary* [32] aufgelistet sind. Anhand des Attributes für den Patientennamen (Tab. 1) sollen die einzelnen Attributinformationen nachfolgend näher erläutert werden.

Tag	(0010,0030)
Name	Patient's Birth Date
Keyword	PatientBirthDate
Description	Date of birth of the named Patient
Value Representation (VR)	Date (DA)
Value Multiplicity (VM)	1
Type	Required, Empty if Unknown (2)

Tab. 1: Informationen im Data Dictionary am Beispiel des Attributs PatientBirthDate. [33]

Ein DICOM Attribut kann über zwei Wege eindeutig identifiziert werden: Zum einen über das **Keyword**, welches in der Regel dem Attributnamen in maschinenlesbarer Form (ohne Sonder- und Leerzeichen) entspricht, und zum anderen über den Data Element **Tag** in der Form (**gggg,eeee**). Inhaltlich verwandte Attribute werden gemäß dem DICOM Entity Relationship Model in Gruppen zusammengefasst. Das **gggg** steht daher für die hexadezimale Gruppennummer (16 bit) und das **eeee** für die hexadezimale Elementnummer des Attributs innerhalb dieser Gruppe (ebenfalls 16 bit). Die geradzahigen Gruppenzahlen sind dabei für DICOM Standardattribute reserviert, während ungerade Zahlen für private, herstellerspezifische Attribute genutzt werden können. Ein Beispiel für eine Attributgruppe sind die zu Beginn dieses Kapitels bereits erwähnten Attribute der Metainformationen im Dateihheader, welche in Gruppe 0002 zusammengefasst sind. Die Tags können auch ein oder mehrere X als Wildcards enthalten, wobei diese dann jeweils für eine beliebige hexadezimale Zahl von 0 bis F stehen. [3, 24, 34]

Die **Value Representation (VR)** definiert die maximal mögliche Länge bzw. das Format eines Feldes und den erlaubten Zeichensatz. Dabei kann die VR explizit, also zusammen mit jedem Objekt definiert sein, meist ist sie jedoch implizit definiert und muss entsprechend anhand des Tags im Data Dictionary nachgeschlagen werden. Hierbei sind knapp 30 Spezifikationen im DICOM Standard festgelegt, beispielsweise

AS *Age String*; Altersangabe mit 4 Bytes im Format nnnD (Tage), nnnW (Wochen), nnnM (Monate) oder nnnY (Jahre). Beispiel: 018M bedeutet 18 Monate

DA *Date*; Datum mit 8 Bytes im Format YYYYMMDD

IS *Integer String*; Zahl zwischen -2^{31} und $2^{31} - 1$ mit opt. Vorzeichen und maximal 12 Bytes

Die **Value Multiplicity (VM)** definiert, wieviele Werte in dem Attribut enthalten sind. Meist entspricht dies 1, beispielsweise beim obigen Geburtsdatum des Patienten. Bei Attributen mit mehreren Angaben und damit höherer Multiplizität, beispielsweise Ortsangaben wie der Position des Isozentrums (bestehend aus den Koordinaten x, y und z in mm), werden diese Angaben dann mit Backslashes (\) oder im Falle von Textfeldern mit Leerzeichen, wie beim Patientennamen, mit einem Zirkumflex (^) getrennt in das Wertefeld des Data Elements geschrieben.

Der **Type** des Elements gibt an, ob das Attribut zwingend notwendig gefüllt sein muss. Dabei kann es zwingend erforderlich (Type 1) sein, dass das Attribut einen Wert enthält, oder es ist zwar eigentlich erforderlich, kann aber auch leer sein (Type 2), oder das Attribut ist gänzlich optional (Type 3). Zusätzlich kann an den Typ ein C angehängt werden, wodurch das Attribut z.B. beim Type 1C nur unter bestimmten Bedingungen gefüllt sein muss.

Der **Name** und die Attributbeschreibung (**Description**) sind selbsterklärende Informationen.

Alle zulässigen Werte und Definitionen innerhalb der Data Elements sind im DICOM Standard PS3.6 [32] hinterlegt. Die Zuordnung der Data Elements zu den Spezifikationen im Data Dictionary erfolgt über den Tag. Neben dem gegebenenfalls expliziten Datentyp (VR) enthält das eigentliche Data Element in der DICOM Datei ein Feld über die Länge des Attributwertes und natürlich den Wert selbst. Für das bisher verwendete Beispiel des Patientennamens wäre der Wert „Peter^Patient“ mit einem Zirkumflex als Trennsymbol. [3, 24, 34]

2.4.3 Gruppen, Module, Information Entities und IODs

Die Data Elements bilden die kleinsten Blöcke in der DICOM Struktur. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erklärt, sind sie im Data Dictionary in Gruppen verwandter Attribute mit aufsteigender Nummerierung sortiert und lassen sich über ihren Tag eindeutig identifizieren. Beispielsweise enthält die Gruppe 0010 alle Elemente, die dem Patienten zuzuordnen sind (z.B. Name, ID, Gewicht, Alter) und Gruppe 0028 enthält Informationen über Bildaufnahmen (z.B. Breite, Höhe, Farbtiefe). Die Gruppenzuordnung der Attribute im Data Dictionary bildet aber noch keine organisierte Struktur für die DICOM Dateien selbst, denn die Data Elements in den DICOM Dateien werden nicht einfach willkürlich aneinander gehängt. Die erste Ebene einer inhaltlichen Struktur der Data Elements bilden die *Information Modules*. Die Hauptfunktion von Modulen ist

es, zusammenhängende Attribute in einer strukturierten und konsistenten Form zu gruppieren. Dabei können nach Modul bestimmte Attribute auch optional befüllt oder leer gelassen werden. Ein Beispiel wäre das *Patient Identification Module*, welches alle zum Patienten zugehörigen Attribute aus Gruppe 0010 umfasst. Ein Attribut kann dabei in mehreren Modulen verwendet werden und ein Modul kann sich aus Attributen unterschiedlicher Attributgruppen zusammensetzen, wie in der exemplarischen Modultabelle der RT Image IODs im Anhang A.1 zu sehen ist. RT Image ist ein Objekt der Erweiterung des DICOM Standards für die Strahlentherapie, welche noch im Kapitel 2.5 thematisiert wird. [3, 24]

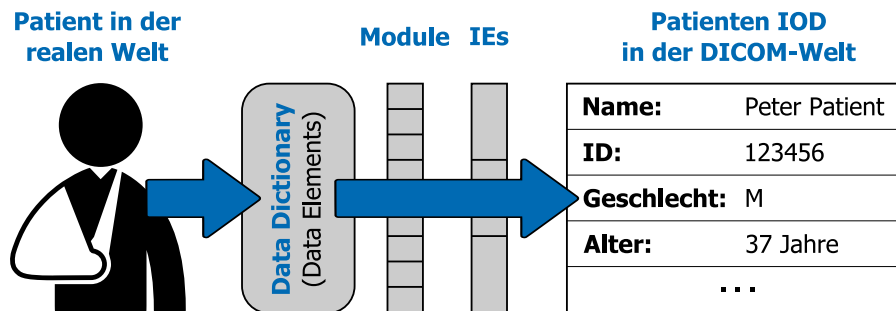


Abb. 2.7: Der Weg vom realen Patienten zum DICOM Patientenobjekt. Der Patient wird durch Attribute (Data Elements) aus dem Data Dictionary charakterisiert. Diese werden in Modulgruppen zusammengefasst, welche wiederum strukturelle Entitäten (IEs) bilden. Die Kombination der notwendigen IEs bildet dann die DICOM Information Object Definition (IOD) des Patienten. [nach 24, Fig. 18]

In Abbildung 2.7 wird der Weg vom realen Patienten zum DICOM Objekt dargestellt. Der reale Patient kann durch seine realen Attribute beschrieben werden, welche gemäß dem Data Dictionary in DICOM Data Elements überführt werden. Diese Data Elements werden in Modulen inhaltlich gruppiert, welche sich wiederum zu Strukturen der nächsthöheren Ebene zusammensetzen: Den *Information Entities* (IEs). Die IEs repräsentieren dabei Entitäten aus dem realen Leben, wie den Patienten, Studien, Geräte, Bilder und ähnliches, welche in den zu beschreibenden Workflows der IODs involviert sind. Das letztendliche DICOM Objekt *RT Image* einer projizierten Aufnahme aus der Strahlentherapie enthält entsprechend der Modultabelle im Anhang A.1 nicht nur Informationen zum Bild selbst (Entität *Image*), sondern auch über das Gerät, mit dem die Aufnahme erstellt wurde (Entität *Equipment*), über den Arzt, der die Aufnahme durchgeführt hat (Entität *Study*), und natürlich über den Patienten selbst (Entität *Patient*). Mit all diesen Informationen kann das DICOM Objekt letztlich charakterisiert werden und diese Beschreibung, welche Informationen zur Charakterisierung des Objektes notwendig sind, werden auf der höchsten Strukturebene zusammengeführt, in den bereits im Kapitel 2.4.1 vorgestellten *Information Object Definitions* (IODs). Dabei unterscheidet DICOM zwischen normalisierten und zusammengesetzten IODs. Der Patient als separates Objekt entspräche einer normalisierten IOD, da diese einer einzigen Entität aus der realen Welt verkörpert und alle Attribute dieser realen Entität inhärent in der DICOM Entität wiederzufinden sind. Zusammengesetzte IODs wie die des zuvor verwendeten Objektes *RT Image* sind eine Komposition aus normalisierten IODs, da sie Teile der Informationen verschiedener Entitäten wie dem Patienten, dem verwendeten Gerät oder auch des einzelnen Bildes vereinen. [3, 24]

2.4.4 SOP-Klassen und Konformitätserklärungen

DICOM ist jedoch nicht nur ein Format zur Speicherung von medizinischen Bildern, sondern ein wesentlich breiterer Standard, um möglichst alle Facetten des klinischen Workflows abzubilden. Dazu gehören nicht nur statische, abstrakte Objekte wie Befunde, Bilder oder Patienten, sondern auch der Austausch von Daten und Befehlen zwischen verschiedenen Geräten und Anwendungen (*Application Entities*, AEs). Befehle oder Operationen werden in DICOM *Services* (Dienste) genannt und können auf Objekte angewendet werden. Die dabei entstehenden Service-Objekt-Paare (SOPs) bildet die funktionellen Grundeinheiten von DICOM und spielen eine entscheidende Rolle in der Kommunikation zwischen DICOM-fähigen Endgeräten. So kann beispielsweise der Dienst *Bild speichern* auf das Objekt *CT-Bild* angewendet werden, wodurch das SOP *CT-Bild speichern* entsteht. Genau wie in den IODs in Bezug auf die Objekte, wird hier in sog. SOP-Klassen definiert, welche Typen der auszuführenden Dienste für das jeweilige SOP enthalten und welche Informationen vorhanden sein müssen, um die Operation durchführen zu können. Zwei AE können dann miteinander interagieren, wenn das eine Gerät ein SOP anbietet (als sogenannter Service Class Provider, SCP), welches ein anderes Gerät (Service Class User, SCU) benötigt. Für das Beispiel *CT-Bild speichern* wäre demnach der SCU ein CT-Scanner, welcher ein CT-Bild abspeichern möchte und das zweite Geräte, der SCP, wäre entsprechend eine Datenbank, bzw. ein System zur Archivierung medizinischer Bilder (PACS). Der Kommunikationsablauf zwischen diesen beiden Geräten wurde in Abbildung 2.8 als Sequenzdiagramm veranschaulicht. Damit Geräte von unterschiedlichen Herstellern miteinander über den DICOM Standard kommunizieren können, gibt es zu den Geräten entsprechende Konformitätserklärungen (DICOM Conformance Statements). In diesen werden nicht nur die von den Geräten unterstützten DICOM-Dienste aufgelistet, sondern auch die verwendeten privaten Tags (vgl. Kapitel 2.4.2) erläutert. [24, 35]

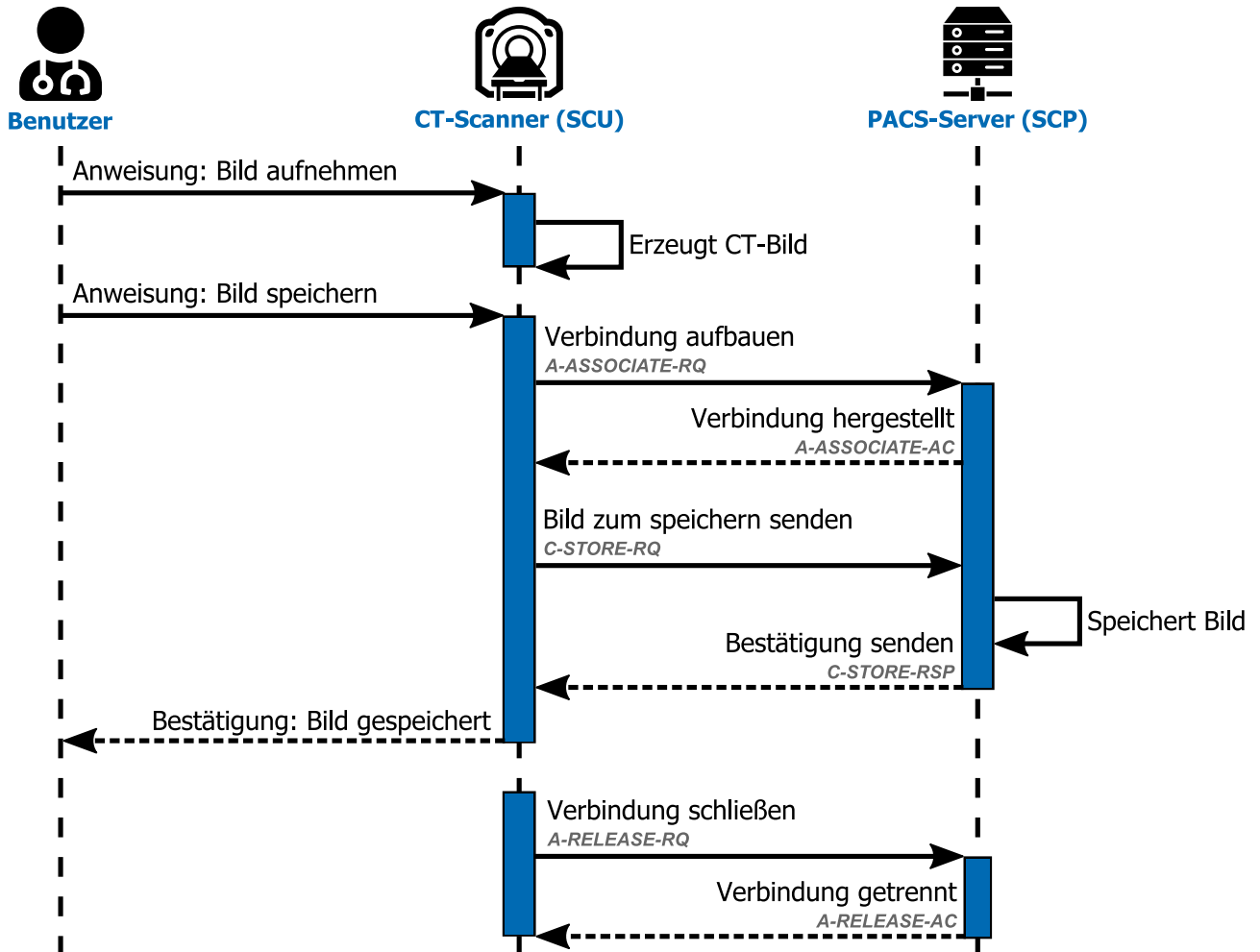


Abb. 2.8: Sequenzdiagramm der Kommunikation zwischen den DICOM-AEs *CT-Scanner* und *PACS-Server* beim Export eines neu generierten CT-Bildes. [eigene Darstellung basierend auf 36, Figure 4-4 u. 37, Figure 4]

2.5 DICOM-RT-Daten in der Strahlentherapie

Nach der sehr ausführlichen Einführung in den DICOM Standard sollen nun die Besonderheiten und Anforderungen von DICOM-RT-Daten⁴ in der Strahlentherapie erläutert werden. Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, bilden die individuellen Bestrahlungspläne die Grundlage für die strahlentherapeutische Behandlung. Die hiermit verknüpften Informationen und Objekte lassen sich jedoch nicht mit den ursprünglichen DICOM Objekten abbilden. Hierzu wird, wie ebenfalls bereits erwähnt, der DICOM Standard stetig von Arbeitsgruppen des DICOM Committees weiterentwickelt, beispielsweise seit 1994 von der Working Group 7 (WG-07), welche mit der Ausarbeitung der Erweiterungen (DICOM Supplements) für die Strahlentherapie betraut ist. Mittlerweile gibt es mehr als 200 DICOM Supplements, um zusätzlichen Anforderungen an den Standard aus den verschiedensten, überwiegend medizinischen Gebieten wie Nuklearmedizin, Dermatologie, Radiologie, Pathologie bis hin zur Zahn- und Veterinärmedizin gerecht zu werden. [26, 38]

2.5.1 DICOM-RT-Objekte der ersten Generation

Bereits vor der internationalen Etablierung des DICOM Standards, gab es Bestrebungen, den Datenaustausch und die Dokumentation in der Strahlentherapie zu standardisieren. So wurde 1982 von der Radiotherapy Oncology Group (RTOG) basierend auf Empfehlungen der American Association of Physics in Medicine (AAPM) ein RTOG-Standard veröffentlicht, welcher bereits alle Informationen mit Bezug zur Strahlentherapie wie Bilder, Dosisverteilungen, Dosisvolumenhistogramme oder Therapietechniken enthielt. Dieser setzte sich jedoch nicht als allgemeiner Kommunikationsstandard durch, weshalb später weitere dahingehende Initiativen gestartet wurden, die schließlich 1994 zur Gründung der *RT-DICOM Ad-hoc Working Group* (die spätere WG-07) und damit zum Transfer des Projektes in den zu dieser Zeit bereits etablierten DICOM Standard führten. Dieser wurde durch entsprechende Supplements 1998 und 2000 erweitert und enthält seit dem neue DICOM-RT-Objekte, die noch heute Anwendung finden. In Abb. 2.9 sind die Beziehungen bzw. die Referenzen der Objekte untereinander dargestellt und im nachfolgenden sollen die einzelnen Objekte näher erläutert werden [17, 20, 26, 39, 40]:

- **RT Image:**

Ähnlich der Image IOD für radiologische Bilder enthält die RT Image IOD alle zugehörigen Attribute zu den Bildern aus der Strahlentherapie, welche unter Verwendung einer konischen Geometrie akquiriert bzw. errechnet wurden. Dazu zählen Projektionsaufnahmen, digitale Röntgenrekonstruktionen (DRR) aus CT-Scans, aber auch Simulationsbilder oder die Aufnahmen der integrierten Cone-Beam-CTs einiger Linearbeschleuniger. Im Gegensatz zu den normalen DICOM Image Objekten enthalten die RT Images neben den Bilddaten zusätzliche Informationen. Dazu gehören u. a. die bei der Erzeugung des Bildes verwendeten Parameter (z.B. den Gantry-Winkel, Abstand zwischen Bildebene und Strahlerkopf, Position des Isozentrums oder Position der Patientenliege), sowie Informationen über das Aufnahmegerät an sich (Name, Hersteller, etc.) und den referenzierten RT Plan.

⁴RT steht dabei für Radiotherapy

■ RT Plan:

Die RT Plan IOD enthält alle Informationen aus dem Bestrahlungsplan, um die Therapie durchführen zu können. Dazu gehören unter anderem die verschriebenen Dosen und Toleranzdosen, das Fraktionierungsschema, Informationen zur Patientenlagerung, sowie Angaben zur verwendeten Bestrahlungstechnik. Der RT Plan speist sich aus Informationen von unterschiedlichen anderen Systemen und wird auch benötigt, um die Dosisverteilung aus der RT Dose interpretieren zu können. Für die Schwerionentherapie wurde eine eigene IOD **RT Ion Plan** geschaffen, um die damit verbundenen speziellen Anforderungen abbilden zu können. Die Behandlung mit dieser völlig anderen Strahlungsart unterscheidet sich zur herkömmlichen Photonentherapie vor allem darin, dass die biologische Wirkung und damit die Dosiskonformität eine andere ist, sowie das zur Erzeugung andere Beschleunigersysteme benötigt werden.

■ RT Structure Set:

Im Structure Set werden signifikante Strukturen in relevanten Körperregionen des Patienten (Region of Interest, ROI) definiert, unter anderem die Körperkonturen und die Risikoorgane, Dosisreferenzpunkte, oder auch die verschiedenen klinischen Volumina. Die drei in der Strahlentherapie definierten primären Zielvolumina sind:

- Das GTV (*Gross Tumor Volume*), welches die makroskopische Ausdehnung des Tumors umfasst, die bildgebend dargestellt werden kann,
- das CTV (*Clinical Target Volume*), das die nicht bildgebend darstellbare, mikroskopische Tumorausbreitung um das GTV herum mit einschließt
- und das PTV (*Planning Target Volume*), welches das zu behandelnde Volumen definiert und neben dem GTV und dem CTV einen zusätzlichen Sicherheitssaum umfasst, um beispielsweise räumliche Verschiebungen durch Atmung oder Peristaltik des Patienten zu berücksichtigen.

Diese Strukturen oder Marker können als Punkte, Linien, Oberflächen oder 3D-Objekte abgespeichert werden und beinhalten meist zusätzliche Informationen wie die Elektronendichte und eventuelle Koordinatentransformationen zu anderen Frame of References.

■ RT Dose:

Die Dosisverteilung liegt heutzutage als dreidimensionaler Dosiswürfel in Form eines 3D-Gitters vor, welcher für die Bestrahlungsplanung auf einzelne 2D-Schichtebenen transformiert werden muss. Diese Schichten werden als Serie bzw. Multiframe Objekt im RT Dose hinterlegt. Zusätzlich können hier Dosisvolumenhistogramme (DVH) hinterlegt werden, welche die Häufigkeitsverteilung der Dosiswerte in den Zielvolumina abbilden und damit eine Bewertung der generellen Dosisverteilung und eine Abschätzung der Strahlenwirkung im Organ ermöglichen. Die DVH verweisen dabei wieder auf die zugehörige ROI im RT Structure Set.

■ **RT Treatment Record:**

Die Treatment Records sind quasi die Protokolle der einzelnen Behandlungssitzungen. Das **RT Beams Treatment Record** Objekt beinhaltet Informationen zu den tatsächlichen Parametern, die bei der jeweiligen Behandlungssitzung verwendet wurden. Zusätzlich sind Informationen u.a. zu den gemessenen Dosiswerten, der Fraktionierung, den Einstrahlrichtungen und auch zeitliche Angaben zur Sitzung enthalten. Jede Einzelbestrahlung wird als separate Instanz des RT Beams Treatment Record Objekts angelegt. Genau wie schon beim RT Ion Plan gibt es auch hier eine IOD **RT Ion Beams Treatment Record** speziell für Behandlungen mit Schwerionen und zudem die IOD **RT Brachy Treatment Record** für die Brachytherapie, bei der die Patienten nicht wie bei der Teletherapie von außen bestrahlt werden, sondern sich die Strahlenquelle in unmittelbarer Nähe des Tumors befindet. Im **RT Treatment Summary Record** werden die kummulierten Bestrahlungsinformationen aus den einzelnen Therapieeinheiten zusammengefasst, um einen Überblick über den aktuellen Status des Behandlungsplans zu erhalten. Dazu gehören unter anderen die aktuelle Zahl der bestrahlten Fraktionen, die aufsummierte Dosis und das Datum der ersten und letzten Behandlungssitzung.

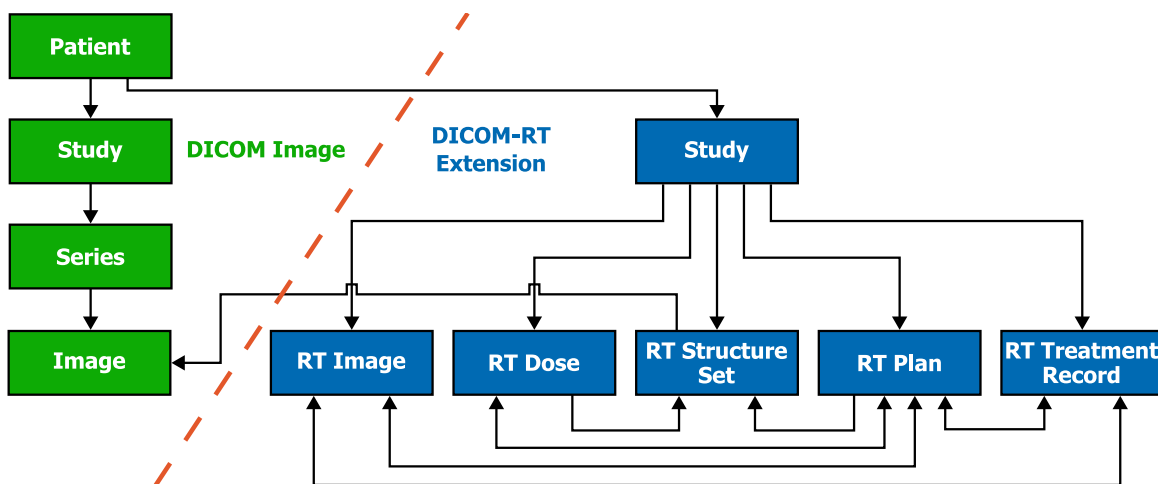


Abb. 2.9: Information Modell der DICOM-RT Objekte aus der DICOM-RT Erweiterung der ersten Generation (bis 2013). Die Pfeile stellen die Referenzierungen der Objekte untereinander dar. [nach 17, Figure 4 u. 41, Figure 7-2c]

2.5.2 DICOM-RT-Objekte der zweiten Generation

Seit der Einführung des DICOM-RT-Objekte haben sich sowohl der DICOM Standard, als auch der Workflow in der Strahlentherapie bedeutend gewandelt. Die Objekte der ersten Generation stellten sich als zu starr und überladen für den dynamischen Informationsfluss in Kliniken dar. Zudem können neue Behandlungstechniken und Equipment nicht oder nur sehr schwer mit den bestehenden IODs abgebildet werden. Aus diesem Grund arbeitete die WG-07 seit 2007 im *Supplement 147: Second Generation Radiotherapy* [42] an einer vollständigen Überarbeitung der überladenen RT IODs der ersten Generation. Seit dem sind zahlreiche weitere Supplements bezüglich der zweiten DICOM-RT Generation hinzugekommen, welche eine flexiblere Struktur aus kleineren und effizienteren Objekten mit spezialisierten Definitionen bereitstellen, die weniger optionale Attribute beinhalten. Zusätzlich kann ein flexiblerer Workflow abgebildet werden, da die bisher starren Beschränkungen der RT Plan IOD durch eine Vielzahl an neuen Objekten ersetzt wurden, welche den Workflow besser abbilden. [40, 42, 43]

Die damit einhergehende Erweiterung des DICOM Model of the Real World für Objekte der 2. Generation [44] ist auf der DICOM-Seite einsehbar und soll hier aufgrund der Komplexität nicht zusätzlich aufgeführt werden. Abbildung 2.10 zeigt jedoch das Entity-Relationship-Modell derjenigen Komponenten des DICOM Information Models, welche relevant für die IODs der zweiten DICOM-RT Generation sind.

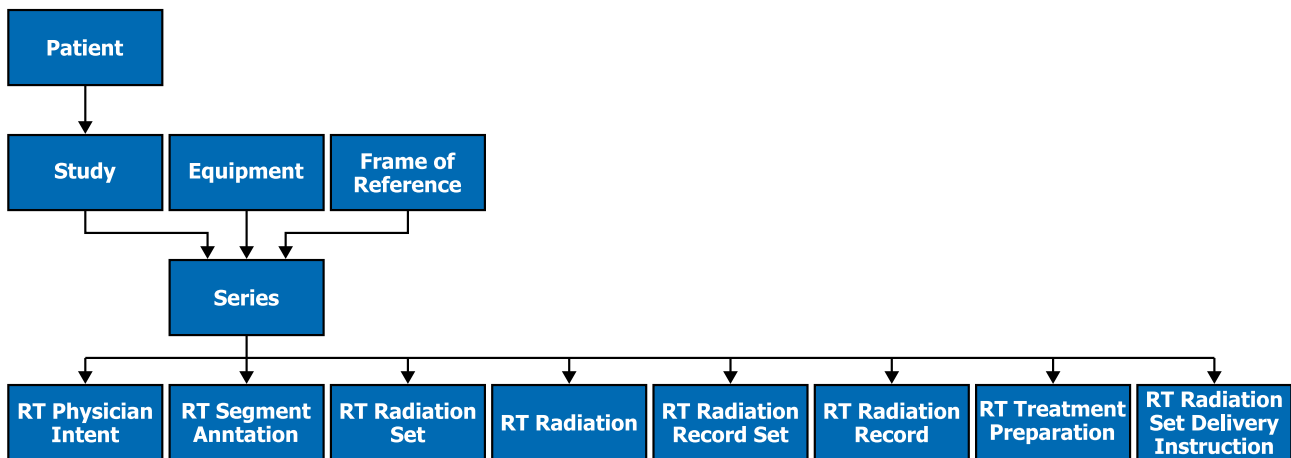


Abb. 2.10: Die Objekte aus der DICOM-RT Erweiterung der zweiten Generation. [nach 45, Figure A.86.1.1.1-1]

Die detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den Prozessabläufen in der Strahlentherapie (vgl. Kapitel 2.3) und den dabei entstehenden DICOM Objekten, inklusive der Verknüpfung dieser Objekte untereinander über die jeweiligen ID-Attribute, wird einen essentiellen Bestandteil der nachfolgenden Masterarbeit darstellen, weshalb an dieser Stelle auf eine tiefere Betrachtung der DICOM-RT-Objekte und ihrer Abhängigkeiten verzichtet wird. Auch wenn die zweite Generation von DICOM-RT bereits seit Jahren theoretisch im Standard implementiert ist, so haben viele Hersteller von Planungssoftware und Therapiegeräten diese Objekte derzeit noch nicht in ihren Produkten implementiert. Entsprechend spielt die zweite Generation im klinischen Alltag der Strahlentherapie des Universitätsklinikums Bonn derzeit noch keine Rolle.

3 Voruntersuchung des Testdatensatzes

Das Ziel dieser Vorarbeit sollte sein, ein geeignetes Toolkit oder eine Anwendung zu finden, um die Header von verschiedenen DICOM-RT-Testdaten dezentral analysieren zu können. Um sich mit den Daten und der Struktur der DICOM-Header vertraut zu machen, wurden zunächst die Daten lokal analysiert.

Um sich generell mit dem anfangs unbekanntem Datensatz vertraut zu machen, sollten die Daten mit einem bekannten, funktionierenden Tool analysiert werden. Der Testdatensatz wurde freundlicherweise von der Klinik für Strahlentherapie und Radioonkologie des Universitätsklinikums Bonn bereitgestellt. Der erste Datensatz bestand aus 277 Dateien im DICOM-Format, die eigentlich mit dem DCMTK-Package analysiert werden sollten. Das DICOM-Toolkit DCMTK des OFFIS e.V., einem An-Institut für Informatik der Universität Oldenburg, ist nach eigenen Angaben eine Open-Source Sammlung von Bibliotheken und Anwendungen unter anderem zum Untersuchen, Erzeugen und Konvertieren von DICOM-Bilddateien [1]. In dem in C++ und ANSI C geschriebenen Toolkit sind auch Anwendungen zum Auslesen von DICOM-Headern enthalten, jedoch erwies sich die Installation als komplizierter als erwartet. Zur Verwendung des DCMTK ist eine Installation des Open-Source-Paketmanagers Chocolatey [46] notwendig, welche über eine administrative Shell (verwendet wurde die Windows PowerShell) ausgeführt werden kann. Der anschließende Versuch, das DCMTK-Package in der Version 3.6.6 zu kompilieren, schlug jedoch aus letztlich nicht vollständig eruierten Gründen fehl. Da auch die zugehörige Dokumentation keine rasche Abhilfe für die augenscheinlich technischen Inkompatibilitäten schaffen konnte, wurde kurzerhand für die erste Analyse der Daten auf vertrautere Programme zurückgegriffen. Die auf dem Arbeitsrechner bereits vorhandene MATLAB-Installation [4] unterstützt dank der zugehörigen Image Processing Toolbox⁵ Dateien im DICOM-Format [47], so dass damit die Header unkompliziert und schnell ausgelesen werden konnten.

Die erste Untersuchung der Headerdaten hat ergeben, dass es sich bei den bereitgestellten Dateien um unterschiedliche Aufnahmen eines Phantoms *CatPhan* handelt, welches mutmaßlich zur Qualitätskontrolle des Linearbeschleunigers verwendet wird. Der bereitgestellte Datensatz enthielt 284 Dateien, wobei deren Bezeichnung bereits Rückschlüsse auf den mutmaßlichen Inhalt zuließen. Folgende Dateibezeichnungen waren im Datensatz vertreten:

- 272 Dateinamen beginnend mit *CT*
- 1 Dateiname beginnend mit *RE*
- 7 Dateinamen beginnend mit *RI*
- 2 Dateinamen beginnend mit *RP*
- 2 Dateinamen beginnend mit *RS*

⁵Verwendet wurde MATLAB[®] Version 8.5.0.197613 (R2015a) mit der Image Processing Toolbox[™] 9.2 [4]

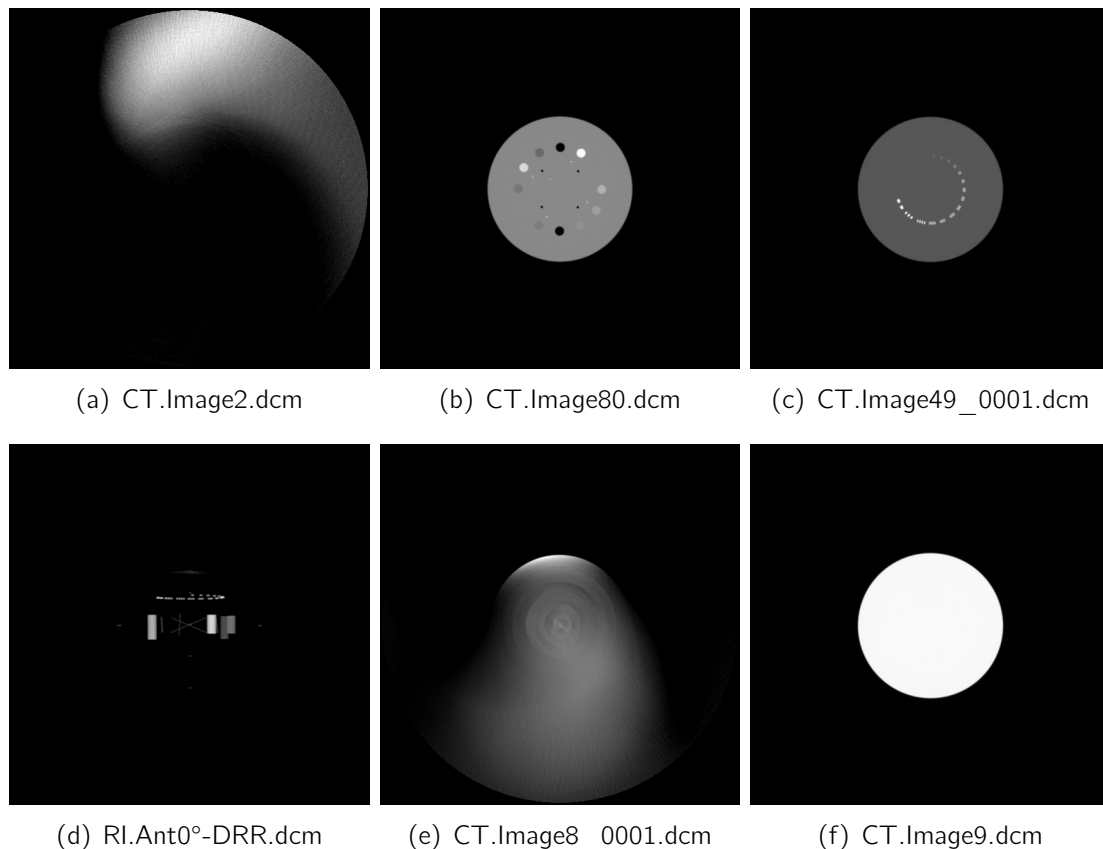


Abb. 3.1: Exemplarische Aufnahmen aus dem Datensatz, rekonstruiert als Graustufenbilder mit MATLAB.

Um sich ein wortwörtliches Bild von dem Phantom machen zu können, wurde versucht, die eventuell enthaltenen Bilddaten in Graustufenbilder zu konvertieren. Dies ist in der beschriebenen MATLAB-Paketkonfiguration mit den vereinfachten Befehlen im nachfolgenden Code Snippet möglich. Ebenfalls darin enthalten ist der Befehl zum Auslesen des gesamten Headerinhalts (*Header Dump*) einer DICOM Datei. Es war mit diesen Befehlen nur möglich, Graustufenbilder aus den Dateien zu generieren, deren Bezeichnung mit *CT* und *RI* beginnt. Eine Auswahl dieser generierten Bilder ist in Abb. 3.1 dargestellt.

```

1 % DICOM Datei vom Ort <filepath> als .png-Bild am Ort <newpath.png> abspeichern
2 dcmFile = dicomread(filepath);
3 dcmImage = uint8(255 * mat2gray(dcmFile));
4 imwrite(dcmImage, [newpath, '.png'], 'png');
5
6 % DICOM Header auslesen
7 headerDump = dicominfo(filepath);

```


Die Untersuchung der Headerdaten ergab, dass die Dateien mit unterschiedlichem Dateipräfix erwartungsgemäß auch unterschiedlich viele Headerattribute enthalten (*CT*: 89 Attribute, *RE*: 55, *RI*: 90, *RP*: 66, *RS*: 53). Insgesamt gibt es 149 einzigartige Attribute, wobei 42 Attribute in allen 5 Dateitypen vorkommen. In Anhang A.2 wurden die Attribute entsprechend ihres Vorkommens in den 5 Präfixgruppen tabellarisch dargestellt. Um Dateien mit unterschiedlichem Präfix auf eindeutig einer SOP Klasse zuordnen zu können (vgl. Kapitel 2.4.4), wurde jeweils das Attribut *SOPClassUID* aus allen Headern extrahiert. Dieses Attribut enthält die Information über die Media Storage Standard SOP Klasse und damit auch die IOD Spezifikationen der Datei. Dabei konnten den Präfixen der DICOM-Dateien folgende Klassen zugeordnet werden:

Datei-Präfix	SOP Class UID	Klasse
CT	1.2.840.10008.5.1.4.1.1.2	Computed Tomography Image Storage
RE	1.2.840.10008.5.1.4.1.1.66.1	Spatial Registration Storage
RI	1.2.840.10008.5.1.4.1.1.481.1	Radiation Therapy Image Storage
RP	1.2.840.10008.5.1.4.1.1.481.5	Radiation Therapy Plan Storage
RS	1.2.840.10008.5.1.4.1.1.481.3	Radiation Therapy Structure Set Storage

Tab. 2: Zuordnung der Datei-Präfixe zu den Datenstrukturklassen anhand der SOP Class UID

Damit wurde die anfängliche Vermutung bestätigt, dass es sich bei den Dateien mit unterschiedlichem Präfix um die im Kapitel 2.5 aufgeführten DICOM-RT-Objekte **RT Image** (Präfix *RI*), **RT Structure Set** (Präfix *RS*) und **RT Plan** (Präfix *RP*) handelt. Die Bilddateien mit Präfix *CT* sind radiologische DICOM **CT Image** Objekte und die Datei mit dem Präfix *RE* beinhaltet das Objekt **Frame of Reference**, also den Referenzrahmen an dem sich alle Bilder der gleichen Serie orientieren. Entsprechend war es nicht überraschend, dass nur aus den RT Image und den CT Image Dateien auch Graustufenbilder generiert werden konnten, da die anderen Objekte keine Bilddaten enthalten. Das aufgenommene Phantom in Abb. 3.1 ist Teil der Qualitätssicherung und dient der Optimierung der Bildqualität hinsichtlich Auflösung und Kontrast, über die im Phantom enthaltenen Materialien mit unterschiedlicher Elektronendichte.

4 Entwicklung des Analysetools

4.1 Anforderungskatalog und Auswahl der Skriptsprache

Nachdem die Struktur der Testdaten erarbeitet wurde, musste eine geeignete Sprache, bzw. ein passendes Softwarepaket gefunden werden, um damit ein eigenes Analysetool für die DICOM-Header zu entwickeln. Das Tool sollte folgende Anforderungen erfüllen:

1. Man muss die Headerdaten von DICOM-RT-Datensätzen damit auslesen können
2. Es soll keine zusätzliche Software auf Klinikrechnern installiert werden müssen
3. Man muss die Attribute variabel (bedarfsorientiert) auslesen und weiterverarbeiten können
4. Bestenfalls fallen keine zusätzlichen Nutzungs- und Lizenzgebühren an

Da aus Wartungs- und Sicherheitsgründen keine zusätzliche Software auf den Arbeitsrechnern der Strahlentherapieklिनик installiert werden soll, lag der Schluss nahe, nach einer browserbasierten Lösung zu suchen. So könnte auf Client-Seite eine Eingabemaske im ohnehin installierten Webbrowser genutzt werden, um die DICOM-Dateien lokal einzulesen, diese auf einem Webserver im Netzwerk zu analysieren und anschließend die Ergebnisse wieder an den Client-Browser senden zu lassen. Aufgrund der Vorerfahrung in der Programmierung mit PHP⁶ wurde zunächst nach entsprechenden Packages gesucht, mit denen eine Anwendung entwickelt werden kann, die obengenannte Anforderungen erfüllt. Dabei wurden zwar diverse, scheinbar passende PHP-Packages gefunden, die jedoch veraltet sind und nicht mehr gewartet werden. So ist beispielsweise die aktuellste Version des **File_DICOM**-Packages [49] die Beta-Version von 2003 und für das eigentlich vielversprechende **NanoDICOM**-Package [50] wurde die letzte Version 2011 für das mittlerweile stark veraltete PHP 5.2 veröffentlicht⁷. Bei der Suche nach aktuelleren Packages wurden jedoch auch interessante Lösungen entdeckt, die auf eine serverseitige Komponente gänzlich verzichten können.

Die DICOM-Dateien enthalten sensible Patienteninformationen, weshalb es immer eines besonderen Sicherheitsaufwandes bedarf, um diese Daten zu verarbeiten und vor allem sie über das Netzwerk zu verschicken. Mit **dcmjs** [2] existiert eine interessante JavaScript-Cross-Compilation des bereits vorgestellten DCMTK (vgl. Kapitel 3). Diese wurde 2014 entwickelt und 2018 letztmalig aktualisiert und da sie vollständig auf JavaScript⁸ basiert, kann sie direkt im Browser ausgeführt werden, ohne eine Serververbindung zu benötigen. Nach einigen vielversprechenden Versuchen stellte sich jedoch heraus, dass dcmjs hauptsächlich für radiologische Bilddaten konzipiert wurde. Man kann sich zwar einen Header Dump über den Befehl *dcmdump* vom DCMTK generieren lassen, dieser müsste dann aber noch umständlich „von Hand“ geparkt werden. Das wird dadurch massiv erschwert, dass der zugrunde liegende Code verschlüsselt ist und man entsprechend mit einer Blackbox arbeiten muss.

⁶PHP ist eine speziell für die Webprogrammierung geeignete Open Source-Skriptsprache [48].

⁷Die aktuelle PHP-Version 8 wurde im November 2020 veröffentlicht und kürzlich auf 8.1.0 aktualisiert [51].

⁸JavaScript ist eine Skriptsprache, die für dynamische Inhalte in Webbrowsern entwickelt wurde, um beispielsweise Benutzerinteraktionen zu verarbeiten oder Inhalte zu generieren und zu verändern [52].

Glücklicherweise konnte eine ähnliche alleinstehende JavaScript-Bibliothek gefunden werden: Der **Cornerstone.js dicomParser** von Chris Hafey [53]. Diese ist im Gegensatz zum dcmjs keine veraltete „Blackbox“, sondern eine gut dokumentierte, leichtgewichtige Bibliothek mit einer sehr liberalen Lizenzierung⁹, welche bis heute weiterentwickelt wird und dank zahlreicher, interaktiver Code-Beispiele gut zugänglich ist. Darauf aufbauend war es möglich, ein browserbasiertes DICOM-RT-Analysetool mit einer Benutzeroberfläche mit HTML 5 und CSS 3¹⁰ zu entwickeln, welches alle oben genannten Anforderungen erfüllt.

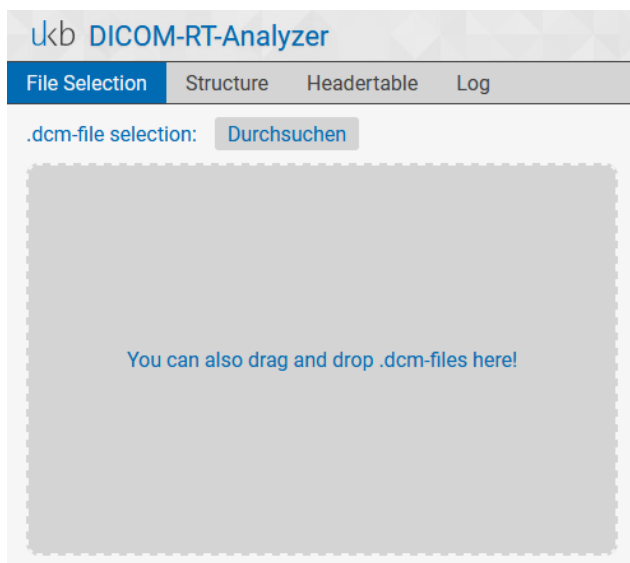
⁹Veröffentlicht als Open-Source-Projekt unter der MIT-Lizenz, welche eine kostenfreie Erlaubnis zur uneingeschränkten Nutzung, Änderung und Veröffentlichung des offenen Quellcodes erlaubt.

¹⁰Hierbei handelt es sich um Auszeichnungssprachen für Webseiten, welche weitverbreitet in der modernen Webentwicklung sind.

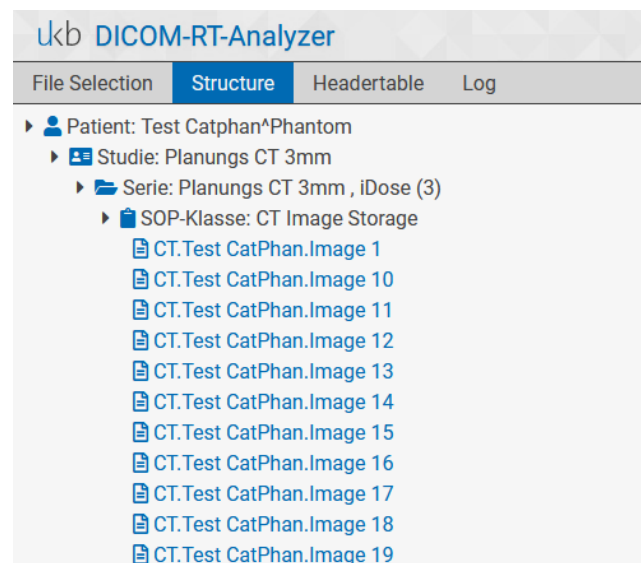
4.2 Benutzeroberfläche (Frontend)

Die mit HTML 5 und CSS 3 entwickelte Benutzeroberfläche des Tools wurde minimalistisch gehalten. Sie besteht in der derzeitigen Version aus einer Kopfzeile mit Titel, einem Balkenmenü und einem veränderlichen Inhaltscontainer. Abbildung 4.1a zeigt die Startseite, über welche die DICOM-Dateien ausgewählt werden können. Hierzu wurde das zum Cornerstone.js dicomParser zugehörige Live-Beispiel *DICOM Dump with Data Dictionary* [54] derart angepasst, dass man mehrere Dateien gleichzeitig per Drag & Drop, bzw. alternativ über einen entsprechenden Button auswählen kann. Mit Auswahl der Dateien wird das Skript gestartet, die nachfolgenden Schritte werden im nächsten Kapitel näher erläutert. Sollten beim Upload der Daten oder beim Parsen eine Unregelmäßigkeit auftreten, wird dies im Tab *Log* angezeigt. In Abbildung 4.2 ist dies exemplarisch mit ein paar Warnungen dargestellt, die durch fehlende Einträge von herstellerspezifischen Tags im eigens erstellten Data Dictionary hervorgerufen wurden. Die Ergebnisse der Analyse werden dem Nutzer derzeit auf zwei verschiedene Arten zur Verfügung gestellt:

- Im Tab **Structure** (Abb. 4.1b) wird die Struktur der ausgewählten Dateien gemäß der DICOM-Hierarchie (vgl. Abb. 2.5) nach Patienten, Studien, Serien und den jeweiligen SOP-Klassen der Dateien aufgeschlüsselt.
- Im Tab **Headertable** (Abb. 4.3) werden die geparsen Headerattribute der einzelnen Dateien in einer ausklappbaren Tabelle dargestellt.



(a) Tab *File Selection*



(b) Tab *Structure*

Abb. 4.1: Die minimalistische Benutzeroberfläche des entwickelten Analysetools.

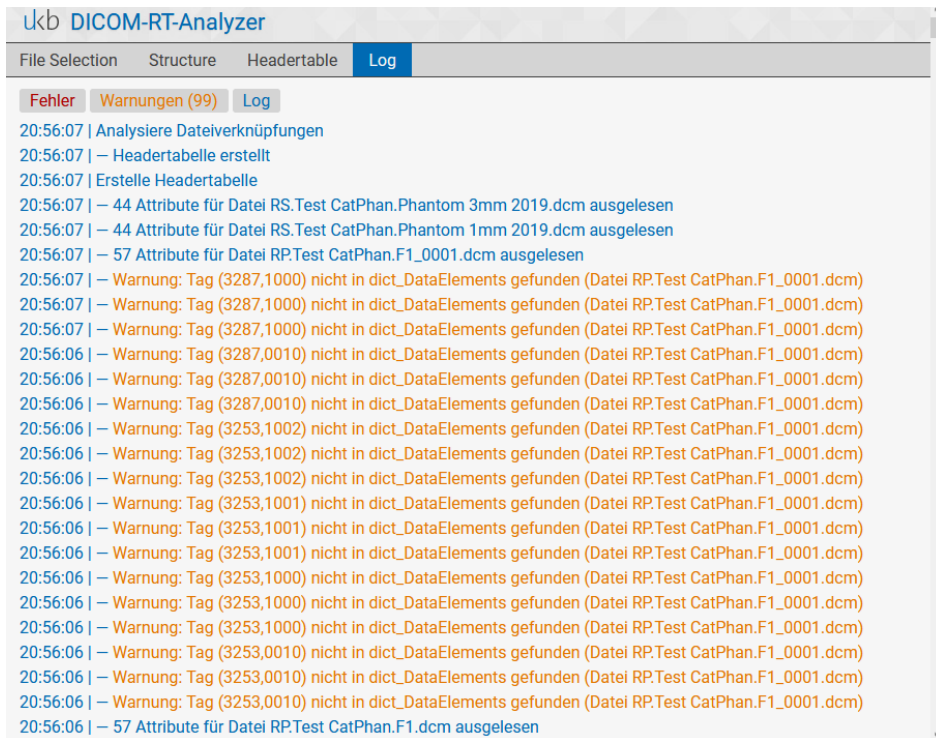


Abb. 4.2: Tab Log mit der Ausgabe von Warnungsmeldungen

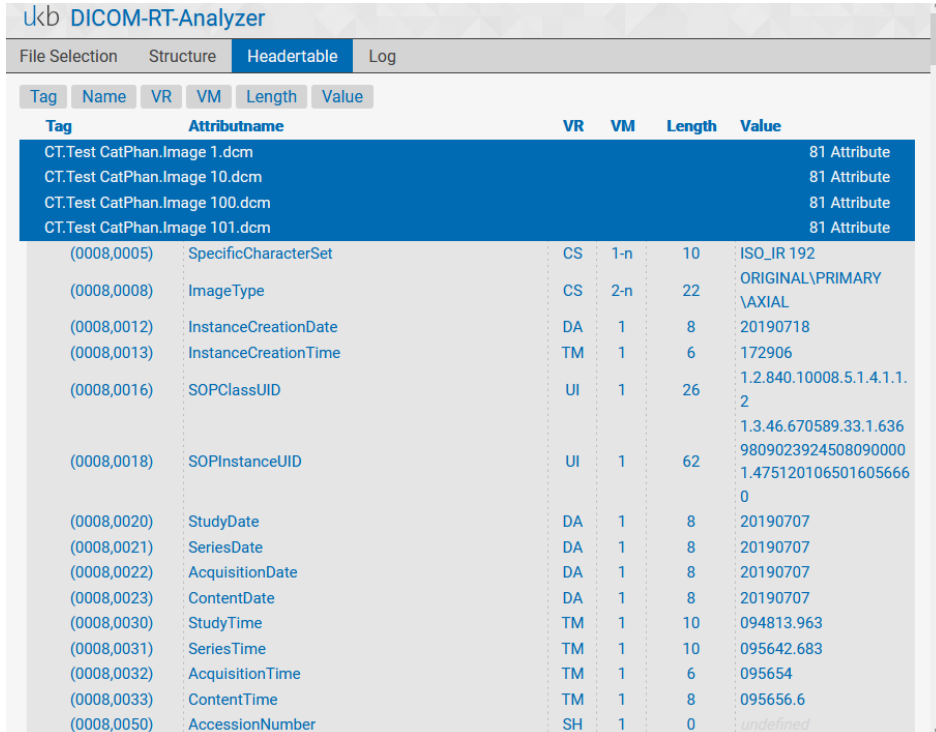


Abb. 4.3: Tab Headertable mit der tabellarischen Darstellung der geparsten Attribute.

4.3 Arbeitsweise des Skriptes (Backend)

Die Skriptversion zum Zeitpunkt des Abschlusses dieser Arbeit enthält mehr als 40 JavaScript-Funktionen, die jedoch nicht im einzelnen hier vorgestellt werden können. Um die generelle Arbeitsweise des Skriptes zu verstehen, sollen an dieser Stelle nur die wichtigsten Schritte im Ablauf des Skriptes vorgestellt werden. Der Zweck und die Arbeitsweise der einzelnen Funktionen wurden hinreichend im Quellcode dokumentiert. In Abb. 4.4 ist der Programmablaufplan grafisch dargestellt. Mit der Dateiauswahl wird das Skript gestartet und durchläuft folgende Schritte:

1. **Upload und Verifikation der Dateien** Funktion: *fileload_handleFilesSelect()*
 Die Dateien werden über Drag & Drop in das *File Selection*-Feld oder über die direkte Auswahl über den Button *Durchsuchen* eingelesen und im Cache des Browsers zwischengespeichert. Dabei wird verifiziert, dass es sich bei den Dateien auch um lesbare DICOM-Dateien handelt. Anderenfalls werden diese ignoriert und eine entsprechende Fehlermeldung im *Log*-Tab angezeigt.
2. **Parsen des Headers in den Zwischenspeicher** Funktion: *datastorage_parseFiles()*
 Für alle verifizierten Dateien wird anschließend der DICOM-Header geparkt und in das Zwischenspeicher-Objekt *global_dataStorage* geschrieben, wobei die Tags im separat erstellten Data Dictionary nachgeschlagen und die Daten gemäß den dortigen Einträgen formatiert werden. Für Data Elements, die nicht im Data Dictionary aufgeführt sind, wird eine entsprechende Warnung im Log ausgegeben (Abb. 4.2). Dies ist in der Regel für die noch nicht eingepflegten herstellerspezifischen Tags aus den jeweiligen Konformitätserklärungen der Fall (vgl. Kapitel 2.4.4). Während des Parsens werden die Einträge bereits für die Ausgabe im Tab *Headertable* sortiert.
3. **Erstellung der Headertabelle** Funktion: *headertable_createTable()*
 Für die Darstellung der Headerattribute im Tab *Headertable* (Abb. 4.3) wird anschließend der Zwischenspeicher rekursiv ausgelesen und dabei die ausklappbaren Tabellen für jede einzelne Datei erstellt. In diesen Tabellen können die einzelnen Headerattribute inklusive den verfügbaren Zusatzinformationen aus dem Data Dictionary wie der Value Representation (VR) oder der Value Multiplicity (VM) eingesehen werden. Näheres zu diesen Werten wurde bereits im Kapitel 2.4.2 thematisiert. Auch wenn dies möglich wäre, erfolgt die Erstellung der Tabellen deshalb nicht bereits während des Parsens in Schritt 2, da zum einen die Funktionen für Schritt 2 übersichtlich gehalten werden sollten und zum anderen so die Möglichkeit besteht, die Darstellungsart der Tabelle unkompliziert zu verändern, da die Daten im Zwischenspeicher-Objekt vor der Tabellengenerierung so noch beliebig gefiltert und sortiert werden können.

4. Analyse der Dateistruktur

Funktion *structure_getFileStructure()*

Für die Ausgabe in Tab *Structure* (Abb. 4.1b) wurden die verknüpften IDs der DICOM-Objekte analysiert und die Dateien in einer der DICOM-Hierarchie entsprechenden Baumstruktur dargestellt. Dafür werden in den einzelnen Ebenen folgende Tags verwendet:

- i. Patienten gruppiert nach *PatientID* (0010,0020); Anzeige: *PatientName* (0010,0010)
- ii. Studien gruppiert nach *StudyInstanceUID* (0020,000D); Anzeige: *StudyDescription* (0008,1030)
- iii. Serien gruppiert nach *SeriesInstanceUID* (0020,000E); Anzeige: *SeriesDescription* (0008,103E)
- iv. SOP-Klassen gruppiert nach *SOPClassUID* (0008,0016); Anzeige: *SOPClassName* (aus dem Data Dictionary)
- v. Die einzelnen Dateien sortiert nach *InstanceCreationDate* (0008,0012) und *InstanceCreationTime* (0008,0013); Anzeige: Dateiname

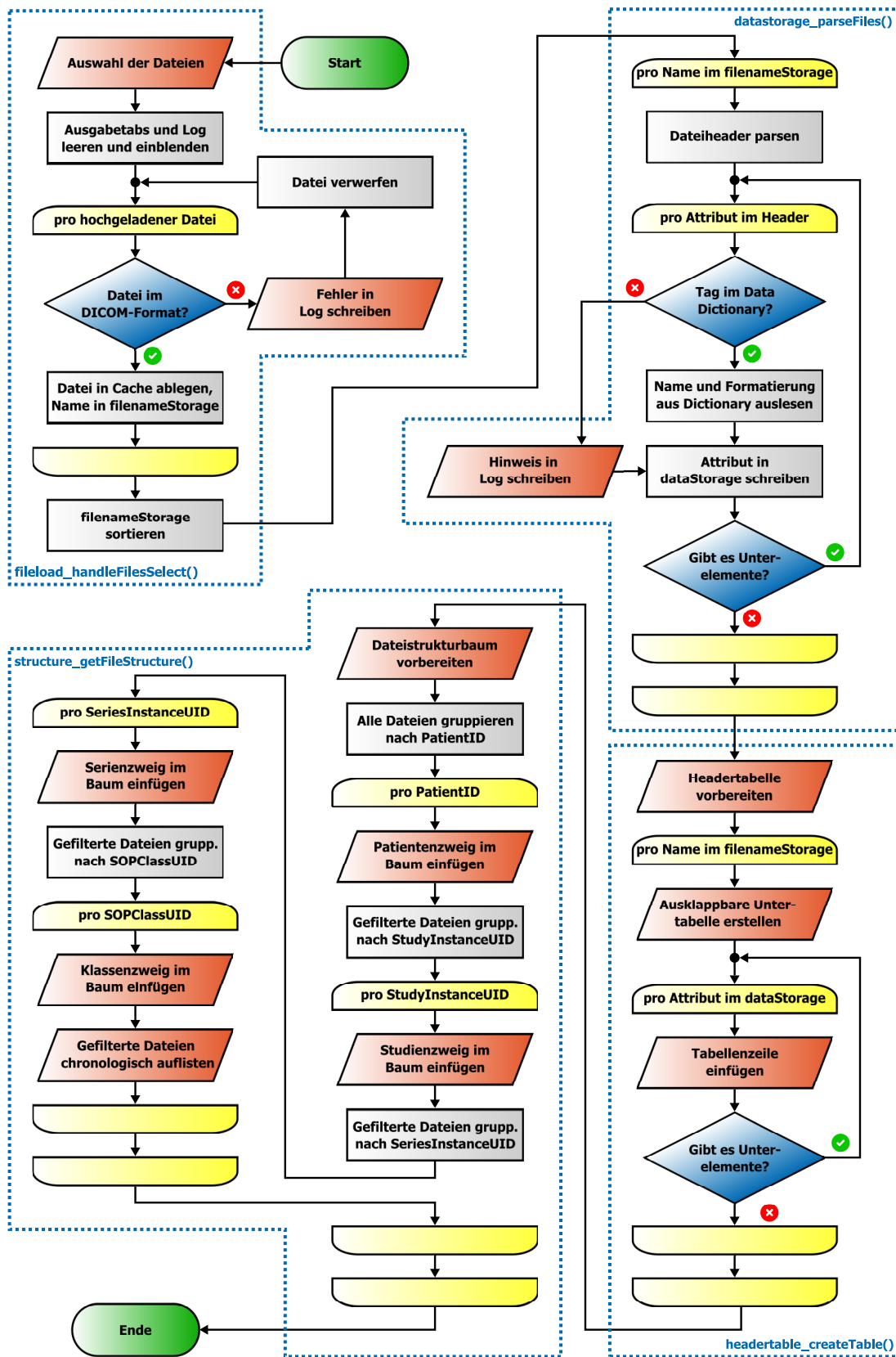


Abb. 4.4: Schematischer Programmablaufplan des Analyse-Skriptes mit Ein-/Ausgaben (rot), Abfragen (blau), Operationen (grau) und Schleifen (gelb). [eigene Darstellung]

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Zweck dieser Vorarbeit bestand darin, sich mit dem DICOM-Datenformat vertraut zu machen und ein geeignetes Medium zu finden, um entsprechende Daten aus der Strahlentherapie einlesen und nach verschiedenen Kriterien flexibel analysieren zu können. Dazu wurden Testdatensätze zunächst mit MATLAB untersucht und anschließend aus verschiedenen Optionen die Variante eines webbasierten Analysetools in JavaScript für die weitere Arbeit ausgewählt. Entsprechend wurde dann basierend auf dem **Cornerstone.js dicomParser** von Chris Hafey [53] eine erste Anwendung entwickelt. Diese besteht aus einem Grundgerüst aus HTML 5 und CSS 3 und wurde entsprechend der Anforderungen für die auf dieser Arbeit aufbauenden Masterarbeit angepasst. Es ist mit dem Analysetool nun möglich, dezentral im Browser ohne die Notwendigkeit von lokalen Softwareinstallationen, beliebige DICOM-Dateien auszuwählen und die darin enthaltenen Headerinformationen auszulesen. Dabei werden die Dateien, welche in der Regel sensible Patienteninformationen enthalten, nicht durchs Netzwerk verschickt oder auf einen externen Server geladen, sondern lediglich im Cache des lokalen Browsers zur Verarbeitung temporär zwischengespeichert.

Im Anschluss an diese Vorarbeit soll das Tool im Rahmen einer Masterarbeit derart weiterentwickelt werden, dass die gesamten Informationen zur Bestrahlungsplanung aus unbekanntem DICOM-RT-Datensätzen entsprechend der Arbeitsabläufe in der Strahlentherapie visuell und logisch dargestellt werden. Entsprechend müssen die Abhängigkeiten der verschiedenen DICOM-RT-Objekte untereinander tiefgreifender analysiert und eine geeignete Darstellungsform für die Informationen implementiert werden, um beispielsweise einen gebündelten Überblick über die applizierten Einzeldosen in den Fraktionen zu erhalten.

Abgesehen von der thematischen Ausrichtung der nachfolgenden Masterarbeit, birgt das bisherige Tool selbst auch ausreichend Potential für eine technische und funktionelle Weiterentwicklung in der Zukunft. So ist bisher keine Funktion zum automatischen Upload und Entpacken von Archiven oder Ordnern implementiert. Eine solche Funktion könnte die Nutzerfreundlichkeit ebenso erhöhen, wie die Weiterentwicklung der Benutzeroberfläche. Denkbar wäre eine Anpassung für die Nutzung auf mobilen Endgeräten, auch wenn dieser Anwendungsfall eher selten in der Praxis vorkommen dürfte.

Literaturverzeichnis

- [1] OFFIS – Institut für Informatik. [DCMSTK - DICOM Toolkit](https://dicom.offis.de/dcmstk). <https://dicom.offis.de/dcmstk>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [2] CTK - The Common Toolkit. [dcmjs by CTK](http://dcmjs.org). <http://dcmjs.org>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [3] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [Digital Imaging and Communications in Medicine \(DICOM\) Standard PS3.1 2021b, ISO 12052](https://www.dicomstandard.org/current). Rosslyn, VA, USA. Verfügbar unter <https://www.dicomstandard.org/current>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [4] [MATLAB® Version 8.5.0.197613 \(R2015a\)](https://www.mathworks.com/help/matlab/). The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, 2015.
- [5] Symonds PR, Mills JA und Duxbury A. [Walter and Miller's Textbook of Radiotherapy: Radiation Physics, Therapy and Oncology](https://www.elsevier.com/locate/9780702074851). 8. Auflage. Elsevier, 2019. ISBN: 978-0-7020-7485-1.
- [6] Wannemacher M, Wenz F und Debus J. [Strahlentherapie](https://www.springer.com/9783540883043). 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-540-88304-3.
- [7] Deutsche Krebsgesellschaft e.V. [ONKO-Internetportal](https://www.krebsgesellschaft.de). <https://www.krebsgesellschaft.de>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [8] Robert Koch-Institut und Gesellschaft der epidemiologischen Krebsregister in Deutschland e.V. [Krebs in Deutschland für 2017/2018](https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/krebs_in_deutschland_node.html). (2021). DOI: 10.25646/8353. https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/krebs_in_deutschland_node.html. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [9] Chaffer CL und Weinberg RA. [A perspective on cancer cell metastasis](https://doi.org/10.1126/science.1203543). *Science* 331.6024 (2011), S. 1559–64. DOI: 10.1126/science.1203543.
- [10] Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung. [Todesursachenspezifische Sterbeziffern in Deutschland nach Geschlecht \(1980-2018\)](https://www.bib.bund.de/Permalink.html?id=10259356). <https://www.bib.bund.de/Permalink.html?id=10259356>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [11] Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie (DEGRO) e.V. [Informationen über Strahlentherapie](http://www.degro.org/patienten/strahlentherapie). <http://www.degro.org/patienten/strahlentherapie>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [12] Richter E und Feyerabend T. [Grundlagen der Strahlentherapie](https://www.springer.com/9783540412656). 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. ISBN: 978-3-540-41265-6.
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). [Ionisierende Strahlung: Strahlenwirkungen](https://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/wirkung_node.html). https://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/wirkung_node.html. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [14] Reiser M, Kuhn FP und Debus J. [Duale Reihe Radiologie](https://www.thieme.de/9783131253248). 4. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2017. ISBN: 978-3-13-125324-8.
- [15] Schlegel W, Karger CP und Jäkel O. [Medizinische Physik: Grundlagen - Bildgebung - Therapie - Technik](https://www.springer.com/9783662548004). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2018. ISBN: 978-3-662-54800-4.
- [16] Kahl-Scholz M und Vockelmann C. [Basiswissen Radiologie: Nuklearmedizin und Strahlentherapie](https://www.springer.com/9783662542781). 1. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2017. ISBN: 978-3-662-54278-1.

- [17] Law MYY und Liu B. [DICOM-RT and Its Utilization in Radiation Therapy](#). *RadioGraphics* 29.3 (2009), S. 655–67. DOI: 10.1148/rg.293075172.
- [18] Röhner F, Schmucker M, Henne K, Momm F, Bruggmoser G, Grosu A-L, Frommhold H und Heinemann FE. [Integration der Bestrahlungsplanung in den volldigitalen Workflow](#). *Strahlenther Onkol* 189 (2012), S. 111–6. DOI: 10.1007/s00066-012-0259-0.
- [19] Bruns F und Bremer M. [Qualitätsmerkmale in der Strahlentherapie](#). *Forum 2015* 30 (), S. 500–6. DOI: 10.1007/s12312-015-1400-7.
- [20] Steil V, Röhner F, Schneider F, Wenz F, Lohr F und Weisser G. [Aktuelle Anforderungen an das Bildmanagement in der Strahlentherapie](#). *Strahlenther Onkol* 188.6 (2012), S. 499–506. DOI: 10.1007/s00066-012-0095-2.
- [21] Heinemann FE, Röhner F, Schmucker M, Bruggmoser G, Henne K, Grosu A-L und Frommhold H. [Abteilungs- und Patientenmanagement in der Strahlenheilkunde - Das Freiburger Modell](#). *Strahlenther Onkol* 185 (2009), S. 143–54. DOI: 10.1007/s00066-009-1895-x.
- [22] Strahlenschutzkommission (SSK). [Festlegung von Reaktionsschwellen und Toleranzgrenzen für die Prüfung des Gesamtsystems bei der perkutanen Strahlentherapie mit Photonen und Elektronen](#). (2018). Veröffentlicht im BAnz AT 10.08.2018 B3. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-2018082008585109229422>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [23] Deutsche Krebsgesellschaft e.V. [Das Leitlinienprogramm Onkologie](#). <https://www.krebsgesellschaft.de/deutsche-krebsgesellschaft-wtrl/deutsche-krebsgesellschaft/leitlinien/onkologische-leitlinien-im-ueberblick.html>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [24] Pianykh OS. [Digital Imaging and Communications in Medicine \(DICOM\): A Practical Introduction and Survival Guide](#). 1. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2008. ISBN: 978-3-540-74571-6.
- [25] Mildenerger P, Eichelberg M und Martin E. [Introduction to the DICOM standard](#). *Eur Radiol* 12.4 (2002), S. 920–7. DOI: 10.1007/s003300101100.
- [26] Neumann M. [DICOM - Current status and future developments for radiotherapy](#). *Z Med Phys* 12.3 (2002), S. 171–6. DOI: 10.1016/s0939-3889(15)70464-2.
- [27] DICOM Secretariat: Medical Imaging Technology Association (MITA). [DICOM](#). <https://www.dicomstandard.org>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [28] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.3 2021d: DICOM Model of the Real World](#). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part03/chapter_7.html. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [29] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.4 2021d: DICOM Information Model](#). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part04/chapter_6.html. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [30] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.10 2021d: DICOM File Meta Information](#). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part10/chapter_7.html#table_7.1-1. Letzter Abruf: 13.12.2021.

- [31] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.5 2021d: The Data Set](https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part05/chapter_7.html). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part05/chapter_7.html. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [32] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.6 2021d: Data Dictionary](https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/html/part06.html). <https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/html/part06.html>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [33] Innolitics LLC. [DICOM Standard Browser](https://dicom.innolitics.com/ciods/rt-dose/patient/00100030). <https://dicom.innolitics.com/ciods/rt-dose/patient/00100030>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [34] Clunie DA. [DICOM Structured Reporting](#). 1. Auflage. Bangor, Pennsylvania: PixelMed Publishing, 2000. ISBN: 0-9701369-0-0.
- [35] Johner C und Gerling V. „Wie funktioniert eigentlich...?“ [DICOM dynamisch](#). *Krankenhaus-IT Journal* 5/2010 (), S. 36–7. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [36] Carl Zeiss Meditec AG. [INTRABEAM® 600 DICOM™ Conformance Statement Version 4.0](#). Revision 1.0. 2016.
- [37] Philips Medical Systems Nederland BV. [DICOM Conformance Statement Pinnacle³ Radiotherapy Treatment Planning System R16.4.0](#). Document Number: ICAP-PF.0043256. 2019.
- [38] DICOM Secretariat: Medical Imaging Technology Association (MITA). [DICOM supplement overview](https://www.dicomstandard.org/supplements). <https://www.dicomstandard.org/supplements>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [39] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.3 2021d: Radiotherapy Modules](https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part03/sect_C.8.8.html). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part03/sect_C.8.8.html. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [40] Siekmann S. [Analysis of New Concepts and Definitions in DICOM Second Generation Radiotherapy Objects Based on an Experimental Implementation](#). Diplomarbeit. Deutschland: Universität Heidelberg/Hochschule Heilbronn, 2012. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:840-opus-604>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [41] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.3 2013: DICOM Information Model - Radiotherapy](https://dicom.nema.org/dicom/2013/output/chtml/part03/chapter_7.html#figure_7-2c). https://dicom.nema.org/dicom/2013/output/chtml/part03/chapter_7.html#figure_7-2c. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [42] Radiation Therapy DICOM Standards Committee Working Group 07. [Digital Imaging and Communications in Medicine \(DICOM\) Supplement 147: Second Generation Radiotherapy - Prescription and Segment Annotation](http://dicom.nema.org/Dicom/News/March2016/docs/sups/sup147.pdf). <http://dicom.nema.org/Dicom/News/March2016/docs/sups/sup147.pdf>. 2016. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [43] Holst D. [DICOM Second Generation RT - An Analysis of New Radiation Concepts by way of First-Second Generation Conversion](#). Diplomarbeit. Schweden: Universität Uppsala, 2019. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:se:uu:diva-381978>. Letzter Abruf: 13.12.2021.

- [44] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.3 2021d: Extension of The DICOM Model of The Real-world for Radiotherapy Second Generation Information Objects](https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part03/sect_7.14.html#figure_7.14-1). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part03/sect_7.14.html#figure_7.14-1. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [45] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.3 2021d: RT Second Generation Entity-Relationship Model](https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part03/sect_A.86.html#figure_A.86.1.1.1-1). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/chtml/part03/sect_A.86.html#figure_A.86.1.1.1-1. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [46] Chocolatey Software Inc. [Chocolatey](https://chocolatey.org). <https://chocolatey.org>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [47] The Mathworks Inc. [DICOM Support in Image Processing Toolbox](https://www.mathworks.com/help/images/dicom-support-in-the-image-processing-toolbox.html). <https://www.mathworks.com/help/images/dicom-support-in-the-image-processing-toolbox.html>. MATLAB Help Center. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [48] The PHP Group. [Was ist PHP?](https://www.php.net/manual/de/intro-what-is.php) <https://www.php.net/manual/de/intro-what-is.php>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [49] Witten D und Nogueer X. [File_DICOM](https://pear.php.net/package/File_DICOM). https://pear.php.net/package/File_DICOM. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [50] Documet J. [NanoDICOM](https://nanodicom.org/). <https://nanodicom.org/>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [51] The PHP Group. [PHP 8 ChangeLog](https://www.php.net/ChangeLog-8.php). <https://www.php.net/ChangeLog-8.php>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [52] Mozilla. [MDN Web Docs: JavaScript](https://developer.mozilla.org/de/docs/Web/JavaScript). <https://developer.mozilla.org/de/docs/Web/JavaScript>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [53] Hafey C. [Cornerstone.js dicomParser: JavaScript parser for DICOM Part 10 data](https://github.com/cornerstonejs/dicomParser). <https://github.com/cornerstonejs/dicomParser>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [54] Hafey C. [DICOM Dump with Data Dictionary v1.8.5](https://rawgit.com/cornerstonejs/dicomParser/master/examples/dumpWithDataDictionary/index.html). <https://rawgit.com/cornerstonejs/dicomParser/master/examples/dumpWithDataDictionary/index.html>. Letzter Abruf: 13.12.2021.
- [55] National Electrical Manufacturers Association (NEMA). [DICOM Standard PS3.3 2021d: RT Image IOD Modules](https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/html/part03.html#sect_A.17.3). https://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/html/part03.html#sect_A.17.3. Letzter Abruf: 13.12.2021.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prozentualer Anteil der häufigsten Tumorlokalisationen an allen Krebsneuerkrankungen in Deutschland im Jahr 2018 ohne nicht-melanotischen Hautkrebs. [übernommen aus 8, Abb. 3.0.1]	2
2.2	Schematische Darstellung der Zellüberlebenskurven bei einmaliger und fraktionierter Bestrahlung. Bei Einzeitbestrahlung (orange) wird gesundes und Tumorgewebe gleichermaßen zerstört, während bei fraktionierter Bestrahlung das gesunde Gewebe (grün) sich gegenüber dem Tumorgewebe (blau) schneller regenerieren kann. Es können aber nicht alle subletalen Strahlenschäden vom gesunden Gewebe repariert werden. [nach 14, Abb. A-2.6]	4
2.3	Workflow in der Strahlentherapie von der Diagnose bis zur Nachsorge als Qualitätskette mit ineinandergreifenden Teilprozessen. [eigene Darstellung basierend auf 15, Abb. 19.1 u. 22, Abb. 1 bzw. 19, Abb. 1]	6
2.4	Das Analogon des realen Patienten ist das DICOM Objekt <i>Patient</i> , welches durch seine einzelnen Attribute wie Alter oder Geschlecht näher definiert wird, entsprechend der zugehörigen IOD. [nach 24, Fig. 2]	7
2.5	Grundlegende Hierarchie der <i>DICOM Information Objects</i> . Jede Ebene kann mehrere Unterebenen haben. Die Zuordnung erfolgt über eindeutige IDs der Objekte. [nach 24, Fig. 15]	8
2.6	DICOM-Dateien bestehen aus einer Vielzahl von Attributen in binärem Format, welche sich wiederum aus 4 Blöcken zusammensetzen: Dem 16-bit Data Element Tag, dem optionalen Datentyp (VR), der Länge der Werte und die Attributwerte selbst. [nach 31, Figure 7.1-1 u. 24, Fig. 72]	9
2.7	Der Weg vom realen Patienten zum DICOM Patientenobjekt. Der Patient wird durch Attribute (Data Elements) aus dem Data Dictionary charakterisiert. Diese werden in Modulgruppen zusammengefasst, welche wiederum strukturelle Entitäten (IEs) bilden. Die Kombination der notwendigen IEs bildet dann die DICOM Information Object Definition (IOD) des Patienten. [nach 24, Fig. 18]	11
2.8	Sequenzdiagramm der Kommunikation zwischen den DICOM-AEs <i>CT-Scanner</i> und <i>PACS-Server</i> beim Export eines neu generierten CT-Bildes. [eigene Darstellung basierend auf 36, Figure 4-4 u. 37, Figure 4]	13
2.9	Information Modell der DICOM-RT Objekte aus der DICOM-RT Erweiterung der ersten Generation (bis 2013). Die Pfeile stellen die Referenzierungen der Objekte untereinander dar. [nach 17, Figure 4 u. 41, Figure 7-2c]	16
2.10	Die Objekte aus der DICOM-RT Erweiterung der zweiten Generation. [nach 45, Figure A.86.1.1.1-1]	17
3.1	Exemplarische Aufnahmen aus dem Datensatz, rekonstruiert als Graustufenbilder mit MATLAB.	19
4.1	Die minimalistische Benutzeroberfläche des entwickelten Analysetools.	23
4.2	Tab <i>Log</i> mit der Ausgabe von Warnungsmeldungen	24
4.3	Tab <i>Headertable</i> mit der tabellarischen Darstellung der geparsten Attribute.	24

4.4	Schematischer Programmablaufplan des Analyse-Skriptes mit Ein-/Ausgaben (rot), Abfragen (blau), Operationen (grau) und Schleifen (gelb). [eigene Darstellung]	27
A.1	Teil 1 der Auflistung von vorkommenden DICOM Header Attributen in den Daten des Testdatensatzes mit dem jeweiligen Datei-Präfix (s. Kapitel 3), sortiert nach den nicht aufgeführten Attribut-Tags. Bei Attributen, die in allen Dateien vorkamen, wurde die gesamte Zeile grün markiert.	XI
A.2	Teil 2 der Auflistung von vorkommenden DICOM Header Attributen in den Daten des Testdatensatzes mit dem jeweiligen Datei-Präfix (s. Kapitel 3), sortiert nach den nicht aufgeführten Attribut-Tags.	XII

Tabellenverzeichnis

1	Informationen im Data Dictionary am Beispiel des Attributs PatientBirthDate. [33]	9
2	Zuordnung der Datei-Präfixe zu den Datenstrukturklassen anhand der SOP Class UID	20
A.1	Ausschnitt aus der Modultabelle der RT Image IOD mit ausgewählten Beispi- elattributen [55].	X

A Anhang

A.1 Modultabelle RT Image IOD (Ausschnitt)

IE	Modul	Beispielhafte Modulattribute
Patient	Patient	Patient's Name (0010,0010) Patient's Birth Date (0010,0030)
	Clinical Trial Subject	Clinical Trial Sponsor Name (0012,0010) Clinical Trial Site Name (0012,0031)
Study	General Study	Study Date (0008,0020) Referring Physician's Name (0008,0090)
	Patient Study	Allergies (0010,2110) Pregnancy Status (0010,21C0)
	Clinical Trial Study	Clinical Trial Time Point Description (0012,0051) Consent for Clinical Trial Use Sequence (0012,0083)
Series	RT Series	Modality (0008,0060) Series Instance UID (0020,000E)
	Clinical Trial Series	Clinical Trial Coordinating Center Name (0012,0060) Clinical Trial Series Description (0012,0072)
Equipment	General Equipment	Manufacturer (0008,0070) Device Serial Number (0018,1000)
Image	General Image	Patient Orientation (0020,0020) Content Date (0008,0023)
	Image Pixel	Pixel Data (7FE0,0010) Pixel Padding Range Limit (0028,0121)
	Contrast/Bolus	Additional Drug Sequence (0018,002A) Contrast Flow Rate (0018,1046)
	RT Image	Samples per Pixel (0028,0002) Radiation Machine Name (3002,0020)

Tab. A.1: Ausschnitt aus der Modultabelle der RT Image IOD mit ausgewählten Beispielattributen [55].

A.2 Attribute nach Vorkommnis in den Testdatensatz-Dateien

Attribut Name	CT	RE	RI	RP	RS
Filename	Green	Green	Green	Green	Green
FileModDate	Green	Green	Green	Green	Green
FileSize	Green	Green	Green	Green	Green
Format	Green	Green	Green	Green	Green
FormatVersion	Green	Green	Green	Green	Green
Width	Green	Green	Green	Green	Green
Height	Green	Green	Green	Green	Green
BitDepth	Green	Green	Green	Green	Green
ColorType	Green	Green	Green	Green	Green
FileMetaInformationGroupLength	Green	Green	Green	Green	Green
FileMetaInformationVersion	Green	Green	Green	Green	Green
MediaStorageSOPClassUID	Green	Green	Green	Green	Green
MediaStorageSOPInstanceUID	Green	Green	Green	Green	Green
TransferSyntaxUID	Green	Green	Green	Green	Green
ImplementationClassUID	Green	Green	Green	Green	Green
ImplementationVersionName	Green	Green	Green	Green	Green
SpecificCharacterSet	Green	Green	Green	Green	Green
ImageType	Green	Red	Green	Red	Red
InstanceCreationDate	Green	Green	Green	Green	Green
InstanceCreationTime	Green	Green	Green	Green	Green
SOPClassUID	Green	Green	Green	Green	Green
SOPInstanceUID	Green	Green	Green	Green	Green
StudyDate	Green	Green	Green	Green	Green
SeriesDate	Green	Green	Red	Red	Red
AcquisitionDate	Green	Red	Green	Red	Red
ContentDate	Green	Green	Green	Red	Red
StudyTime	Green	Green	Green	Green	Green
SeriesTime	Green	Green	Red	Red	Red
AcquisitionTime	Green	Red	Green	Red	Red
ContentTime	Green	Green	Green	Red	Red
AccessionNumber	Green	Green	Green	Green	Green
Modality	Green	Green	Green	Green	Green
ConversionType	Red	Red	Green	Red	Red
Manufacturer	Green	Green	Green	Green	Green
InstitutionName	Green	Red	Red	Red	Red
ReferringPhysicianName	Green	Green	Green	Green	Green
StationName	Green	Green	Green	Green	Green
StudyDescription	Green	Green	Green	Green	Green
SeriesDescription	Green	Green	Green	Green	Green
InstitutionalDepartmentName	Green	Red	Red	Red	Red
OperatorName	Green	Red	Green	Green	Red
ManufacturerModelName	Green	Green	Green	Green	Green
IrradiationEventUID	Green	Red	Red	Red	Red
ReferencedSeriesSequence	Green	Red	Green	Red	Red
PatientName	Green	Green	Green	Green	Green
PatientID	Green	Green	Green	Green	Green
PatientBirthDate	Green	Green	Green	Green	Green
PatientBirthTime	Green	Green	Green	Green	Green
PatientSex	Green	Green	Green	Green	Green
BodyPartExamined	Green	Red	Red	Red	Red
ScanOptions	Green	Red	Red	Red	Red
SliceThickness	Green	Red	Red	Red	Red
KVP	Green	Red	Red	Red	Red
DataCollectionDiameter	Green	Red	Red	Red	Red
DeviceSerialNumber	Green	Green	Green	Green	Green
SoftwareVersion	Green	Green	Green	Green	Green
ReconstructionDiameter	Green	Red	Red	Red	Red
DistanceSourceToDetector	Green	Red	Red	Red	Red
DistanceSourceToPatient	Green	Red	Red	Red	Red
GantryDetectorTilt	Green	Red	Red	Red	Red
TableHeight	Green	Red	Red	Red	Red
ExposureTime	Green	Red	Red	Red	Red
XrayTubeCurrent	Green	Red	Red	Red	Red
Exposure	Green	Red	Red	Red	Red
FilterType	Green	Red	Red	Red	Red
ConvolutionKernel	Green	Red	Red	Red	Red
PatientPosition	Green	Green	Green	Green	Green
StudyInstanceUID	Green	Green	Green	Green	Green
SeriesInstanceUID	Green	Green	Green	Green	Green
StudyID	Green	Green	Green	Green	Green
SeriesNumber	Green	Green	Green	Green	Green
AcquisitionNumber	Green	Red	Red	Red	Red

Abb. A.1: Teil 1 der Auflistung von vorkommenden DICOM Header Attributen in den Daten des Testdatensatzes mit dem jeweiligen Datei-Präfix (s. Kapitel 3), sortiert nach den nicht aufgeführten Attribut-Tags. Bei Attributen, die in allen Dateien vorkamen, wurde die gesamte Zeile grün markiert.

Attribut Name	CT	RE	RI	RP	RS
InstanceNumber	Green	Red	Green	Red	Red
PatientOrientation	Red	Red	Green	Red	Red
ImagePositionPatient	Green	Red	Red	Red	Red
ImageOrientationPatient	Green	Red	Red	Red	Red
FrameOfReferenceUID	Green	Green	Green	Green	Red
PositionReferenceIndicator	Green	Red	Red	Red	Red
SliceLocation	Green	Red	Red	Red	Red
ImageComments	Green	Red	Red	Red	Red
SamplesPerPixel	Green	Red	Green	Red	Red
PhotometricInterpretation	Green	Red	Green	Red	Red
Rows	Green	Red	Red	Red	Red
Columns	Green	Red	Red	Red	Red
PixelSpacing	Green	Red	Red	Red	Red
BitsAllocated	Green	Red	Green	Red	Red
BitsStored	Green	Red	Green	Red	Red
HighBit	Green	Red	Red	Red	Red
PixelRepresentation	Green	Red	Red	Red	Red
WindowCenter	Green	Red	Red	Red	Red
WindowWidth	Green	Red	Red	Red	Red
RescaleIntercept	Green	Red	Red	Red	Red
RescaleSlope	Green	Red	Red	Red	Red
RescaleType	Red	Red	Green	Red	Red
RTImageLabel	Red	Red	Green	Red	Red
RTImageDescription	Red	Red	Green	Red	Red
ReportedValuesOrigin	Red	Red	Green	Red	Red
RTImagePlane	Red	Red	Green	Red	Red
XRayImageReceptorTranslation	Red	Red	Green	Red	Red
XRayImageReceptorAngle	Red	Red	Green	Red	Red
RTImageOrientation	Red	Red	Green	Red	Red
ImagePlanePixelSpacing	Red	Red	Green	Red	Red
RTImagePosition	Red	Red	Green	Red	Red
RadiationMachineName	Red	Red	Green	Red	Red
RadiationMachineSAD	Red	Red	Green	Red	Red
RTImageSID	Red	Red	Green	Red	Red
ExposureSequence	Red	Red	Green	Red	Red
PrimaryDosimeterUnit	Red	Red	Green	Red	Red
GantryAngle	Red	Red	Green	Red	Red

Attribut Name	CT	RE	RI	RP	RS
BeamLimitingDeviceAngle	Red	Red	Green	Red	Red
PatientSupportAngle	Red	Red	Green	Red	Red
IsocenterPosition	Red	Red	Green	Red	Red
ReferencedRTPlanSequence	Red	Red	Green	Red	Red
ReferencedBeamNumber	Red	Red	Green	Red	Red
Private_3273_10xx_Creator	Red	Red	Green	Red	Red
Private_3273_1000	Red	Red	Green	Red	Red
Private_3273_1001	Red	Red	Green	Red	Red
ContentLabel	Red	Green	Red	Red	Red
ContentDescription	Red	Green	Red	Red	Red
ContentCreatorsName	Red	Green	Red	Red	Red
RegistrationSequence	Red	Red	Green	Red	Red
RTPlanLabel	Red	Red	Green	Red	Red
RTPlanDate	Red	Red	Green	Red	Red
RTPlanTime	Red	Red	Green	Red	Red
PlanIntent	Red	Red	Green	Red	Red
RTPlanGeometry	Red	Red	Green	Red	Red
DoseReferenceSequence	Red	Red	Green	Red	Red
ToleranceTableSequence	Red	Red	Green	Red	Red
FractionGroupSequence	Red	Red	Green	Red	Red
BeamSequence	Red	Red	Green	Red	Red
PatientSetupSequence	Red	Red	Green	Red	Red
ReferencedStructureSetSequence	Red	Red	Green	Red	Red
StructureSetLabel	Red	Red	Green	Red	Red
StructureSetDate	Red	Red	Green	Red	Red
StructureSetTime	Red	Red	Green	Red	Red
ReferencedFrameOfReferenceSequence	Red	Red	Green	Red	Red
StructureSetROISequence	Red	Red	Green	Red	Red
ROIContourSequence	Red	Red	Green	Red	Red
RTROIObservationsSequence	Red	Red	Green	Red	Red
ApprovalStatus	Red	Red	Green	Red	Red
ReviewDate	Red	Red	Green	Red	Red
ReviewTime	Red	Red	Green	Red	Red
ReviewerName	Red	Red	Green	Red	Red
Private_3253_10xx_Creator	Red	Red	Green	Red	Red
Private_3253_1000	Red	Red	Green	Red	Red
Private_3253_1001	Red	Red	Green	Red	Red
Private_3253_1002	Red	Red	Green	Red	Red

Abb. A.2: Teil 2 der Auflistung von vorkommenden DICOM Header Attributen in den Daten des Testdatensatzes mit dem jeweiligen Datei-Präfix (s. Kapitel 3), sortiert nach den nicht aufgeführten Attribut-Tags.