



**Technische Universität Kaiserslautern**

**Fernstudium Medizinische Physik**

**Masterarbeit**

**Entwicklung einer ereignisdiskreten Simulation  
zur Analyse und Bewertung von Prozessen in einer  
Strahlentherapie-Einrichtung**

**von**

**Elisabeth Hedwig Maria Jambor**

**Betreuer:**

**Herr Ralf Müller-Polyzou**

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

-----

-----

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Relevanz und Motivation	1
1.2 Forschungsziele und Forschungsfragen	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Krebs und Strahlentherapie	3
2.1.1 Die perkutane Strahlentherapie am Linearbeschleuniger	3
2.1.2 Prozesse der perkutanen Strahlentherapie	4
2.1.3 Strahlentherapie und Corona	6
2.2 Methodische Grundlagen	7
2.2.1 Systematische Literaturrecherche	7
2.2.2 Ereignisdiskrete Simulation	8
2.2.2.1 Simulationsstudie	9
<b>3 Strukturierte Literaturrecherche</b>	<b>12</b>
3.1 Planung und Verfahren	12
3.2 Durchführung der Suche	13
3.3 Strukturierte Inhaltsanalyse	14
3.3.1 Vorstellung der Publikationen	14
3.3.2 Synthese	19
3.3.2.1 Übergreifende Codegruppen	19
3.3.2.2 Modellierungs-Codegruppen	21
3.3.2.3 Was-wäre-wenn Szenarien	27
3.3.2.4 Datenquellen	29
<b>4 Ereignisdiskrete Simulation einer Strahlentherapieeinrichtung</b>	<b>30</b>
4.1 Problembestimmung und Zielsetzung	30
4.2 Modellanforderungen	30
4.3 Datenerhebung und -auswertung	31
4.4 Konzeptualisierung und Modellumsetzung	32
4.5 Verifikation und Validierung	38
4.5.1 Sensitivitätsanalyse	39

---

4.5.1.1	Änderung der Ressourcen	39
4.6	Bestimmung der Anzahl an Simulationsläufen	42
4.7	Experimentläufe	44
4.7.1	Abhängigkeit von der Inzidenz	46
4.7.2	Vergleich der Szenarien	49
4.7.2.1	Keine Ausfälle – Szenario 0 und 13	49
4.7.2.2	Ausfall eines Onkologen – Szenario 1 und 14	49
4.7.2.3	Ausfall von RTT – Szenario 2, 3, 15 und 16	50
4.7.2.4	Ausfall eines Administrators – Szenario 4 und 17	51
4.7.2.5	Gleichzeitiger Ausfall von Onkologe, RTT und Administrator – Szenario 6 und 18	51
4.7.2.6	Ausfall eines Linearbeschleunigers – Szenario 5 und 19	52
4.7.3	Diskussion	53
4.7.4	Limitationen	55
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>56</b>
	<b>Anhang</b>	<b>57</b>
A.1	Protokoll der strukturierten Literaturrecherche	57
A.2	Systematischen Literaturrecherche: Suchterme in den Datenbanken	59
A.3	Kodes und Codegruppen	60
A.4	Tabellen zur strukturierten Inhaltsanalyse	68
A.5	Was-Wäre-Wenn Szenarien	70
A.6	Datensammlung Simulationsmodell	75
A.6.1	Anschreiben	75
A.6.2	Fragebogen	76
A.7	Grundriss einer Strahlentherapieeinrichtung	78
A.8	Grafische Oberfläche in AnyLogic	79
A.9	Bestimmung der Anzahl der Simulationsläufe	84
A.10	Datentabellen der Auswertung	85
A.10.1	Wartezeiten der Patienten	85
A.10.2	Anzahl behandelter Patienten	86
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>88</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Relevanz und Motivation

Fast jeder zweite Mensch in Deutschland erkrankt im Laufe seines Lebens an Krebs – so lautet eine Aussage des Robert Koch Instituts [1]. Die Heilungschancen werden bei einer Krebserkrankung stark durch den Zeitpunkt der Diagnose und Behandlung beeinflusst. Generell gilt, je früher desto besser [2]. Somit ist es essenziell, dass Krebspatienten so früh wie möglich ihre Behandlung antreten. Ebenso muss eine Unterbrechung der Therapie aus nicht-medizinischen Gründen verhindert werden, um eine beschleunigte Repopulation der Tumorzellen zu unterbinden [3].

Eine der wichtigsten Formen der Krebsbehandlung ist die Strahlentherapie, die in etwa 50 % der Fälle sowohl zur kurativen als auch zur palliativen Behandlung angewendet wird [4]. Innerhalb der Strahlentherapie ist der effiziente Ablauf der Prozesse von großer Bedeutung für die Sicherheit und Effektivität der medizinischen Behandlung bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeit [5]. Für ein bestmögliches Ergebnis müssen die Kernprozesse der Patientenaufnahme, Bildgebung, Bestrahlungsdurchführung sowie die Abschlussuntersuchung und Nachsorge aufeinander abgestimmt sein [6]. Mögliche Änderungen in den synchronisierten Abläufen müssen wohlüberlegt und gut geplant werden.

Die COVID-19 Pandemie hat Strahlentherapieeinrichtungen weltweit zu Änderungen im Betriebsablauf gezwungen, um Schutzmaßnahmen für Patienten und Personal zu ergreifen [7, 8]. Aufgrund des plötzlichen Auftretens war eine sorgfältige Planung der Veränderungen oft nicht möglich. In Hinblick auf potentielle zukünftige Entwicklungen ist es notwendig, die ergriffenen Maßnahmen zu bewerten und auf Optimierungsmöglichkeiten hin zu untersuchen, um Strahlentherapie auch in Pandemiezeiten sicherstellen zu können. Neue Ideen und Vorgaben sollten vor der Implementierung eingehend untersucht werden. Hierzu können realitätsnahe Simulationsmodelle dienen.

Simulationsmodelle sind potente Werkzeuge, mit denen komplexe Abläufe dargestellt, analysiert und mögliche Anpassungen bewertet werden können. Dies macht ein aufwendiges und möglicherweise riskantes Ausprobieren in der Praxis obsolet [9] und die möglichen Folgen einer Prozessänderung können bereits im Vorhinein abgeschätzt werden.

## 1.2 Forschungsziele und Forschungsfragen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein ereignisdiskretes Simulationsmodell einer Strahlentherapieeinrichtung zur Untersuchung und Bewertung von Prozessen einer privaten Strahlentherapiepraxis mit und ohne Corona-Maßnahmen entwickelt.

Hierzu galt es zuerst die Frage zu beantworten, welche Aspekte der Strahlentherapieprozesse bereits wissenschaftlich mit Methoden der ereignisdiskreten Simulation untersucht wurden. In einer umfassenden strukturierten Literaturrecherche wurden nach festgelegten Kriterien transparent aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen identifiziert, kategorisiert und inhaltlich analysiert. Anhand der Ergebnisse wurde die Forschungsfrage dieser Arbeit konkretisiert und Designanforderungen für das Simulationsmodell entwickelt.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Auswirkungen ausgewählter Aspekte der COVID-19 Pandemie auf den Betriebsablauf einer privaten Strahlentherapiepraxis. Insbesondere sollen pandemiebedingte Personalausfälle sowie der Einfluss von Patientenscreening auf Corona-Symptome am Praxiseingang und Schutzmaßnahmen bei der Behandlung von an COVID-19 erkrankten Patienten auf die Praxisabläufe quantifiziert werden.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel. In Kapitel 1 wurden Motivation und Forschungsziele erläutert. Kapitel 2 beschreibt die theoretischen Grundlagen und die in dieser Arbeit angewendeten Methoden. Die Rolle der Strahlentherapie in der Krebsbehandlung und die Einflüsse der Coronapandemie auf deren Durchführung werden dargestellt. Die Methodik der strukturierten Literaturrecherche wird beschrieben und die Grundlagen der ereignisdiskreten Simulation werden erläutert. Die Durchführung der systematischen Literaturrecherche wird in Kapitel 3 vorgestellt. Hierbei werden die Planung und Ausführung beschrieben, die identifizierte Literatur vorgestellt und die synthetisierten Ergebnisse präsentiert. Kapitel 4 schildert die Implementierung der Simulationsstudie. Die Konzeptualisierung und Datenerhebung werden erläutert und die Umsetzung des Computermodells wird umfassend beschrieben. Ebenso wird die Validierung und die Bestimmung der Laufzeiten des Modells diskutiert. Im Anschluss werden die durchgeführten Simulationsexperimente erläutert und analysiert. Das Kapitel endet mit einer Diskussion der Ergebnisse und Limitationen. Kapitel 5 bietet eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf zukünftige Forschungsmöglichkeiten.

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

## 2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die Hintergründe und Methodik der Arbeit. Zunächst wird ein Überblick über die Volkskrankheit Krebs und deren Behandlung mit Methoden der perkutanen Strahlentherapie gegeben. Komplikationen durch die COVID-19 Pandemie werden erläutert. Im Anschluss werden die Methoden der strukturierten Literaturrecherche und der ereignisdiskreten Simulation beleuchtet. Ein Einblick in die Durchführung von Simulationsstudien schließt das Kapitel ab.

### 2.1 Krebs und Strahlentherapie

Krebs ist eine lebensbedrohliche Krankheit mit immensen physischen, psychischen und finanziellen Auswirkungen für Betroffene und Angehörige sowie für die Gesellschaft und die Gesundheitssysteme. Krebs ist ein Oberbegriff für eine Vielzahl maligner Erkrankungen. Er entsteht durch Schäden am Erbgut oder Fehler beim Ablesen der Erbinformation wodurch sich einige Körperzellen unkontrolliert vermehren und oft zerstörend in andere Körperbereiche hineinwachsen [10]. Im Jahre 2018 berichtete die Weltgesundheitsorganisation (WHO) weltweit rund 18 Millionen neue Krebsfälle und 9,6 Millionen Todesfälle. Damit ist Krebs die zweithäufigste Todesursache weltweit. Die WHO prognostiziert eine Verdopplung der Neuerkrankungen bis 2040 [11].

Neben der Vorbeugung ist insbesondere die effektive Behandlung vorliegender Krebserkrankungen wichtig. In der Tumorthherapie ist die Strahlentherapie neben der Chirurgie und Chemotherapie eine der bedeutendsten Behandlungsformen [12]. Je nach Krankheitsbild werden die Behandlungsformen auch in Kombination eingesetzt. Bei etwa 50 Prozent der Krebspatienten ist Strahlentherapie indiziert, jedoch ist der Zugang zur Strahlentherapie nicht in jedem Land einfach. Eine der Hauptursachen hierfür ist die mangelnde Verfügbarkeit an qualifiziertem Personal und Geräten [13]. Eine weitere Herausforderung ist der zeitnahe Beginn der Strahlentherapie. Das Risiko einer Verschlechterung des Krankheitszustandes und damit einhergehend eines schlechteren Behandlungsverlaufs sowie das Auftreten eines Lokalrezidivs steigen mit zunehmender Wartezeit auf den Bestrahlungstermin. Dies kann zu einer geringeren Überlebenschance führen. [14]. Daher ist es wichtig, die Strahlentherapieprozesse zu optimieren und die vorhandenen Ressourcen bestmöglich zu nutzen, um möglichst vielen Patienten einen schnellen Zugang zur Strahlentherapie zu ermöglichen.

#### 2.1.1 Die perkutane Strahlentherapie am Linearbeschleuniger

In der Strahlentherapie unterscheidet man zwischen der perkutanen Strahlentherapie, bei der die Bestrahlung von außerhalb des Körpers erfolgt und der Brachytherapie, bei der radioaktive Elemente in den Körper eingebracht werden. Die perku-



tane Strahlentherapie (im Folgenden Strahlentherapie) wird überwiegend mit Elektronen und Photonen durchgeführt. In Industrieländern findet sie nahezu ausschließlich an Linearbeschleunigern statt [5].

In medizinischen Linearbeschleunigern werden Elektronen in elektromagnetischen Feldern auf Energien von mehreren MeV beschleunigt. Der Elektronenstrahl wird im Beschleunigerkopf aufgefächert, geformt und zur Behandlung eingesetzt. Zur Bestrahlung mit Photonen werden die Elektronen im Beschleunigerkopf auf ein Target geleitet und so in ultraharte Bremsstrahlung umgewandelt, die über Ausgleichskörper und Kollimatoren geformt auf den Patienten geleitet wird [15]. Durch moderne Technik ist es möglich, die Strahlung hochpräzise zu applizieren. Das Ziel ist, den Tumor höchstmöglich zu bestrahlen und dabei das umliegende Gewebe zu schonen.

Wird eine Zelle bestrahlt, so werden durch die Strahlung die DNA und andere Biomoleküle geschädigt. Dies geschieht überwiegend durch die Ionisierung von Wassermolekülen zu freien Radikalen, die dann ihrerseits mit Molekülen in der Umgebung wie beispielsweise die der DNA reagieren. Sind die entstandenen Schäden zu gravierend, so stirbt die Zelle ab. Jedoch besitzt jede Zelle Reparaturmechanismen, die subletale Schäden reparieren können, vorausgesetzt, dass ihnen genügend Zeit gegeben wird und die Schäden nicht zu umfangreich sind. In Krebszellen funktionieren diese Reparaturmechanismen oft nur eingeschränkt. Krebszellen sind daher meist strahlensensibler als gesundes Gewebe.

Da die Strahlung von außen in den Körper eindringt, kann bei der Strahlentherapie auch bei höchster Präzision nicht verhindert werden, dass auch gesundes Gewebe bestrahlt wird. Daher wird die perkutane Strahlentherapie meist in mehreren Fraktionen durchgeführt, die üblicherweise über mehrere Wochen hinweg durchgeführt wird. Dies gibt dem gesunden Gewebe die Möglichkeit, in den Strahlenpausen die entstandenen Strahlenschäden zu reparieren, was den Krebszellen in der gleichen Zeit nicht im gleichen Maße gelingt. Dies führt im Verlauf der Behandlung zu einer wesentlich größeren Schädigung der Tumorzellen als des gesunden Gewebes.

## 2.1.2 Prozesse der perkutanen Strahlentherapie

Bei der perkutanen Strahlentherapie wird der Patient mittels eines Linearbeschleunigers (LINAC) von außen mit Elektronen- oder Photonenstrahlen bestrahlt [16].

Therapiefehler durch Über-, Unter- oder andere Fehldosierungen können dramatische Folgen bis hin zum Tod haben. Daher muss eine Radiotherapie sorgfältig geplant und durchgeführt werden. Dies darf nur durch qualifiziertes Personal erfolgen [17, 18]. Dies sind insbesondere der Facharzt für Strahlentherapie, der medizinisch-technische Radiologie-Assistent (MTRA) und der Medizinphysiker.

Der Facharzt für Strahlentherapie ist ein Arzt mit einer fünfjährigen Weiterbildung zum Strahlentherapeuten und einer Fachkunde im Strahlenschutz. Er hat neben bedeutendem Wissen auf dem Gebiet der Onkologie auch ein tiefgreifendes Verständ-

nis der medizinischen Strahlenphysik und Strahlenbiologie. Aufgrund der Interdisziplinarität des Berufs, ist neben Erfahrung in der Durchführung von Bestrahlungsplanung und Bestrahlung auch ein Verständnis anderer Tumortherapieformen vonnöten [19]. Zu seinen Aufgaben gehören Untersuchung und Aufklärung des Patienten, Stellen der rechtfertigenden Indikation, sowie Bestrahlungsplanung und Behandlung [20].

Medizinisch-technische Radiologie-Assistenten (MTRA) besitzen aufgrund ihrer Ausbildung die Fachkunde im Strahlenschutz und dürfen daher Strahlung am Menschen ohne Aufsicht durch einen Arzt anwenden sofern die rechtfertigende Indikation durch einen fachkundigen Arzt vorliegt [21]. Im Rahmen der Strahlentherapie bedeutet dies, dass sie CT Aufnahmen anfertigen und die Bestrahlung eines Patienten nach Bestrahlungsplan selbständig durchführen dürfen.

Medizinphysiker, Physiker oder gleichwertig Qualifizierte können sich zum Medizinphysikexperten (MPE) weiterbilden. Die Voraussetzung für diese eigenverantwortliche Tätigkeit ist das Erlangen der Fachkunde, die eine zweijährige Sachkundezeit sowie Strahlenschutzkurse aus dem jeweiligen Anwendungsgebiet beinhaltet [22]. Medizinphysikexperten sind nach Strahlenschutzverordnung bei Behandlungen mit ionisierender Strahlung mit individuellem Bestrahlungsplan, bei Erstellung des Plans und Durchführung der Bestrahlung hinzuzuziehen [23]. Neben der Bestrahlungsplanung sind MPEs in der Strahlentherapie für die Dosimetrie, die Qualitätssicherung der Anlagen und den Strahlenschutz zuständig.

Medizinische Fachangestellte (MFA) komplementieren das Team. Zu ihren Aufgaben zählen Patientenannahme und -betreuung, Terminvergabe, Abrechnung und Briefherstellung [24].

Strahlentherapien werden in privaten Praxen und Kliniken sowie öffentlichen Krankenhäusern durchgeführt. Auch wenn sich diese Zentren in Größe und Ausstattung stark unterscheiden können, so sind die Prozessschritte der perkutanen Strahlentherapie grundsätzlich vergleichbar. Der Ablauf der Strahlentherapie lässt sich in die in Bild 1 angegebenen Prozesse unterteilen [12, 25].

Nach Krebsdiagnose und Entscheidung des Tumorboards folgt die Überweisung des Patienten zu einem Facharzt für Strahlentherapie, dem Strahlentherapeuten oder Radioonkologen. Dieser klärt in einem Konsultationsgespräch mit dem Patienten, ob perkutane Strahlentherapie indiziert ist und klärt den Patienten über die Behandlung auf. Die rechtfertigende Indikation durch einen Facharzt ist Pflicht für die Strahlentherapie [23] und wird nur gestellt, wenn der Nutzen der Behandlung ihre Risiken überwiegt. Stimmt der Patient der Behandlung zu, so wird im nächsten Schritt von zwei MTRA ein Planungs-CT angefertigt, welches durch zusätzliche bildgebende Verfahren wie z.B. MRT ergänzt werden kann. Das Ziel ist, den Tumor

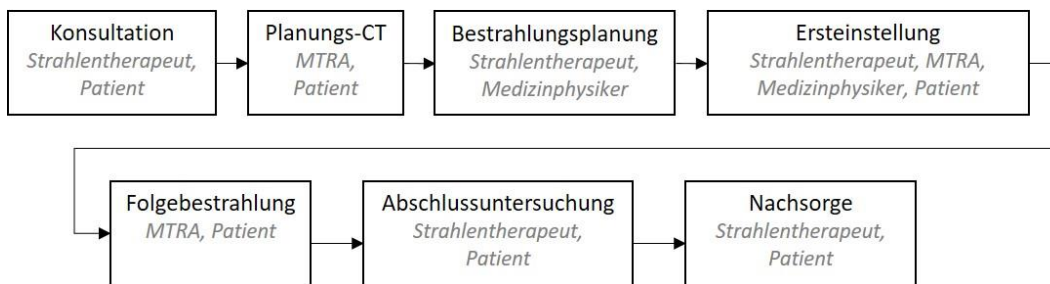


Bild 1: Strahlentherapieprozesse und beteiligte Personen.

möglichst genau zu lokalisieren. Während des Planungs-CTs befindet sich der Patient in der gleichen Position wie bei der zukünftigen Bestrahlung. Die Reproduzierbarkeit der Lagerung ist essenziell für die Planung und Durchführung der Bestrahlung und kann u.a. durch die Ausrichtung des Patienten an Raumlasersystemen sowie durch Zuhilfenahme von Lagerungshilfen gewährleistet werden.

Anhand der gewonnenen Bilder erstellen Strahlentherapeut und Medizinphysiker den Bestrahlungsplan, der die Details der Bestrahlungsdurchführung definiert. Hierzu legt der Strahlentherapeut das Zielvolumen und die zu verabreichende Dosis fest. Der Medizinphysiker berechnet Einstrahlrichtungen und Form der Strahlfelder für eine optimale Dosisverteilung. Bevor der Plan zur Bestrahlung freigegeben wird, wird er verifiziert, d.h. dosimetrisch überprüft.

Ebenso wichtig wie die Lagerung des Patienten ist die korrekte Einstellung der Geräte. Bei der Erstbestrahlung werden die Patientenlagerung und Einstellungen noch einmal durch MTRA, Medizinphysiker und den zuständigen Arzt überprüft. Dies erfolgt üblicherweise durch zusätzliche Bildgebung wie z.B. Cone-Beam-CT. Die Folgebestrahlungen werden durch die MTRA durchgeführt, die die Lagerung des Patienten vornehmen und überprüfen. In manchen Fällen kann eine Neuplanung im Verlaufe der Therapie nötig sein. Hierbei werden erneut die Prozesse vom Planungs-CT bis zur Bestrahlung durchlaufen.

Auf die letzte Bestrahlung folgt eine Abschlussuntersuchung durch den zuständigen Arzt. In regelmäßigen Abständen wird der Patient erneut beim Arzt zur Nachsorge vorstellig, um den Behandlungserfolg zu kontrollieren.

Es bleibt zu erwähnen, dass perkutane Strahlentherapie auch als Ganzkörperbestrahlung und auch bei einigen benignen Erkrankungen eingesetzt werden kann. Hier entfallen in der Regel Bildgebung, Planung und Ersteinstellung.

### 2.1.3 Strahlentherapie und Corona

Am 31.12.2019 gab die Wuhan Municipal Health Commission einen Ausbruch einer Virus-Pneumonie in Wuhan, Volksrepublik China bekannt. Am 11.03.2020 wurde COVID-19 durch die WHO zur Pandemie erklärt [26]. Bis heute (Stand 11. August 2021, 6:39 pm CEST) gab es weltweit 203.944.144 bestätigte Fälle von COVID-19, darunter 4.312.902 Todesfälle.

Die Corona-Pandemie beeinflusst die Abläufe der Strahlentherapie in vielen Bereichen. In einer Umfrage in Strahlentherapiepraxen in Deutschland, Österreich und

der Schweiz [27] berichten 74,2% der teilnehmenden Zentren einen Einfluss von COVID-19 auf ihre Prozesse, mit der häufigsten Nennung (54,2%) von Verlängerung der Prozesszeiten aufgrund von eingeführten Schutzmaßnahmen sowie ausbleibende Patienten (42,5%). Man sehe auch für die Zukunft die Prozesse der Nachsorge, Konsultation, Abschlussuntersuchung, Datensammlung bei Patientenaufnahme, Bildgebung sowie Immobilisierung von COVID-19 betroffen und mache sich Sorgen um den Ausfall von Personal aufgrund von COVID-19.

Dies kann große Auswirkungen auf den Krebspatienten und seine Heilungschancen haben. Wie zuvor beschrieben sollte der Beginn der Strahlenbehandlung so schnell wie möglich erfolgen. Zudem sollte eine begonnene Strahlentherapie nicht unterbrochen werden, da ansonsten eine Verlängerung der Behandlung mit potentiell weiteren kompensatorischen Maßnahmen nötig wird und sich die Aussicht auf einen Behandlungserfolg verschlechtert [3]. Auch bei an COVID-19 erkrankten Patienten sollte, so es der allgemeine Gesundheitszustand zulässt, ein Abbruch insbesondere der kurativen Strahlentherapie vermieden werden [28]. Dies kann nur sichergestellt werden, wenn das Personal vor einer Ansteckung geschützt wird. Gleiches gilt auch für alle Krebspatienten, da sie ein höheres Risiko haben, an COVID-19 zu erkranken oder einen schwereren Krankheitsverlauf zu erleben. [29].

Um eine zeitnahe und lückenlose Behandlung während der Pandemie sicherzustellen und Personal und Patienten vor Ansteckung zu schützen, werden unterschiedliche Maßnahmen empfohlen [30]. Bezüglich der Prozessabläufe rät das ESTRO Radiation Therapist Committee u.a. das ständige Tragen von Gesichtsmasken und beim Umgang mit Coronapatienten und Verdachtsfällen zusätzlich zu persönlicher Schutzkleidung. Zudem sollen Patienten am Eingang der Strahlentherapieeinrichtung auf Fieber getestet und nach COVID-Symptomen befragt werden [31].

## **2.2 Methodische Grundlagen**

### **2.2.1 Systematische Literaturrecherche**

Die Literaturrecherche ist die Grundlage einer akademischen Arbeit und ist Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung von Wissen [32]. Um ein hohes Maß an Transparenz und Genauigkeit zu gewährleisten, wird in dieser Arbeit die Methode der systematischen Literaturrecherche gewählt. Die systematische Literaturrecherche ist ein methodisches Vorgehen, bei dem relevante Literatur systematisch gesucht, analysiert und daraus der Stand von Wissenschaft und Technik abgeleitet wird. Hierbei wird synthetisierend gearbeitet. Sie geht damit weit über eine einfache Zusammenfassung der Literatur hinaus [32]. Eine Verzerrung durch Einseitigkeit in der Literatúrauswahl wird durch den strukturierten Prozess minimiert [33] und erhöht somit die Validität der Ergebnisse. Infolgedessen können neue Theorien entwickelt und Lücken in der Forschung aufgedeckt werden. Ebenso lassen sich Forschungsmethoden und -techniken extrahieren, die in dem untersuchten Bereich üb-

licherweise genutzt werden. Explizite Vorgehensweisen der systematischen Literaturrecherche wurden in der Fachliteratur diskutiert (siehe z.B. [32] [34] [33] [35] [36]).

Auch außerhalb der Forschung können die Ergebnisse systematischer Literaturrecherchen wertvoll sein. So können sie z.B. Grundlage für Entscheidungsträger sein, Risiken und Vorteile von Eingriffen im Gesundheitswesen zu beurteilen. [36]. Daher bemüht sich laut Tranfield et al. [33] die medizinische Forschung seit den 1990ern um eine Verbesserung der Qualität des Rechercheprozesses.

Im Rahmen dieser Arbeit dient die strukturierte Literaturrecherche der Ausbildung einer Wissensgrundlage bezüglich Modellierung und Durchführung ereignisdiskreter Simulationen von Ablaufprozessen in der perkutanen Strahlentherapie. Hierbei sollen Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgearbeitet und analysiert werden. Insbesondere sollen die Ergebnisse auch im Hinblick auf das Aufstellen eines eigenen Modells bewertet sowie auf die potentielle Implementierung von COVID-19 Maßnahmen untersucht werden. Zu Recherche und Analyse wurden professionelle Softwarewerkzeuge eingesetzt.

### **2.2.2 Ereignisdiskrete Simulation**

Nach Preston White et al [37] ist die Simulation das Experimentieren mit einem Modell, das die Abläufe von Prozessen der realen Welt imitiert. Hierbei ist das Modell eine simplifizierte Darstellung der Wirklichkeit, das genau den Umfang und die Detailtiefe des realen Systems abbildet, die für die Untersuchung relevant sind. Simulationen werden insbesondere dann eingesetzt, wenn das Ausprobieren am echten System zu gefährlich, zeitaufwendig, teuer oder schlichtweg unmöglich ist [37]. Dies ist im Gesundheitssektor oft gegeben. So wurden in den letzten zwei Dekaden über 200 Publikationen veröffentlicht, die ereignisdiskreten Simulationsmethoden im Gesundheitsmanagement angewendet haben, 65 Prozent davon bezüglich der Abläufe im Gesundheits- und Pflegesystem [38]. Auch konkret in der Radiotherapie wurden Simulationsmethoden im Allgemeinen [39] und ereignisdiskrete Simulation im Speziellen bereits angewendet (siehe 3.3.1).

Die Prozesse von Interesse werden üblicherweise als System bezeichnet und bilden mit den Annahmen über das Verhalten des Systems das Modell [40]. Mit einer Simulation kann dieses Verhalten unter verschiedenen Bedingungen untersucht werden. Die zu verändernden Bedingungen können als Parameter in das Modell integriert werden. Somit lassen sich verschiedene Szenarien untersuchen und vergleichen. Man spricht von einem parametrischen Simulationsmodell.

Die Methode der ereignisdiskreten Simulation lässt sich anwenden, wenn das System als Folge von getrennten, zeitlich diskreten Ereignissen dargestellt werden kann. Der Zustand des Systems wird zu jedem Zeitpunkt vollständig – im Sinne der Untersuchung – durch die Angabe seiner Zustandsvariablen beschrieben, die sich ausschließlich bei Eintritt eines Ereignisses ändern können. Jede Zustandsänderung

ist augenblicklich und unmittelbar, eine Eigenschaft, die diskrete Systeme von kontinuierlichen unterscheidet (siehe z.B. Law [40]). Zwischen zwei Ereignissen ändert sich der Systemzustand nicht. Weitreichende Informationen zur Methode der ereignisdiskreten Simulation finden sich in den Werken von Law [40] oder Banks [41].

Ein ereignisdiskretes Modell enthält nach [37, 42] die folgenden Komponenten:

- Entitäten: Komponenten, die explizit modelliert werden müssen, um das Systemverhalten adäquat wiederzugeben. Sie reisen durch das System und verändern dessen Zustandsvariablen. Üblicherweise haben Entitäten Charakteristika, sogenannte Attribute, die spezifisch für die jeweilige Entität sind und ihr Verhalten im System bestimmen. Diese Attribute können durch das System auch verändert werden.
- Ressourcen: Ressourcen sind Bausteine von üblicherweise begrenzter Kapazität. Entitäten bemühen sich um Ressourcen und müssen warten, wenn diese nicht verfügbar sind.
- Aktivitäten und Ereignisse: Aktivitäten beschreiben das Verhalten der Entitäten im System und können Zustandsvariablen verändern. Der Zeitpunkt, zu dem eine Zustandsänderung auftritt, wird als Ereignis bezeichnet. Es können drei grundlegende Aktivitätsarten unterschieden werden:
  - Verzögerung (delay): eine Entität wird für eine bestimmte Zeit im Modell aufgehalten, wenn sie z.B. den Service einer Ressource in Anspruch nimmt. Die Dauer kann aus einer statistischen Verteilung stammen, ist aber zu Beginn der Aktivität bekannt.
  - Warteschlange (queue): eine Entität wird für eine unbestimmte Zeit im Modell aufgehalten, z.B., wenn sie auf Ressourcen wartet. Die Dauer der Wartezeit ist erst bekannt, wenn sie endet.
  - Logik: erlaubt den Entitäten, den Systemzustand durch Änderung von Zustandsvariablen oder Entscheidungslogik zu verändern.

Um die Variabilität der realen Welt wirklichkeitsgetreu abzubilden, werden Zustandsänderungen oft mithilfe von Übergangswahrscheinlichkeiten modelliert. Hierbei spielen Zufälle eine Rolle und der Ausgang der Simulation ist bei Vorgabe der Eingangsparameter nicht eindeutig vorbestimmt [43]. Multiple Simulationsläufe mit den gleichen Eingabeparametern liefern entsprechend stochastisch verteilte Ergebnisse und müssen in diesem Zusammenhang interpretiert werden. Somit sind zum Vergleich unterschiedlicher Szenarien jeweils mehrere Simulationsläufe nötig.

### 2.2.2.1 Simulationsstudie

Die strukturierte Untersuchung eines komplexen Systems mit Hilfe eines Simulationsmodells wird als Simulationsstudie bezeichnet. Hierzu gehören neben der Programmierung auch andere Aspekte wie die stochastische Analyse der Ergebnisdaten oder die Validierung [40]. Banks et al. [41] beschreiben die Durchführung einer Simulationsstudie in mehreren Schritten. Ein für diese Studie relevanter Auszug

daraus befindet sich in Bild 2. Im Nachfolgenden werden die einzelnen Schritte in Anlehnung an Banks et al. [41] erläutert.

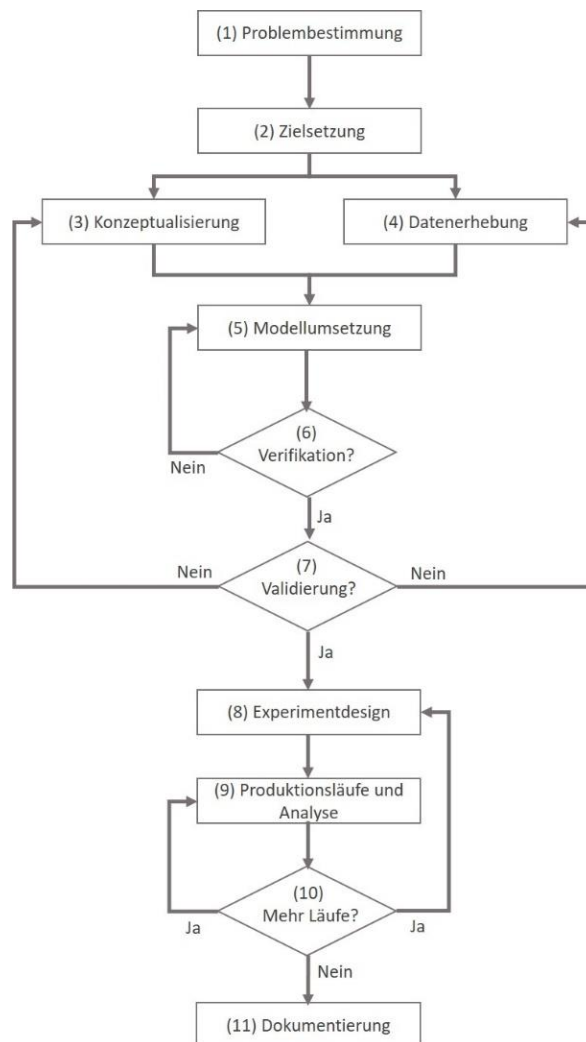


Bild 2: Durchführung einer Simulationsstudie in Anlehnung an Banks et al. [41].

### (1) Problembestimmung

Zu Beginn muss das Problem, zu dessen Lösung ein Modell entwickelt werden soll, klar formuliert und von den involvierten Parteien verstanden werden.

### (2) Zielsetzung

Es muss festgelegt werden, welche Frage durch die Simulation beantwortet werden soll und durch welche Größen dies geschehen soll.

### (3) Konzeptualisierung

Ein Modell muss die Wirklichkeit im Sinne der Fragestellung möglichst gut approximieren und gleichzeitig das System so weit wie möglich abstrahieren. Nur so können die Modellierung und Simulation mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden. Das Modell hängt aber auch davon ab, welche Eingangsdaten zur Verfügung stehen bzw. erhoben werden können. Somit geht die Konzeptualisierung immer einher mit der Datenerhebung [41].

#### **(4) Datenerhebung**

Die Zielsetzung der Studie bestimmt die benötigten Daten. Die Sammlung der Daten ist oft zeitaufwändig und deren Verfügbarkeit beeinflusst die Konzeptualisierung.

#### **(5) Modellumsetzung**

Das Modell muss mittels Programmiersprachen oder spezieller Simulationssoftware in ein Computerprogramm umgewandelt werden.

#### **(6) Verifikation**

Das Modell muss auf Richtigkeit überprüft werden. Hierbei wird verifiziert, dass das Modell fehlerfrei funktioniert.

#### **(7) Validierung**

Im Gegensatz zur Verifikation wird bei der Validierung überprüft, ob das Modell das zugrundeliegende reale System korrekt beschreibt. Hierzu gibt es verschiedene Methoden, das Modell mit dem System zu vergleichen. Auch wenn eine quantitative Validierung, bei der die Ausgangsdaten des Modells mit denen des realen Systems verglichen werden, wünschenswert wäre, ist diese in vielen Fällen nicht realisierbar z.B., wenn ein bislang nichtexistierendes System modelliert wird. Augenscheinvalidität (face validity) kann durch Sensitivitätsanalysen und durch Experten überprüft werden. Experten können auch helfen, Modellannahmen zu validieren.

Die Validierung ist einer der wichtigsten Schritte in einer Simulationsstudie. Nur wenn nachgewiesen werden kann, dass das Modell das reale System adäquat beschreibt, besitzen die Ergebnisse Aussagekraft.

#### **(8) Experimentdesign**

In diesem Abschnitt erfolgt die Festlegung der zu untersuchenden Szenarien und Eingabeparameter. Es wird entschieden, welche Alternativen untersucht und miteinander verglichen werden sollen.

#### **(9) Produktionsläufe und Analyse**

Aufgrund der stochastischen Natur des Modells, muss die Anzahl der benötigten Läufe für das System bestimmt werden. Für jedes Szenario wird die festgelegte Anzahl an Läufen durchgeführt und die Datenausgabe analysiert. Verschiedene Szenarien werden miteinander verglichen und bewertet.

#### **(10) Mehr Läufe?**

Anschließend an die Analyse wird bestimmt, ob sich weitere Fragen ergeben. Es wird entschieden, ob weitere Experimente nötig sind und wie diese aussehen.

#### **(11) Dokumentierung**

Die Gesamtheit der Ergebnisse sollte in einem Abschlussbericht dokumentiert werden.



### 3 Strukturierte Literaturrecherche

Die Durchführung der Strukturierten Literaturrecherche kann grob in die Kategorien Planung, Suche und Auswertung unterteilt werden. Zunächst werden Planung und Verfahren der Literaturrecherche beschrieben, gefolgt von der Durchführung der Suche. Anschließend werden die identifizierten Publikationen vorgestellt und das synthetisierte Wissen präsentiert und diskutiert.

#### 3.1 Planung und Verfahren

Den Anfang einer systematischen Literaturrecherche bildet die Ausarbeitung der Suchstrategie. Hierbei werden das Ziel der Suche, Suchorte und -umfang sowie Ein- und Ausschlusskriterien der Ergebnisse festgelegt [44].

Die vorliegende Suche beschäftigte sich mit ereignisdiskreten Simulationen der Ablaufprozesse in der perkutanen Strahlentherapie. Die Suche soll umfangreich und gleichzeitig relevant sein. Der Umfang wird durch die Auswahl der Literaturdatenbanken ScienceDirect, Scopus und PubMed gewährleistet. Die Relevanz wird durch die Festlegung geeigneter Suchparameter sowie die Definition von Ein- und Ausschlusskriterien der Ergebnisse erreicht.

Zur Identifizierung geeigneter Suchparameter wurde zuerst eine explorative Suche in der englischsprachigen Literatur über Titel, Zusammenfassung und Keywords durchgeführt und aus den Ergebnissen passende Suchterme destilliert. Diese wurden durch Gespräche mit einer Habilitandin und Expertin für Simulationen im Gesundheitswesen und einem Experten aus der Industrie und Forschung mit langjähriger Erfahrung in der Strahlentherapie validiert.

Die Zusammensetzung der Suchterme musste an die Anforderungen der jeweiligen Datenbank angepasst werden. Details zu Suchanfragen sowie ein Protokoll der Suchstrategie in Anlehnung an [44] finden sich im Anhang A.1 und A.2. Exemplarisch wird hier die Suchanfrage in der Datenbank Scopus dargestellt:

```
TITLE-ABS-KEY ((( discrete AND event ) OR ( agent ) OR ( system AND dynamics )) AND (( modelling ) OR ( simulation ) OR ( optimization )) AND (( radiotherapy ) OR ( radiation AND oncology ) OR ( radiation AND therapy )) AND (( process ) OR ( workflow ))) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "cp" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ch" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) )
```

Die identifizierte Literatur muss auf Relevanz geprüft werden. Hierbei hilft die eindeutige Definition von Kriterien zum Ein- und Ausschluss der gefundenen Literatur.

Ausgeschlossen wurde folgende Literatur:

- Perkutane Strahlentherapie war nicht das Hauptthema des Beitrages: War Brachytherapie, Chemotherapie o.ä. das bestimmende Thema, so wurde der Beitrag exkludiert. Auch Partikeltherapien wurden ausgeschlossen.
- Ereignisdiskrete Simulation wurde im Beitrag nicht angewendet.
- Die Publikation beschäftigt sich mit klinischer Forschung wie z.B. mit medizinischer Wirksamkeit von Therapieverfahren.
- Die Literaturangaben enthalten keinen Abstract oder der Abstract konnte nicht mit angemessenem Aufwand gefunden werden.

Somit wurde folgende Literatur eingeschlossen:

- Das Hauptthema des Beitrags ist die perkutane Strahlentherapie unter Einsatz von Linearbeschleunigern.
- Untersuchungen der Ablaufprozesse in der perkutanen Strahlentherapie mit Einsatz ereignisdiskreter Simulationsmethoden.
- Empirische Daten, die als Eingabe für Simulationsmodelle dienen können.
- Reviews wurden der Vollständigkeit halber aufgenommen aber nicht in die Inhaltsanalyse einbezogen.

In einem ersten Schritt wurden die Zusammenfassungen der Publikationen anhand der genannten Kriterien analysiert und die Beiträge entsprechend verworfen oder inkludiert [34]. Dieses Verfahren wurde zusätzlich von zwei Experten unabhängig durchgeführt und die Validität der Auswahl dadurch erhöht.

Basierend auf den ausgewählten Publikationen wurde eine Vorwärts- und eine Rückwärtssuche durchgeführt [32]. Hierbei wurden Beiträge identifiziert, die die ausgewählten Paper referenzieren oder von denen sie referenziert werden. Diese wurden dann ebenfalls nach o.g. Kriterien in- bzw. exkludiert.

### **3.2 Durchführung der Suche**

Die Literaturrecherche wurde mittels der Literaturverwaltungssoftware Citavi 6 [45] durchgeführt. Eine graphische Darstellung der Suche findet sich in Bild 3.

Mit Hilfe der zuvor definierten Suchparameter wurden 749 Publikationen identifiziert, davon 335 bei ScienceDirect, 15 bei PubMed und 399 bei Scopus. Hinzugekommen wurden 4 weitere Publikationen, die aus der explorativen Suche stammen und 3 weitere Beiträge, die im Zusammenhang ähnlicher Projekte identifiziert wurden. Von den insgesamt 756 Publikationen wurden 57 Beiträge als Dubletten herausgefiltert. Die verbliebenen 699 Paper wurden dem ersten Screening unterzogen und 14 Paper wurden als relevant identifiziert.

Um weitere Beiträge zu identifizieren wurde die Vorwärts-Rückwärtssuche zu den ausgewählten 14 Publikationen durchgeführt. Für die Vorwärtssuche wurde GoogleScholar benutzt, um auch Beiträge eines weiteren Repository einzuschließen. Nach Ausschluss der Dubletten lieferte die Vorwärtssuche 185 Beiträgen und

die Rückwärtssuche 184. Nach einem Screening der Abstracts der Beiträge basierend auf den definierten Inklusions- und Exklusionskriterien wurde eine Publikation als relevant identifiziert und der Selektion hinzugefügt.

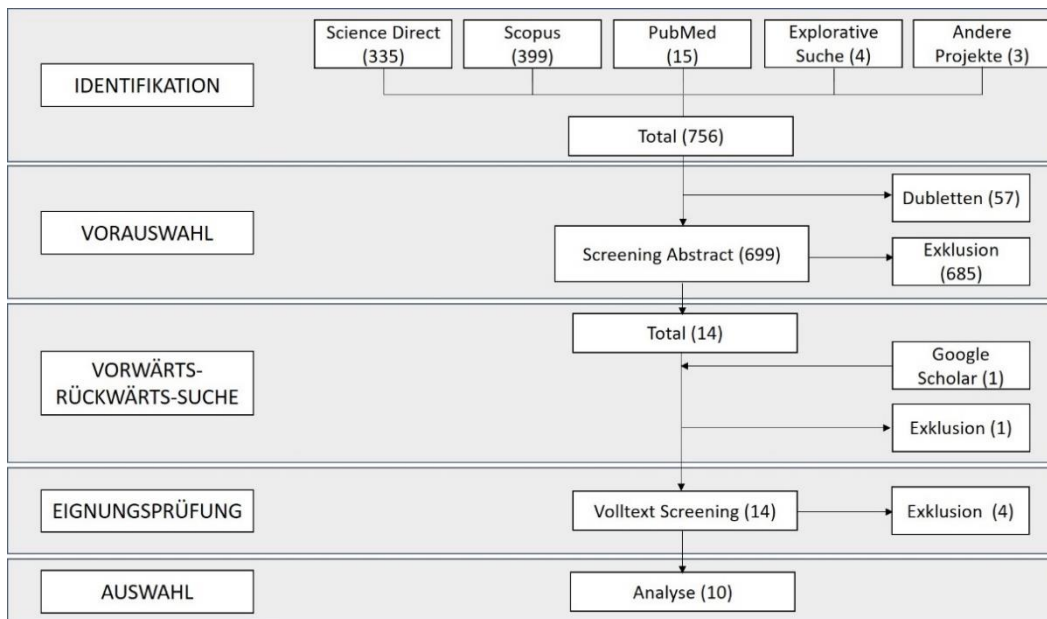


Bild 3: Flussdiagramm der Literaturrecherche nach Liberati et. al [36]

Von den ausgewählten 15 Beiträgen, wurde ein Paper exkludiert, da es keine Primärforschung, sondern ein Literature Review war. Die restlichen 14 Publikationen wurden erneut auf Relevanz überprüft, nun aber in Bezug auf den gesamten Text. Dabei wurden vier weitere Paper aus folgenden Gründen ausgeschlossen:

- Befasste sich nicht mit Simulation der Ablaufprozesse
- Hatte als Schwerpunkt die Qualitätsanalyse der einzelnen Prozesse
- Beschäftigte sich ausschließlich mit Terminplanungsdetails der ersten Konsultation
- Nicht ausreichende Detailtiefe bei der Beschreibung zentraler Parameter

Die verbleibenden 10 Publikationen wurden in die strukturierte Inhaltsanalyse aufgenommen.

### 3.3 Strukturierte Inhaltsanalyse

In diesem Abschnitt werden zunächst die ausgewählten Publikationen vorgestellt. Anschließend wird die Analyse beschrieben und die Ergebnisse zusammengefasst. Die strukturierte Inhaltsanalyse wurde mit der Datenanalyse-Software Atlas.ti Version 9 [46] durchgeführt.

#### 3.3.1 Vorstellung der Publikationen

In diesem Kapitel werden die 10 Publikationen der systematischen Literaturrecherche zusammenfassend vorgestellt.

Tabelle 1: Publikationen als Ergebnis der Literaturrecherche

Autor	Jahr	Titel
Babashov et al.	2017	Reducing Patient Waiting Times for Radiation Therapy and Improving the Treatment Planning Process: a Discrete-event Simulation Model (Radiation Treatment Planning)
Bikker et al.	2015	Reducing access times for radiation treatment by aligning the doctor's schemes.
Famiglietti et al.	2017	Using Discrete-Event Simulation to Promote Quality Improvement and Efficiency in a Radiation Oncology Treatment Center.
Hosseini et al.	2015	Discrete event simulation technique for evaluating performance of oncology department: a case study.
Joustra et al.	2012	Reduce fluctuations in capacity to improve the accessibility of radiotherapy treatment cost-effectively.
Kapamara et al.	2014	A simulation of a radiotherapy treatment system: A case study of a local cancer centre.
Miranda et al.	2021	Discrete-event simulation applied to a radiotherapy process: a case study of a cancer center.
Proctor et al.	2007	Modelling Patient Flow in a Radiotherapy Department.
Vieira et al.	2019	Improving workflow control in radiotherapy using discrete-event simulation.
Werker et al.	2009	The use of discrete-event simulation modelling to improve radiation therapy planning processes.

**Babashov et al. [47]**

Babashov et al. untersuchten mithilfe einer ereignisdiskreten Simulation den Weg eines Patienten am London Regional Cancer Program, Canada von der Überweisung zum Radioonkologen bis zum Start der Strahlentherapie. Ziel war es, Engpässe im Planungsprozess zu identifizieren, um Wartezeiten auf den Therapiebeginn zu verringern und den Patientendurchsatz zu erhöhen. Daten einer Trackingssoftware sowie aus Experteninterviews und Modellkalibrierungen wurden als Eingabewerte benutzt. Die Autoren fanden, dass das Hinzufügen eines weiteren Dosimetristen den größten positiven Einfluss, das Entfernen eines Medizinphysikers den größten negativen Einfluss auf Wartezeit sowie den Patientendurchsatz haben. Andere Veränderungen wie z.B. Beschleunigerverfügbarkeit oder Anzahl der Onkologen hatten kaum Auswirkungen. Als nächsten Schritt wurde vorgeschlagen, die Verbesserungen auch in Bezug auf Krebsart und Dringlichkeitsstufe zu untersuchen und die Auswirkungen gleichzeitiger Ressourcenänderungen zu beleuchten.

**Bikker et al. [48]**

Bikker et al. entwarfen eine verbesserte Termineinteilung der Aufgaben der Radioonkologen. Der neu entwickelte Wochenplan wurde mittels ereignisdiskreter Simulation auf Verkürzung der Wartezeiten bis zur ersten Bestrahlung hin untersucht. Hierzu wurde ein Modell des Strahlentherapieprozesses von der Überweisung bis zur ersten Bestrahlung für das Academic Medical Center, Niederlande mit Standorten in Amsterdam und Flevo entwickelt und getestet. Als Eingabedaten wurden historische Daten sowie Abschätzungen durch einen Arzt genutzt. Der Einsatz des

neuen Ärzteplans führte zur Verringerung der Wartezeiten für reguläre und subakute Patienten. Größere Wartezeitreduktionen konnten mit der Kombination aus neuem Wochenplan der Onkologen und zusätzlichen Änderungen wie z.B. der Abschaffung von speziellen Zeitblöcken für die Konturierung erreicht werden. Dennoch konnte mit keiner der vorgeschlagenen Maßnahmen die Zielwartezeit erreicht werden. Es wird vorgeschlagen zukünftig auch Priorisierungsregeln oder Kapazitätsreservierungen für bestimmte Patientengruppen zu untersuchen.

Zusätzlich wurde herausgefunden, dass bezüglich aller Prozessschritte die Zeit zwischen Überweisung und erster Konsultation am stärksten reduziert wurde.

### **Famiglietti et al. [49]**

Im Rahmen einer Qualitätsverbesserungsinitiative einer akademischen Radioonkologieabteilung wurde ein ereignisdiskretes Simulationsmodell zur Identifizierung von Ineffizienzen entwickelt. Speziell unterwiesenes externes Personal sammelte drei Monate lang Beobachtungsdaten des Behandlungsprozesses. Weitere Daten wurden durch die elektronischen Patientenakten, Maschinendaten sowie die Personalmanagement Software zur Verfügung gestellt. Berechnet wurde die Zeit, die der Patient von der Anmeldung bis zum Verlassen der Klinik, zwischen Anmeldung und Betreten des Behandlungsraumes sowie innerhalb des Behandlungsraums verbringt. Zudem wurden Auslastung von Personal und Maschinen und jährliche Personalkosten untersucht. Es wurde insbesondere eine starke Zeitabhängigkeit der Wartezeiten bis zum Betreten des Behandlungsraumes festgestellt, die der zeitlichen Variabilität des Bedarfs und dazu fehlenden Mitigationsmaßnahmen zugeschrieben wurde. Ebenso wurde aufgezeigt, dass die Auslastung von Personal und Equipment unter 60% lag. Als nächstes sollen verschieden potentielle Verbesserungsmaßnahmen auf ihre Effektivität hin überprüft werden.

### **Hosseini et al. [50]**

Es wurde eine ereignisdiskrete Simulation für ein privates Krankenhaus in Teheran, Iran entwickelt, um Engpässe in den Prozessabläufen der Radiologie und der Radiotherapie zu identifizieren und zu beheben. Betrachtet wurde der Patientenfluss von Betreten der Klinik bis zum Verlassen während eines Tages. Zusätzlich zur Bildgebung mit CT wurde hier auch die Verwendung von MRT und neben der perkutanen Strahlentherapie auch die Brachytherapie modelliert. Eingabedaten stammen aus Befragungen des Personals sowie einer vierwöchigen Beobachtung. Als Leistungsindikatoren zählten der Patientendurchsatz sowie die Verweildauer. Durch Variation verschiedener Parameter wie Anzahl Maschinen oder Bearbeitungszeiten konnte gezeigt werden, dass die größte Engstelle in der Bildgebung liegt. Mehr CT bzw. MRT Geräte konnten die Verweildauer verringern und den Durchsatz erhöhen. Eine Verlängerung der Bearbeitungszeiten am CT zeigte eine Verlängerung der Verweildauer in der Radiologie, was eine Verringerung des Durchsatzes in der

Radiotherapie zur Folge hat. Die Hinzunahme eines weiteren Linearbeschleunigers zeigte nur eine geringe Reduzierung der Verweildauer.

#### **Joustra et al. [51]**

Joustra et al. untersuchten den Prozess der Radiotherapieabteilung am Academic Medical Center, Niederlande auf Engpässe und testeten den Einfluss verschiedener Szenarien auf die Wartezeit zwischen Überweisung des Patienten und erster Bestrahlung. Der Prozess bestehend aus erster Konsultation in der Ambulanz, Planung und Behandlung wurde mit einer Kombination aus Warteschlangentheorie und ereignisdiskreter Simulation erforscht. Durch den Erwerb eines zusätzlichen Linearbeschleunigers konnte die Durchsatzrate für subakute und reguläre Patienten erhöht werden, doch wurden die vorgegebenen Durchsatzziele nicht erreicht. Zu signifikanten Verbesserungen führten Reduktionen in der Variabilität der Verfügbarkeit der Ambulanz ohne die Verfügbarkeit an sich erhöhen zu müssen.

#### **Kapamara et al. [52]**

In dieser Studie wurde die Radiotherapieabteilung am Arden Cancer Center zweier Universitätskrankenhäuser in England untersucht. Betrachtet wurden Engpässe im Patientenfluss von erster Konsultation bis zur Behandlung mit dem Zweck, die Wartezeit zu reduzieren. Hierbei wurden die drei Abteilungen Teletherapie, Brachytherapie und Radionuklidtherapie modelliert und mithilfe von Daten aus einer Datenbank, Beobachtungen sowie Experteninterviews simuliert. Im Rahmen der Teletherapie wurden die vier Prozessphasen Konsultation, Bildgebung, Planung und Behandlung modelliert. Eine Reduktion in der Wartezeit zwischen Konsultation und erster Bestrahlung konnte durch eine Verlängerung der Arbeitsschichten von Personal und Maschinen erreicht werden.

#### **Miranda et al. [53]**

Der Behandlungsprozess der Radiotherapieabteilung des Krankenhauses Hélio Angotti, Brasilien wurde mittels ereignisdiskreter Simulation und Optimierungstechniken erforscht. Daten wurden aus der Tracking Software sowie einer Beobachtungsstudie von 233 Patienten gewonnen. Als Leistungskennzahlen dienten die Zeit, zu der der letzte Patient am Tag die Klinik verlässt sowie die Wartezeit des Patienten zwischen Ankunft und Behandlungsbeginn. Untersucht wurden 32 Kombinationen aus Anzahl geplanter Patienten, Länge der Dauer einer Behandlungseinheit und der Möglichkeit, eine Behandlungseinheit doppelt zu verplanen. Die Ergebnisse wurden derart dargestellt, dass sich zu vorgegebener Patientenzahl, die optimale Kombination der anderen beiden Entscheidungsvariablen ablesen ließ. Mittels Optimierungsmethoden wurden zusätzlich die Terminplanung der LINAC Techniker sowie ein weiterer Linearbeschleuniger untersucht.

#### **Proctor et al. [54]**

Proctor et al. untersuchten, die Auswirkungen eines Zuwachses an Patienten in der Radiotherapieabteilung des Walsgrave Krankenhauses, England mit ereignisdiskreter Simulation. Hierfür wurde der Weg der ambulanten und stationären Patienten

durch die Abteilung von der Überweisung, über Behandlungsplanung und –durchführung bis zur Entlassung modelliert. Maschinendaten sowie Experteninterviews und Beobachtungen wurden für die Simulation verwendet. Bei erhöhter Patientenzahl wurde der Effekt von zusätzlichen CT oder LINAC Geräten, eine Verlängerung der Schichtdauer, die Möglichkeit, den Patienten nicht durch den eigenen Arzt behandeln zu müssen sowie Kombinationen daraus getestet. Alle Maßnahmen haben einen positiven Effekt auf die Wartezeit des Patienten von der Überweisung bis zur ersten Bestrahlung.

#### **Vieira et al. [55]**

Am Netherlands Cancer Institute bekam bisher ein Teil der Radiotherapiepatienten direkt nach der Konsultation den Termin zur ersten Bestrahlung, sogenannte Pull-Patienten, die anderen erst während oder nach der Bestrahlungsplanung, Push-Patienten genannt. Die vorliegende Studie untersucht das Verhältnis von Push- zu Pull-Patienten im Hinblick auf die Verbesserung der Wartezeiten zwischen Überweisung und Start der ersten Bestrahlung, die Anzahl an Patienten, die vorgegebene Wartezeitziele nicht erreicht sowie die Anzahl der Umbuchungen der ersten Bestrahlungstermine. Hierzu wurde mit ereignisdiskreter Simulation der Weg des Patienten von Konsultation über Bildgebung, Konturierung, Bestrahlungsplanung zu Behandlungsstart modelliert. Eingabedaten wurden aus Experteninterviews und historischen Daten gewonnen. Generell zeigte sich, dass die durchschnittliche Wartezeit zunimmt, wenn alle Patienten als Push-Patienten geplant werden, die durchschnittliche Patientenzahl, die außerhalb des Wartezeitziels behandelt werden jedoch sinkt. Die Anzahl der Umbuchungen steigt mit der Rate der Pull-Patienten an. Es gibt Unterschiede innerhalb der einzelnen Krebsgruppen, die in einer weiteren Studie genauer untersucht werden sollen.

Zusätzlich erforschten Vieira et al. den Einfluss weiterer Maßnahmen. Eine gleichmäßigere zeitliche Verteilung der Konsultationstermine hatte den größten Einfluss auf die Wartezeitreduktion sowie Verringerung der Patientenzahl, die erst nach dem Wartezeitziel behandelt werden können. Auch die Abschaffung vorbelegter CT-Termine konnte die Situation verbessern. Andere Maßnahmen bezüglich der Bestrahlungsplanung und Konturierung zeigten geringe Auswirkungen.

#### **Werker et al. [56]**

Werker et al. erforschten den Planungsprozess am Vancouver Center der British Columbia Cancer Agency, Canada auf eine mögliche Reduktion der Planungsdauer und damit der allgemeinen Wartezeit zum Start der Bestrahlung. Hierzu wurde mithilfe ereignisdiskreter Simulation ein Modell von Tumorlokalisierung bis zum fertigen Behandlungsplan entwickelt und mittels historischer sowie aus Experteninterviews und –umfragen gewonnen Daten simuliert. Es wurden verschiedene Szenarien getestet, in denen Ressourcen und Verfügbarkeiten geändert wurden. Eine gleichmäßigere Verteilung und Verkürzung der durch Onkologen verursachten

Verzögerungen zeigte die größte Planungszeitreduktion. Die größte Planungszeitverlängerung wurde durch den Wegfall eines Radiotherapists (ähnlich MTRA) hervorgerufen.

### 3.3.2 Synthese

Die ausgewählten Publikationen wurden auf die Modellierungsprozesse der Strahlentherapieabläufe hin untersucht. Besonderer Wert wurde auf das Ableiten von Design Principles für eine Modellierung der Kernprozesse einer privaten Strahlentherapieeinrichtung mit einem CT Gerät und zwei Linearbeschleunigern gelegt. Die qualitative Inhaltsanalyse wurde unter Einbezug quantitativer Schritte durchgeführt. Nach Mayring [57] kann die Bedeutung einer Kategorie insbesondere in der Fallanalyse oft mit der Häufigkeit ihrer Kodierung in Zusammenhang gebracht werden.

Alle Publikationen wurden mittels der Analyse-Software Atlas.ti Version 9 kodiert und die Codes in Kodegruppen zusammengefasst. Der Analyseansatz war induktiv-deduktiv (siehe z.B. Gläser et al [58]). Einige Kodegruppen waren durch die Thematik schon vorgegeben und wurden während der Analyse noch angepasst. Andere Kodegruppen wurden erst während der Analyse herausgearbeitet. Eine vollständige Auflistung der Codes und Kodegruppen finden sich in Anhang A.3. Als Kodiersprache wurde Englisch gewählt, in Anlehnung an die Sprache der zu untersuchenden Publikationen. Die erschlossenen Kodegruppen werden im Folgenden vorgestellt und betrachtet.

#### 3.3.2.1 Übergreifende Kodegruppen

**Länder:** Es zeigte sich, dass sich die Publikationen jeweils nur auf Einrichtungen innerhalb eines Landes bezogen. So wurden Studien in Brasilien (1), Canada (2), England (2), Iran (1), Texas/USA (1) sowie den Niederlanden (3) durchgeführt, jedoch nie länderübergreifend. In den Niederlanden wurden zwei der Studien am gleichen Krankenhaus vorgenommen. Aufgrund länderspezifischer Charakteristika im Krankenhauswesen wie z.B. Personalschlüssel, Qualifikationen des Personals, Einzugsgebiete oder genereller kultureller Unterschiede kann ein Modell nicht ohne Anpassungen auf eine Institution in einem anderen Land übertragen werden.

Eine Herausforderung zeigte sich auch in der Zuordnung der Berufsbezeichnungen zu ihren jeweiligen Verantwortungsbereichen. So wird von Radiotherapist, Radiation therapist, Radiation therapy technologist Radiation technologist, Radiographer oder einfach nur Therapist oder Technician gesprochen obwohl prinzipiell das gleiche Berufsbild gemeint ist [18]. Zur Vereinfachung wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Begriff Radiation Therapy Technologist (RTT) verwendet.

Es stellt sich die Frage, ob sich ein generisches Modell entwickeln lässt, das länderunabhängig Anwendung finden kann. Eine Grundvoraussetzung hierfür wäre eine eindeutige Definition der Berufsbilder und Verantwortungsbereiche.



**Institutionen:** Alle Studien wurden in Krankenhäusern durchgeführt, vier davon explizit und zwei weitere implizit in Universitätskrankenhäusern sowie eine in einem privaten Krankenhaus. Strahlentherapiepraxen wurde nicht untersucht.

Die Dichte der Untersuchung in Universitätskrankenhäusern lässt sich mit dem akademischen Charakter der Einrichtungen erklären. Auch die Einbettung einer Strahlentherapieabteilung in ein komplexes Krankenhaus sowie die Größe der Institution kann den Bedarf einer Studie auslösen. Möglicherweise lässt sich das Fehlen von Studien in Praxen damit erklären, dass hier pragmatisch untersucht und nicht wissenschaftlich geforscht und publiziert wird.

Ein großer Unterschied zwischen privaten Strahlentherapiepraxen und Krankenhäusern liegt darin, dass Ärzte in Krankenhäusern oft zusätzliche Verpflichtungen haben. Daraus ergeben sich Terminprobleme bezüglich der radioonkologischen Aufgaben mit Wartezeitfolge für den Patienten, was auch von Bikker et al. [48] und Werker et al. thematisiert wurde [56]. Auch muss sich eine Abteilung meist den allgemeinen Regeln des Krankenhauses unterwerfen und wird zentral gesteuert. Eine Praxis hingegen kann oft wesentlich spezifischer und auf die eigenen Bedürfnisse zugeschnitten agieren. Dies könnte zum Beispiel auch die schnelle Implementierung von Coronamaßnahmen betreffen. Zudem findet in Krankenhäusern oft eine Auslagerung von Teilschritten in andere Abteilungen statt, z.B. CT und MRT werden in der Radiologie durchgeführt (siehe [50]) oder Personal wird mit Brachytherapie und anderen Therapieformen geteilt (siehe [52]).

Eine Übertragung eines Simulationsmodells einer Krankenhausabteilung auf eine Praxis ist nicht ohne Modifikationen möglich. So erklären Babshov et al. [47], dass „ähnliche Ansätze mit einigen Lern- und Rüstkosten in den meisten Radiotherapie Abteilungen genutzt werden können“. Bikker et al. beschreiben ihr Modell als „repräsentativ für Krankenhäusern in den Niederlanden bezüglich Einrichtungsgröße und Versorgungsprozessen. Die Fallmischung mag krankenhausspezifisch sein [...]“ [48]. Vieira et al. [55] beschreiben die von ihnen modellierten Prozesse und Fallverteilungen als Standard unter Radiotherapiezentren und dass sie daher auf andere Einrichtungen mit ähnlichem Arbeitsablauf und Ressourcen angewendet werden können. Werker et al. [56] erklären, dass das Modell möglicherweise selbst auf ähnliche Fälle nicht ohne einige Anpassungen übertragen werden kann.

Um eine private Strahlentherapiepraxis untersuchen zu können, bedarf es eines Modells, das die spezifischen Belange einer Praxis widerspiegelt. Da das Modell eines Krankenhauses nicht oder nur mit erheblichen Umwandlungen auf eine Praxis angewendet werden kann, lässt sich aus dem bisher Geforschten zwar lernen macht das Erstellen eines eigenen Modells aber unumgänglich. Dieses Modell wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und wird im Anschluss (Kapitel 4) vorgestellt.

### 3.3.2.2 Modellierungs-Codegruppen

Im Rahmen der Modellierung wurden insbesondere die Prozessschritte sowie die Eingabeparameter untersucht. Dazu wurden menschliche und physikalische Ressourcen, die für die einzelnen Prozessschritte nötig waren und der Patient mit seinen Attributen beleuchtet. Es wurden benötigte Eingabeparameter analysiert, auch im Hinblick auf zugrundeliegende Verteilungsfunktionen, und die Datenquellen. Zudem wurden die Leistungskennzahlen der einzelnen Modelle untersucht.

**Menschliche Ressourcen:** Famiglietti et al. beschrieben in ihrer Studie lediglich, dass „Staffing“ Einzug ins Modell findet und werden daher im weiteren Zusammenhang nicht weiter betrachtet.

Es konnten die folgenden relevanten Berufsgruppen identifiziert werden:

- **Radiation Therapy Technologists:** Acht der neun Publikationen modellierten Radiation Therapy Technologists (oder deren Äquivalente, s. Abschnitt 3.3.2.1). Proctor et al. konkretisierten im Allgemeinen nicht das Personal, sondern die Aufgaben beziehungsweise die für eine Aufgabe verantwortlichen Abteilungen. Die Anzahl der Publikationen belegt die Wichtigkeit dieser Ressource. Aufgrund der Vielzahl von Aufgaben in der Bildgebung, teilweise der Planung sowie der Durchführung der Bestrahlung ist dieses Berufsbild eines der wichtigsten in der Strahlentherapie. Zwei der Publikationen berücksichtigen explizit unterschiedliche Qualifizierungen und damit Verantwortungsbereiche der RTT in Bezug auf Therapieplanung. Miranda et al. betrachteten lediglich die Bestrahlungsbehandlung und modellierten RTT als einzige menschliche Ressource. Daher werden sie im weiteren Verlauf dieses Abschnitts ebenfalls nicht weiter erwähnt.
- **Radioonkologen:** Die verbleibenden acht Publikationen modellierten Onkologen. Dies zeigt die Wichtigkeit dieser Ressource. Onkologen werden in vielen Phasen der Strahlentherapie benötigt wie der Konsultation, der Konturierung des Zielvolumens und der Abnahme der Bestrahlungsplanung. Drei der Publikationen modellieren zusätzlich die Qualifikation der Onkologen und damit die Krebstypen, die der entsprechende Arzt behandeln darf. Diese Ressource muss daher in einem Strahlentherapiemodell Anwendung finden.
- **Medizinphysiker:** Dieser Berufszweig findet in vier der sieben Publikationen expressis verbis Entsprechung. Vieira et al. modellieren Medizinphysiker nicht ausdrücklich, sondern schlagen ihren Planungscheck der Zeit der RTT zu. Joustra et al. modellieren lediglich mit Fokus auf Konsultation und der Anzahl der Beschleuniger aber nicht auf Personal. So wird nur von „9 radiation oncologists, 5 clinical physicians, and 30 technicians“ gesprochen. Da die Aufgabe der physicians nicht weiter erklärt wird, besteht auch die Möglichkeit, dass hier eigentlich Physiker (physicist) gemeint war, ein durchaus üblicher Fehler bei Fremdsprachlern. Aufgrund der Wichtigkeit dieser Ressource und da in Deutschland die Hinzuziehung von Medizinphysik-Experten in der Strahlentherapie gesetzlich verpflichtend ist ( StrlSchG

Paragraph 14, Absatz 2 [59]), wir der Medizinphysiker im Rahmen des in dieser Arbeit zu entwickelnden Modells Entsprechung finden.

- Dosimetristen werden in drei Studien modelliert, jeweils in der Behandlungsplanung. Kapamara et al. modellieren eine Universitätsklinik in England mit Dosimetristen. Proctor et al., die ebenfalls ein englisches Krankenhaus beschreiben, erklären nicht explizit das benötigte Personal. Babashov et al modellieren ein kanadisches Universitätskrankenhaus mit Dosimetristen, Werker et al. hingegen ein kanadisches Krankenhaus ohne Dosimetristen aber mit expliziter Erwähnung der Dosisberechnung. Außerdem beschreiben Hosseini et al. Dosimetristen in einem iranischen Krankenhaus. Dosimetristen brauchen, genau wie RTT, eine Planabnahme durch Medizinphysiker und Onkologen. Eine deutsche Entsprechung in der Strahlentherapie ließ sich bei Nachforschungen nicht finden. Ihre Aufgaben werden in Deutschland von Medizinphysikern durchgeführt.
- Weitere Berufe: Administrationspersonal, Imaging Technicians, Rezeptionisten und Diener werden einzig von Hosseini et al. erwähnt. Hierbei ist unklar, welche Funktion Diener haben und in welcher Hinsicht das Administrationspersonal am Strahlentherapieprozess Beteiligung findet. Bildgebungstechniker werden deswegen extra erwähnt, da im betrachteten Krankenhaus die Bildgebung nicht Teil der Strahlentherapieabteilung ist, sondern in der Radiologie mit radiologischem Personal durchgeführt wird.

**Physikalische Ressourcen:** Die folgenden Maschinen wurden als relevant identifiziert:

- CT Scanner, CT Simulator oder auch Simulator: benutzt für die Bildgebung und Verifikation/Festlegung der Körperlage wird von acht Publikationen explizit aufgeführt. Die Modelle von Famiglietti et al. und Werker et al. beginnen erst nach Vorlage des CT Scans und modellieren diese nicht.
- Linearbeschleuniger: Acht der zehn Publikationen modellieren Linearbeschleuniger. Vieira et al. modelliert lediglich die Terminvergabe der ersten Bestrahlung, die nach eigenen Angaben am Linearbeschleuniger stattfinden soll. Das Modell von Werker et al. beschränkt sich hingegen auf den reinen Planungsprozess, der mit Fertigstellung des Bestrahlungsplans abgeschlossen ist und daher keine Linearbeschleuniger benötigt.
- Räumlichkeiten: werden in insgesamt vier Publikationen angesprochen und beziehen sich auf Warteräume, Kontrollräume, Vorbereitungs- und Untersuchungsräume sowie Räume, in denen die Behandlungsmasken hergestellt werden. Auch wenn diese im Normalbetrieb oft eine untergeordnete Rolle spielen, können sie in Ausnahmesituationen an Bedeutung gewinnen, zum Beispiel im Hinblick auf Abstandsregeln während der Corona-Pandemie.

**Prozessschritte:** Diese muss man im Zusammenhang mit dem Bereich betrachten, indem das Modell definiert ist. So betrachten z.B. Miranda et al. lediglich den Behandlungsprozess und modellieren demnach keine vorgelagerten Planungsschritte. Neun Publikationen beschreiben die Modellierung von einzelnen Prozessschritten.

In vielen Fällen wurde nicht klar beschrieben, welches Personal für welchen der Schritte verantwortlich ist und verhindert eine umfassende Gegenüberstellung von Personal und Prozessschritten. Ebenso wurde überwiegend weder der konkrete Inhalt der Schritte noch deren Reihenfolge eindeutig definiert. Ein generisches Modell muss diese Voraussetzungen jedoch erfüllen, damit es allgemein Anwendung finden und übertragbar sein kann.

Sieben Studien modellieren die Bestrahlungsplanung, die teilweise allgemein als Planung (z.B. Bikker et al.) angegeben ist oder Details wie Konsultierung des Medizinphysikers (Werker et al) oder Dosimetrie (z.B. Babashov et al.) enthält. Die Bestrahlungsbehandlung findet Einzug in acht Modelle. Vieira et al. beschränken sich auf die Terminplanung der ersten Fraktion. In sechs Publikationen wird die Erstkonsultation beim Radioonkologen modelliert. Ebenso wird der CT Scan bzw. die Simulation in sechs Modellen berücksichtigt. Jeweils viermal werden die Tumorkonturierung sowie die Kontrolle und Freigabe der Bestrahlungspläne berücksichtigt. Die zuvor beschriebenen modellierten Prozessschritte pro Publikation und Modellumfang sind zusammenfassend in Tabelle 11 im Anhang A.4 dargestellt.

Zusätzlich wurden die folgenden Schritte modelliert: Wartezeit des Patienten während des Krankenhausbesuchs (2), Maskenherstellung (2), Blockherstellung (1), Check-in (2), Plan in den Beschleuniger übertragen (1), Plan drucken (1).

**Patientenattribute:** Sie bestimmen, wie sich der Patient durch das Modell bewegt. Eins der am häufigsten modellierten Attribute (5/10) ist der klinische Behandlungspfad, d.h. der Ablaufplan der Therapie des Patienten, der u.a. die Reihenfolge der Stationen bestimmt. Dieser hängt in der Regel von vielen Faktoren ab wie Krebsart, Stadium oder Behandlungsziel. Einige Publikationen modellieren diese Faktoren einzeln, so z.B. Dringlichkeit (5/10), Krebstyp (4/10), Fraktionen (4/10), welcher Onkologe dem Patienten zugewiesen ist (2/10), mit welcher Behandlungsform bestrahlt werden soll (2/10) und ob der Patient palliativ oder kurativ behandelt werden soll (2/10).

**Eingabeparameter:** Dies sind Daten, die den Rahmen des Modells bestimmen. Sie zerfallen in unterschiedliche Gruppen und Parameterwerte. Die Parametergruppen ergeben sich logisch aus den zu modellierenden Prozessen und konnten so in den Publikationen gefunden werden. So müssen die menschlichen und physikalischen Ressourcen des zu modellierenden Instituts genauer beschrieben werden. Damit sind insbesondere die Anzahl der jeweiligen Maschinen und des Personals und deren Verfügbarkeit, d.h. Schichtpläne, Öffnungszeiten etc., gemeint. Genauso wichtig ist die Dauer der einzelnen Prozessschritte und deren Variabilität (siehe Werker et al. [56]). Es konnten folgende Anzahl von Kookkurrenzen zwischen Verteilungsfunktionen und Prozessdauern gefunden werden:

- Uniform: 13
- Deterministisch: 10
- Triangulär: 2
- Normal: 2

- Lognormal: 2
- Empirisch: 1
- Beta: 1

Uniforme, deterministische und trianguläre Verteilungen sind üblicherweise darin begründet, dass die Daten aus Interviews oder Umfragen mit Experten stammen (siehe z.B. Babashov et al S.387; Bikker et al. S 116). Dies liegt daran, dass insbesondere die Dauer von Prozessschritten oft nicht intern getrackt werden und somit keine empirischen Daten vorhanden sind. Es konnte kein weiterer Zusammenhang zwischen bestimmten Prozessschritten und ihren Verteilungsfunktionen gefunden werden. Die Kookurrenztable von Verteilungsfunktion und Prozessschritt befindet sich in Tabelle 12 im Anhang A.4.

Auffällig waren die großen Unterschiede in den angegebenen Werten für den gleichen Prozessschritt. So wurden für die Dauer einer Bestrahlung unter anderem 16 Minuten [48] , uniform(10, 13) Minuten [50], uniform(15,20) Minuten [52], 10, 20 oder 30 Minuten [51], 5\*12BETA(1.02, 2.69) Minuten [53] angegeben. Oftmals wurde nicht konkret spezifiziert, was dieser Prozessschritt umfasst.

Eine genaue Definition der Prozesse ist für die Bestimmung ihrer Dauern für Patient und Personal essenziell. Dementsprechend ist eine Übertragung der Parameterwerte der vorliegenden Publikationen auf das in dieser Arbeit vorgestellte Simulationsmodell nicht ohne weiteres möglich und die Daten werden stattdessen von ausgewählten Experten erfragt (siehe Abschnitt 4.3).

Die große Variable ist der Patient. Diesen gibt es von unterschiedlichem Typus, der verschiedene Behandlungen und Prozessschritte benötigt und unterschiedlich lange für diese brauchen wird. Dieser Variabilität wird durch Verteilungsfunktionen Ausdruck verliehen. Insbesondere konnten Verteilungsfunktionen für Patientenankunft, Dauer zwischen zwei Ankünften und Patientenattribute identifiziert werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Kookurrenz zwischen Verteilungen und Verteilungsfunktionen. Gr steht für Groundedness (Anzahl der Kodierungen mit diesem Kode).

Distribution-Function \ Distribution	Patient Arrivals Gr=17	Interarrival times Gr=5	Patient Attributes Gr=10
Distribution_Empirical Gr=10	0	0	6
Distribution_Exponential Gr=7	0	3	0
Distribution_Normal Gr=5	0	1	0
Distribution_Poisson Gr=5	5	0	0
Distribution_Uniform Gr=15	1	0	0

Überwiegend werden die Patientenankunftsrate Poisson-verteilt dargestellt, was die Unabhängigkeit der Ereignisse darstellt. Die Ankunft des n-ten Patienten hängt nicht von der Ankunft eines der vorherigen Patienten ab. Dazu passend werden auch die Zwischenräume zwischen den Ankünften überwiegend exponentialverteilt modelliert was ebenso für den Abstand zweier aufeinanderfolgender Ereignisse eines

Poissonprozesses gilt. Die Verteilung der Patient Attributes ergibt sich aus den Wissenschaftlern vorliegenden historischen Daten und wird durch empirische Verteilungsfunktionen beschrieben.

**Leistungskennzahlen:** Das Modell wird erstellt, um Szenarien zu simulieren und deren Auswirkungen zu untersuchen. Eine der wichtigsten Kennzahlen ist die Zeit. Im Folgenden werden die einzelnen verwendeten Kennzahlen definiert (Tabelle 3, Tabelle 4). Verschiedene Autoren benutzen unterschiedliche Benennungen. Gleiche Kennzahlen wurden mit dem Namen, der am häufigsten für diese vorkam, kodiert, sofern aus der Definition klar deren Identität hervorging.

Tabelle 3: Definition der Leistungskennzahlen der Kategorie Zeit, die den zeitlichen Zugang zur Strahlentherapie beschreiben oder beeinflussen.

Leistungskennzahl	Beschreibung
Access Time	Zeit von Überweisung bis zur ersten Fraktion
% Access Time within target date	Prozentsatz der Patienten, deren Access Time innerhalb vorgegebener Grenzen lag
RTTT (Ready-to-treat to treatment)	Vom Zeitpunkt an dem der Patient bereit ist für die Strahlentherapie (z.B. Operation oder Chemotherapie abgeschlossen) bis zur ersten Fraktion
% RTTT within target date	Prozentsatz der Patienten, deren RTTT innerhalb vorgegebener Grenzen lag
Waiting Time	Nicht klar definiert. Vieira et al. beschreiben dies einmal als Access Time und einmal als Zeitspanne von Konsultation bis zur ersten Bestrahlung
% Patients breaching waiting time target	Prozentsatz der Patienten, die die Wartezeitvorgabe nicht einhalten
Time to Consultation	Zeit von Überweisung bis zur Konsultation
Average Planning Time	Durchschnittszeit einen Behandlungsplan zu erstellen

Tabelle 4: Definition der Leistungskennzahlen der Kategorie Zeit, die im Zusammenhang mit Patientenbesuchen in der Klinik auftreten.

Leistungskennzahl	Beschreibung
Time per stage	Zeit, um einen Behandlungsschritt durchzuführen
Process Delay	Zeit, um die sich ein Prozessstart vom geplanten Startzeitpunkt unterscheidet
Patient Waiting Time	Zeit, die ein Patient in der Klinik auf den Beginn des Termins wartet
Total Waiting Time	Zeit, die der Patient von Betreten bis zum Verlassen der Klinik mit Warten verbringt.
Length of Stay	Zeit, die der Patient vom Betreten bis zum Verlassen der Klinik benötigt
Exit Time Last Patient	Zeit am Tag, zu der der letzte Patient die Klinik verlässt

Der Zusammenhang zwischen den Kennzahlen sowie deren Häufigkeit der Kodierung kann den Codebäumen in Bild 4 und Bild 5 entnommen werden. G steht für Groundedness, d.h. die Häufigkeit der Kodierung und kann als Maß für die Wichtigkeit dieses Codes gewertet werden. Die Dichte D beschreibt wie viele Verbindungen es zu anderen Codes gibt.

Es gab vier weitere Leistungskennzahlen, die nicht zeitlicher Natur sind:

- Auslastung (G=14): Prozentsatz zu dem Personal oder Maschinen eingesetzt werden
- Personalkosten (G=5)
- Patientendurchsatz (G=4): Anzahl der Patienten, die an einem Tag behandelt werden können
- Prozentsatz der Umbuchung der ersten Fraktion (G=2): wie viele der Ersttermine auf einen anderen Termin verschoben werden müssen

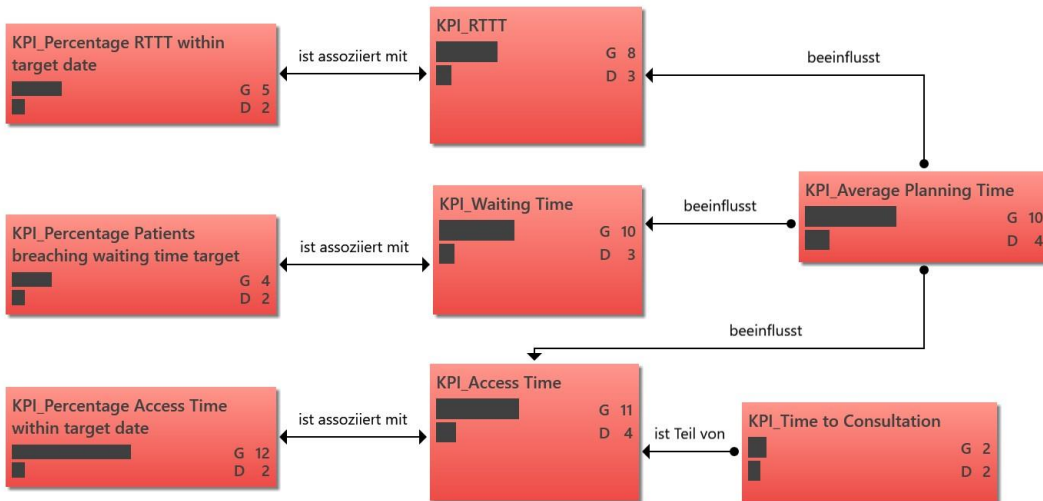


Bild 4: Kodebaum der Leistungskennzahlen der Kategorie Zeit, die den zeitlichen Zugang zur Strahlentherapie beschreiben oder beeinflussen.

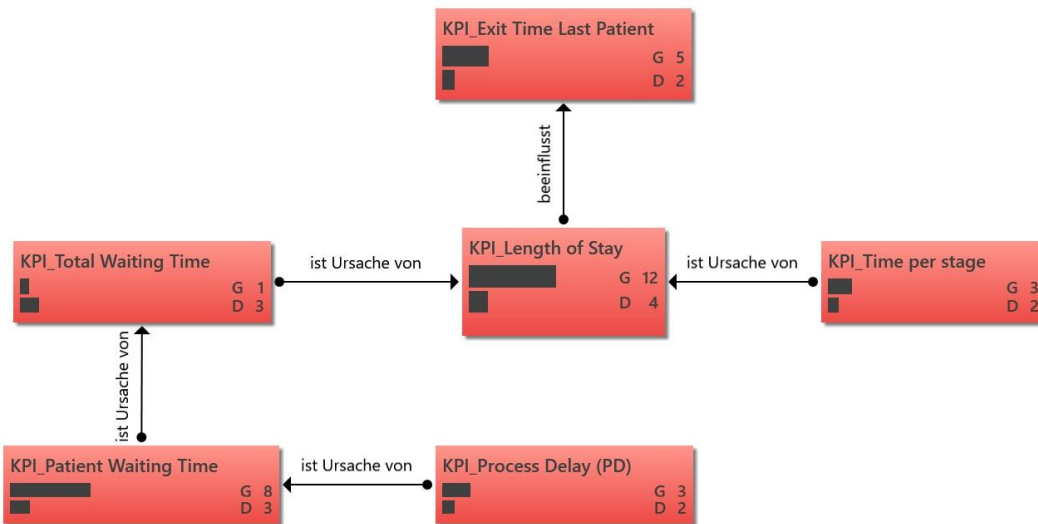


Bild 5: Kodebaum der Leistungskennzahlen der Kategorie Zeit, die im Zusammenhang mit Patientenbesuchen in der Klinik auftreten.

### 3.3.2.3 Was-wäre-wenn Szenarien

Simulationsmodelle werden entwickelt, um Szenarien zu testen und deren Auswirkungen auf die gewählten Leistungskennzahlen des modellierten Systems zu untersuchen. Hiermit können sensitive Parameter bestimmt werden, d.h. Parameter, bei denen kleine Änderungen große Auswirkungen haben.

Die vorliegenden Publikationen haben Was-wäre-wenn-Szenarien aus den drei Kategorien Ressourcen, Terminplanung und Patientenankunftsrate untersucht. Bild 6 zeigt die Szenarien bezüglich Patientenankunftsrate. Die Codebäume der Kategorien Ressourcen und Terminplanung können dem Anhang A.5 entnommen werden. G steht für Groundedness und gibt an, wie häufig dieser Code verwendet wurde. Dies kann als Maß für die Bedeutung des Codes angesehen werden. D (density) beschreibt, wie viele Verbindungen es zu anderen Codes gibt.

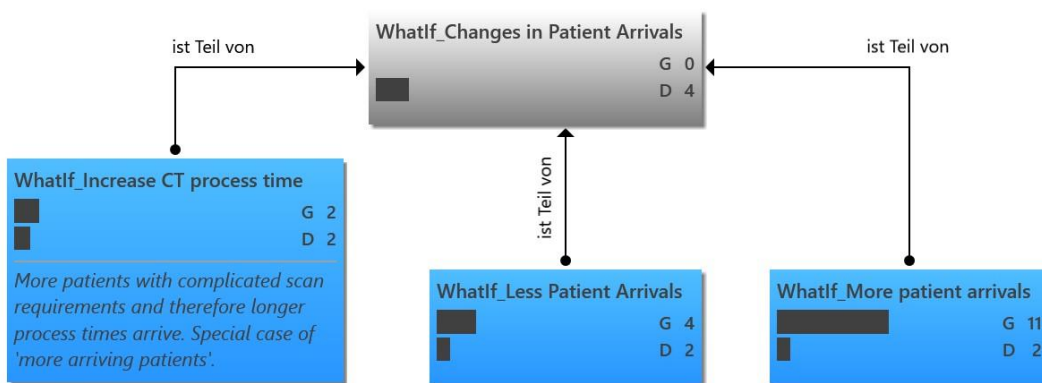


Bild 6: Was-wäre-wenn Szenarien der Kategorie Patientenankunftsrate.

So sieht man, dass erhöhte Patientenankunftsrate 11 mal kodiert wurden, geringere Ankunftsrate 4 mal und ein erhöhtes Aufkommen bestimmter Patiententypen 2 mal. Dies lässt sich mit dem Interesse der Kliniken, wie ihre Abteilung bezüglich der in der Zukunft erwarteten zunehmenden Patientenzahlen aufgestellt ist, erklären.

Mit 64 verwendeten Kodierungen stammt der größte Anteil der simulierten Szenarien aus der Kategorie Ressourcen. Hier wurden insbesondere Änderung in den Personalzahlen der verschiedenen Berufsgruppen (29 Kodierungen) und deren Qualifikationen (6 Kodierungen) und Produktivität (8 Kodierungen) betrachtet. Änderungen in der Anzahl an Maschinen wurde 17 mal kodiert. Eine Veränderung in der Verfügbarkeit von Personal bzw. Maschinen, z.B. durch Verlängerung der Öffnungszeiten der Klinik, wurde 14 mal kodiert. So sind Kliniken daran interessiert, ob sie genügend Personal eingestellt haben und dieses auch die optimale Qualifikation besitzt. Auch ist die Auslastung der menschlichen und physikalischen Größen eine wichtige Information, sowohl zur potentiellen Verbesserung der bestehenden Situation als auch im Hinblick auf zukünftige Veränderungen wie zum Beispiel einem Anstieg in den Patientenzahlen.

Einunddreißig Kodierungen entfallen auf die Kategorie der Terminplanung. Mit einer Groundedness von 12 wurde am Häufigsten die Terminplanung der



Radioonkologen untersucht, gefolgt von Änderungen in der Planungszeiteinheit, z.B. ob eine Planungseinheit mehrfach vergeben werden darf, mit einer Häufigkeit von 10 sowie Änderungen im Terminplanungskonzept mit 9 Kodierungen. Es konnte wiederholt gezeigt werden, dass eine Änderung in der Planung oft größeren Effekt zeigt als eine Änderung in der Belegschaft oder dem Maschinenpark ([48, 55, 56]).

Zudem wurden untersucht, welche Leistungskennzahlen zur Beurteilung der einzelnen Szenarien verwendet wurden. Hierzu wurden jeweils die Leistungskennzahlen ‚RTTT‘ mit ‚% RTTT within target date‘, ‚Access Time‘ mit ‚% Access Time within target date‘ sowie ‚Waiting Time‘ mit ‚% Patients breaching waiting time target‘ zusammengefasst. RTTT wurde am häufigsten als Maß für die Leistung des Systems betrachtet. Mit dieser Kennzahl untersuchten die Wissenschaftler am häufigsten die Verfügbarkeit der Dosimetristen und Physiker, was die große Bedeutung der Bestrahlungsplanung für die Wartezeit bis zur ersten Fraktion widerspiegelt. Auch die Betrachtung der Radiation Therapy Technologists, die bisweilen die Bestrahlungsplanung aktiv durchführen, unterstützt diesen Punkt, ebenso die Onkologen, die nicht nur in der Indikation tätig sind, sondern auch maßgeblich die Konturierung der Zielvolumina durchführen und die Bestrahlungsplanung abzeichnen müssen. Die Verfügbarkeit der Linearbeschleuniger sowie der CT/Simulatoren werden auch oftmals im Zusammenhang mit RTTT untersucht, um herauszufinden, ob ein möglicher Engpass im Gerätepark liegt. Ein weiteres Szenario ist die Untersuchung der Patientenankunftsrate. Hier wird insbesondere geschaut, welchen Einfluss gesteigerte Patientenzahlen, die in Zukunft erwartet werden, auf das vorliegende System haben und mit welchen Maßnahmen gegengesteuert werden kann. Tabelle 5 stellt die Leistungskennzahl RTTT komprimiert mit den durch sie am häufigsten untersuchten Szenarien dar. Eine vollständige Liste der Szenarien in Abhängigkeit von den häufigsten Leistungskennzahlen findet sich in Tabelle 13 in A.5

Tabelle 5: Zusammenhang der meistgenutzten Leistungskennzahl (Key Performance Indicator) RTTT mit den in deren Zusammenhang meist untersuchten Szenarien (What If).

What If Scenario	Key Performance Indicator RTTT
Changes # dosimetrists	9
Changes # physicists	8
Changes # or availability CT/simulators	8
Changes # or availability LINAC	8
Changes # Radiation Therapy Technologist	4
Changes # or availability oncologists	4
More patient arrivals	4

### 3.3.2.4 Datenquellen

Um mit einem Modell der Strahlentherapieprozesse Abläufe simulieren zu können, benötigt es Daten, die das echte System beschreiben. Diese reichen von der Anzahl des Personals bis hin zu der prozentualen Verteilung der einzelnen Behandlungspfade für unterschiedliche Diagnosen (siehe Eingabeparameter, Abschnitt 3.3.2.2).

Eine Vielzahl an Daten stammt aus historischen Daten. Diese werden oftmals aus Tracking Software der Abteilungen, internen Datenbanken, Maschinenverzeichnissen oder der elektronischen Patientenakte gewonnen. Acht der zehn betrachteten Publikationen beschreiben diese als eine ihrer Datenquellen.

Nicht alle benötigten Daten werden im täglichen Betrieb explizit aufgenommen und gespeichert und können daher nicht auf diese Weise erhalten werden. So nimmt zum Beispiel nicht jede Abteilung die Wartezeiten der Patienten im Wartezimmer auf oder eine benutzte Software speichert möglicherweise zwar, wie lange ein Programm zur Bestrahlungsplanung geöffnet ist aber nicht, wie lange wirklich daran gearbeitet wurde. Diese Art der Daten wurden auf zwei Wegen erfasst. Zum einen führten die Wissenschaftler von acht Publikationen Interviews oder Umfragen mit Experten durch, um Abschätzungen für einzelne Parameterwerte zu erhalten. Sechs der Publikationen gaben an, eigene Beobachtungsstudien durchgeführt zu haben. Wenn auch die eigenen Beobachtungen genauere Zeitverteilungen liefern, da Zeiten für bestimmte Abläufe mehrfach explizit gestoppt werden, so gibt die Einschätzung von Experten ebenso wichtige Einblicke und kann Informationen liefern, die über den Beobachtungszeitraum einer Studie hinausgehen.

Eine weitere, nicht beschriebene Datenquelle kann der Patient sein. Inwieweit dessen Einschätzungen zuverlässig sein würden, ist nicht bekannt. Da Patienten oft emotional belastet, krank und alt sind und Wartezeit oft weit länger wahrgenommen wird, als sie ist [60], könnten die Aussagen stark subjektiv sein. Aufschluss hierüber würde ein Vergleich von Patientenbefragung und paralleler Beobachtung liefern.

## 4 Ereignisdiskrete Simulation einer Strahltherapieeinrichtung

Die Abläufe in der Strahltherapie sind durch eine Abfolge wohldefinierter Schritte gekennzeichnet. Daher ist die Methode der ereignisdiskreten Simulation gut für die Untersuchung dieser Prozesse geeignet. Im Folgenden wird die Planung, Modellierung und Durchführung einer ereignisdiskreten Simulation einer Strahltherapiepraxis mit zwei Linearbeschleunigern und einem CT-Gerät beschrieben. Hierbei werden Prozesse an und mit dem Patienten im Betrachtungszeitraum eines Tages modelliert und anschließend untersucht. Die durchgeführten Experimente, die unter anderem den Einfluss von Coronamaßnahmen auf den Praxisbetrieb betreffen, werden besprochen und die Ergebnisse diskutiert. Im Anschluss werden die Limitationen des Modells dargestellt.

### 4.1 Problembestimmung und Zielsetzung

Aufgrund der großen Nachfrage in der Strahltherapie ist ein auf Durchsatz optimiertes System bei gleichzeitiger Garantie von Qualität und Sicherheit unerlässlich. Abweichungen vom Betriebsauflauf müssen daher gut geprüft sein. Mit der Coronapandemie wurden kurzfristige Änderung im Betrieb der Strahltherapiepraxen zum Schutz von Patienten und Personal nötig. Wie sich die Änderungen auf Patientendurchsatz oder Wartezeiten auswirken, ist oft schwer abzuschätzen. Mithilfe eines Computermodells können diese Änderungen simuliert und ihre Auswirkungen auf den Praxisbetrieb quantifiziert werden. Als Leistungskennzahlen werden die Anzahl der täglich behandelten Patienten sowie die Wartezeiten der Patienten betrachtet.

### 4.2 Modellanforderungen

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche (Abschnitt 3.3.2) und auf Gesprächen mit zwei Experten für Simulation und Strahltherapieprozesse wurden Modellanforderungen entwickelt, die im Folgenden vorgestellt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Strahltherapiepraxis ohne externe Abhängigkeiten zu Co-Behandlern oder Krankenhausabteilungen modelliert. Als technische Ressourcen werden ein CT-Gerät und zwei Linearbeschleuniger (LINAC) angenommen, deren Anzahl für zukünftige Simulationen erweiterbar sein soll. Zur internationalen Nutzbarkeit wird als Modellsprache Englisch gewählt und die Berufsgruppen werden länderunabhängig modelliert. Hierbei müssen die personellen Ressourcen Facharzt für Strahltherapie (Radiooncologist), Medizinphysiker (MPE)/Dosimetrist, RTT und Administrator (im Deutschen MFA) vertreten sein.

Das Modell konzentriert sich auf die Prozessschritte, die an einem Tag durchgeführt werden. Explizit müssen Anmeldung (Check-In), Konsultation (consultation), Planungs-CT (CT), Erstbestrahlung/ Ersteinstellung (first fraction), Folgebstrahlung

(fraction), Abschlussuntersuchung (final exam) und Nachsorge (after care) modelliert werden. Darüber hinaus soll das Modell eine Erweiterung um Prozessschritte wie z.B. Therapieplanung und Qualitätssicherung ermöglichen. Die Laufwege von Personal und Patienten müssen inkorporiert werden. Patientenattribute wie Geschlecht, Alter, Therapieplan und -ziel können für eine spätere Erweiterung implementiert werden. Eine Visualisierung der Simulation, in 3D, soll inkludiert werden. Realistische Verteilungsfunktionen und Parameterwerte müssen angewendet und das Modell mit Nutzern validiert werden.

### 4.3 Datenerhebung und -auswertung

Zur Sammlung von Eingabedaten wurden Medizinphysiker an sieben ausgewählten deutschen Strahltherapieeinrichtungen angeschrieben und mittels eines strukturierten Fragebogens befragt. Der Fragebogen wurde zusammen mit einem leitenden Medizinphysiker einer renommierten deutschen Universitätsklinik evaluiert und optimiert. Anschreiben und Fragebogen befinden sich in Anhang A.6.

Mittels des Fragebogens sollten insbesondere die Zeiten der einzelnen Prozessschritte, die Anzahl der einzelnen Mitarbeiter sowie die Verteilung der einzelnen Behandlungsformen abgefragt werden, die als Eingabeparameter für das Modell benötigt werden. Es wurden nur wenige Fragebögen zurückgesandt, davon nur einer vollständig ausgefüllt. Ein Grund hierfür liegt in der Sensibilität der Daten. In Gesprächen wurde mehrfach vermittelt, dass Klinik- und Praxisbetreiber diese Art von Daten Externen nicht zur Verfügung stellen. Zudem liegen einige der Datenpunkte nicht automatisch vor und sind daher schwer zu erfassen.

Um dennoch vollständige und sinnvolle Eingabedaten zu erhalten, wurden die Daten um die Ausführungen einer leitenden MTRA einer privaten Strahltherapiepraxis ergänzt. Zusammen mit den Erkenntnissen der strukturierten Inhaltsanalyse konnten Verteilungen und Parameterwerte erarbeitet werden. Hierbei wurden Datenverteilungen, die als Bereiche angegeben wurden, im Allgemeinen als gleichverteilt angenommen. Wurde z.B. die Dauer des Erstgesprächs als 20-60 Minuten angegeben, werden die jeweiligen Termine gleichverteilt mit einer Dauer zwischen 20 und 60 Minuten modelliert. Dreiecksverteilungen wurden überall dort angenommen, wo ein signifikanter Wert angegeben wurde, der eine gewisse Variabilität besitzt. So wurde die Dauer einer Bestrahlung mit im Schnitt 7 Minuten angegeben, aber eingeräumt, dass manche Bestrahlungen nur 3 oder auch bis zu 10 Minuten in Anspruch nehmen. Bei fest angegebenen Werten, bei denen keine genauere Information vorlag, wurden nach Rücksprache mit einem Simulationsexperten ebenso Dreiecksverteilungen mit jeweils eine Minute Variabilität nach rechts und links implementiert. Eine detaillierte Beschreibung der Eingabedaten befindet sich nebst abgeleiteten Verteilungen in Abschnitt 4.4 sowie Tabelle 6.

Für die 3D-Visualisierung der Abläufe und die Inkorporation von Laufwegen im Modell wurde mit einem Medizinphysiker einer privaten Strahltherapieeinrichtung Anforderungen an einen Grundriss einer Strahltherapiepraxis diskutiert und

gemäß den erarbeiteten Anforderungen ein allgemeiner Grundriss für eine Praxis entwickelt (Anhang A.7). Dieser wurde anschließend im Modell implementiert.

#### 4.4 Konzeptualisierung und Modellumsetzung

Bei Abweichungen der Berufsbezeichnungen von den in Deutschland verwendeten, werden aus Gründen der Lesbarkeit ihre Akronyme oder eingedeutschten Namen verwendet. So werden Administrators als Administratoren und die Radiation Therapy Technologists als RTT bezeichnet. Zudem ist im Folgenden die Bezeichnung Onkologe stets als Facharzt für Strahlentherapie zu verstehen.

Das Modell wurde schrittweise in der Software AnyLogic Version 8.7.5 [61] entwickelt und in der Komplexität schrittweise erhöht. Einzelne Erweiterungen wurden mit einem Experten für AnyLogic Simulationen im Gesundheitswesen diskutiert und verifiziert.

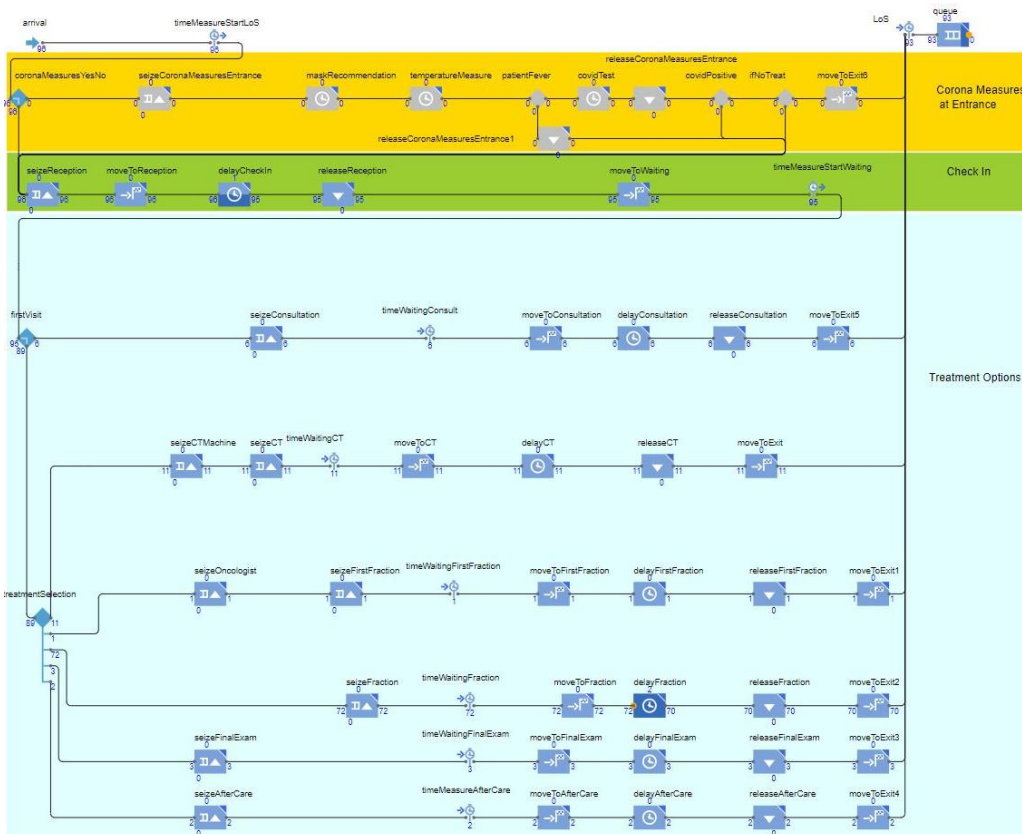


Bild 7: Modellgrafik in AnyLogic. Das Schaubild ist in vergrößerter Darstellung im Anhang A.8 zu finden.

#### Öffnungszeiten

Die Öffnungszeit der Praxis beträgt 10 Stunden. Es werden 30 Minuten Karenzzeit angenommen, in der Patienten, die vor Schließung der Klinik noch angenommen wurden, ihre Behandlung beenden dürfen. Diese Zeitspanne wird als akzeptable Überzeit betrachtet, in der bereits begonnene Behandlungen noch beendet werden. Eine Verlängerung des Praxisbetriebs über diese Zeit hinaus ist nicht erlaubt. Patienten, die die Praxis bis dahin nicht verlassen haben, gelten als nicht behandelt.

### Menschliche Ressourcen: Personal

Es werden Vollzeitäquivalente angenommen, die während der Öffnungszeit plus Karenz und ohne Pause arbeiten. Somit stehen zu jedem Zeitpunkt die gleiche Anzahl an Mitarbeitern zur Verfügung. Dies kann durch Schicht- und Pausenplanung gewährleistet werden. Die in den erhobenen Daten angegebenen Anzahlen an Mitarbeitern wurden in Vollzeitäquivalente umgerechnet. Somit ergibt sich für den Normalbetrieb folgende Personaldecke: 1,5 Onkologen, 6 RTT, 2 Administratoren sowie 0,1 MPE. Aus modellierungstechnischen Gründen werden die Onkologen und der MPE auf Vollzeitäquivalente aufgerundet. Die geringere Arbeitszeit findet sich in Leerläufen zwischen den Terminen sowie vor und nach der letzten Behandlung wieder. Im realen System wird diese im Modell ungenutzte Zeit für andere Aufgaben wie z.B. die Therapieplanung oder Qualitätssicherung genutzt.

### Physikalische Ressourcen

Es werden zwei Linearbeschleuniger und ein CT-Gerät modelliert. Zudem werden explizit eine Anmeldung mit zwei Plätzen, ein Wartezimmer, jeweils ein Steuer- raum pro Linearbeschleuniger und CT-Gerät, zwei Arztzimmer und ein Physiker- büro implementiert.

### Prozessschritte

Die folgenden Prozessschritte wurden in dieser Arbeit modelliert. Die zugehörigen Eingabedaten für die Prozessdauern wurden aus den erhobenen Daten approximiert und sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Approximierte Verteilungen der Prozessdauern

Prozessschritt	Dauer [min]
Check-In erster Besuch	Check-In erster Besuch
Check-In Folgebesuch	triangular(2,3,5)
Consultation	uniform(20,60)
Final Exam	uniform(9,11)
After Care	uniform(9,11)
First Fraction	uniform(14,16)
Fraction	triangular(3,7,10)
CT	uniform(10,20)

- **Check-In (Anmeldung):** Die Rezeption ist durchgängig mit zwei Administratoren besetzt, die sich um Patientenaufnahme und Terminvergabe kümmern. Erscheint der Patient zur Erstvorstellung (consultation), so dauert die Aufnahme länger, da noch Daten für die Patientenakte aufgenommen werden. Bei Folgeterminen ist der Check-In kürzer. Diesem Umstand wird mittels zweier Dreiecksverteilungen Rechnung getragen. Nach erfolgreicher Aufnahme verbleibt der Patient bis zu seiner Behandlung im Wartezimmer.
- **Consultation (Konsultation):** Das Erstgespräch wird durch einen Facharzt für Strahlentherapie durchgeführt. Je nach Bedarf kann der Termin 20 bis 60 Minuten dauern und wird durch eine uniforme Verteilung modelliert.

- Final Exam, After Care: Auch die Abschlussuntersuchung und die Nachsorge werden vom Arzt durchgeführt. Im Modell werden sie als eigene Zweige dargestellt, da es sich um unterschiedliche Untersuchungen handelt. Die Dauer von 10 Minuten wird mithilfe einer Gleichverteilung veranschlagt, um die natürliche Variabilität zu berücksichtigen.
- First Fraction: Die Erstbestrahlung inklusive der Ersteinstellung wird am Beschleuniger durch einen Onkologen, zwei RTT und einen MPE vorgenommen. Die Herausforderung liegt darin, zum einem alle Ressourcen bereitzustellen, zum anderen aber bei Warten auf deren Verfügbarkeit, keine Ressourcen zu blockieren. Da Termine beim Onkologen potentiell am längsten dauern und man daher auf ihn am längsten wartet, werden erst bei Verfügbarkeit des Onkologen die restlichen Ressourcen bevorzugt allokiert. Eine Ersteinstellung dauert laut Datenerhebung im Mittel 15 Minuten und wird durch eine Gleichverteilung modelliert.
- Fraction: Folgebestrahlungen werden am LINAC mit jeweils zwei RTT durchgeführt. Je nach Alter und Beweglichkeit sowie Erkrankung, Therapieziel und der Notwendigkeit spezieller Lagerungshilfen dauert die Bestrahlung unterschiedlich lang. Eine Einheit wird basierend auf den erhobenen Daten als zwischen 3 und 10 Minuten, mit meist 7 Minuten Dauer angenommen und durch eine Dreiecksverteilung dargestellt.
- CT: Planungs-CTs werden von zwei RTT am CT-Gerät durchgeführt. Auch hier können spezielle Lagerungshilfen benötigt werden. Zudem bestimmen die Beweglichkeit des Patienten sowie das Untersuchungsziel die Dauer dieses Termins. Ein Planungs-CT wurde mit einer Dauer von 10 bis 20 Minuten angegeben und wird durch eine Gleichverteilung modelliert.

### Patientenattribute

AnyLogic bezeichnet Entitäten als Agenten. Der Patient wird als Agent modelliert und wird mit Attributen versehen, die seinen Lauf durch das Modell bestimmen:

- ID: Jeder Patient erhält eine eindeutige Identifikationsnummer.
- Alter: Die Altersverteilung wurde dem Global Cancer Observatory der WHO [62] entnommen. Hierfür wurden die Daten der Krebspatienten in Deutschland im Jahr 2020 in 10-Jahresintervallen abgefragt. Die Altersgruppen 0-9, 10-19 sowie 20-29 waren mit jeweils weit unter 1% vertreten und wurden daher nicht in die weitere Betrachtung einbezogen. Für die restlichen Altersgruppen ergab sich folgende Verteilung, nach der dem Patienten sein Alter zugewiesen wird:

Alter	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	>80
Anteil %	2,0	4,6	14,4	24,0	27,5	27,5

- Gehgeschwindigkeit: Zur Modellierung der Laufzeiten der Patienten wurden in Abhängigkeit vom Alter Gehgeschwindigkeiten angenommen:

Alter	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	>89
Gehgeschwindigkeit [m/s]	1,4	1,4	1,4	1,35	1,2	0,9	0,7

Die Basiswerte wurden [63] entnommen, und über die Geschlechter sowie bezüglich der Altersintervalle gemittelt. Basierend auf dem Alter des Patienten wird ihm seine Gehgeschwindigkeit zugewiesen.

- Corona: Gibt an, ob der Patient an COVID-19 erkrankt ist. Dieser Wert wird wahrscheinlichkeitsverteilt auf Basis der Inzidenz, d.h. Erkrankungen pro 100.000 Einwohner gewonnen.
- Behandlungsart: Gibt an für welche Behandlung der Patient an diesem Tag in die Praxis kommt. Diese bestimmt die Prozessschritte, die der Patient durchläuft. Zur Auswahl stehen Konsultation, Planungs-CT, Ersteinstellung, Folgebestrahlung, Abschlussuntersuchung und Nachsorge.

### **Patientenanzahl**

Die Anzahl der Patienten pro Behandlungspfad wurde aus den erhobenen Daten gewonnen. Für die CT- und Folgebestrahlungstermine werden die diskreten Gleichverteilungen  $\text{uniform\_discr}(5,15)$  bzw.  $\text{uniform\_discr}(115,125)$  angenommen. Alle anderen Behandlungsarten werden zunächst zusammengefasst. Diese sind solche Termine, bei denen ein Onkologe beteiligt ist. Für dieses Konglomerat wird der Patientenanzahl die diskrete Gleichverteilung  $\text{uniform\_discr}(15,17)$  zugrunde gelegt. Jedem Patienten in dieser Kategorie wird wahrscheinlichkeitsverteilt seine Behandlungsart zugewiesen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung konnte aus den Daten zu den Faktoren 0,156 für Ersteinstellungen, 0,563 für Konsultationen, 0,156 für Abschlussuntersuchungen und 0,125 für die Nachsorge interpoliert werden

### **Patientenankunft**

Die Strahltherapiepraxis basiert auf der Vergabe von Terminen. Daher ist die Ankunft von Patienten nicht unabhängig von denen der anderen. Jedoch gibt es Variabilität in den Ankunftszeiten. Patienten können zu früh oder zu spät zu ihrem Termin erscheinen. Dies wird über Dreiecksverteilungen modelliert.

Die Terminplanung erfolgt unter folgenden Annahmen:

- Termine zur Folgebestrahlung (fraction) werden laut MTRA einer privaten Strahltherapiepraxis pro Beschleuniger im 10 Minutentakt vergeben. Durch die Verfügbarkeit zweier LINAC mit zugehörigem Personal lässt sich das durch Termine im 5 Minutentakt modellieren. Die zugrunde gelegte Dreiecksverteilung erlaubt Ankünfte zwischen 4 und 6 Minuten mit einer Häufung bei 5 Minuten.
- Termine zum CT werden alle 30 Minuten geplant. Das erlaubt dem Personal, die Bildgebung vor- und nachzubereiten. Der jeweilige Patient kann bis zu 5 Minuten früher oder später erscheinen, ausgedrückt durch die Dreiecksverteilung  $\text{triangular}(25,30,35)$  Minuten.
- Termine, die mit einem Onkologen stattfinden, namentlich Konsultation, Erstbestrahlung, Abschlussuntersuchung und Nachsorge, werden in 60 Minuten Abständen vergeben, resultierend in einem Patienten alle 30 Minuten für die zwei Ärzte. Dies ist begründet in der potenziellen Dauer von 60 Mi-



nuten für ein Konsultationsgespräch. Da die Onkologen vielfältige Aufgaben außerhalb der Termine am und mit dem Patienten ausüben, können die entstehenden Leerläufe dadurch gefüllt werden. Einer Verfrühung oder Verspätung des Patienten wird durch die Dreiecksverteilung  $\text{triangular}(25,30,35)$  Minuten Rechnung getragen. Aus modellierungstechnischen Gründen findet der erste Termin 30 Minuten nach Praxisbeginn statt.

### **Modellogik**

Zu Simulationsbeginn werden Patienten entsprechend der Verteilungen erzeugt und mit Attributen versehen. Falls genügend Ressourcen für den jeweiligen Behandlungsschritt verfügbar sind, werden die entsprechenden Patienten zu ihren Terminen in die Praxis geschickt, andernfalls nach Hause. Sollte an dem Tag z.B. kein Onkologe verfügbar sein, werden alle Termine, die diese Berufsgruppe benötigen, abgesagt und der Patient verlässt das Modell.

Nach Betreten der Praxis durchlaufen die Patienten den Check-In. Sind beide Administratoren beschäftigt, müssen sie anstehen und warten. Nach der Anmeldung wartet der Patient im Wartezimmer auf seine Behandlung. Sobald er an der Reihe ist, geht er in das jeweilige Behandlungszimmer und nimmt seinen Termin wahr. Ist die Behandlung abgeschlossen, verlässt der Patient die Praxis und die Ressourcen werden für die nächste Anfrage freigegeben.

### **Corona**

Zusätzlich zum beschriebenen Basisszenario erlaubt das vorliegende Modell die Simulation von Coronamaßnahmen am Praxiseingang. Bei Auswahl dieser Option wird der Patient vor Betreten der Praxis durch einen Administrator auf das korrekte Tragen eines Mund-Nasen-Schutzes hingewiesen. Bei Fehlen eines solchen wird ein Mund-Nase-Schutz ausgehändigt. Zudem misst der Administrator die Körpertemperatur aller Patienten. Liegt eine erhöhte Temperatur vor, so wird ein Corona-Schnelltest durchgeführt. In Anlehnung an die untersuchte Inzidenz von 1000 wurde die gleiche Rate von Patienten mit erhöhter Temperatur angenommen. Für die Masken- und Temperaturmaßnahmen wird jeweils 1 Minute veranschlagt. Der Coronatest benötigt 15 Minuten.

Im Falle einer COVID-Erkrankung wird der Patient dennoch behandelt. Hierbei wird nicht zwischen Patienten unterschieden, die am Eingang positiv getestet wurden und solchen, deren COVID-Erkrankung schon vorher bekannt war. Für Schutzmaßnahmen wie Vollschutzausrüstung für das Personal sowie Desinfektions- und Lüftungsmaßnahmen nach der Behandlung werden für jede Behandlung eines Corona-Patienten zusätzliche 30 Minuten veranschlagt.

### **Modellbausteine**

Seize: Ein seize-Block kann eine einzelne oder mehrere Ressourcen gleichzeitig anfragen. Je nach Priorität der Anfrage wird diese in die Liste der schon vorhandenen Gesuche der entsprechenden Ressourcen eingereiht. Anfragen müssen der Reihe nach abgearbeitet werden und müssen daher bei allen benötigten Ressourcen

an erster Stelle stehen, um diese gemeinsam zu allokkieren und den gewünschten Schritt durchführen zu können. Sollte eine Ressource nicht verfügbar sein, müssen alle anderen warten und können derweil keine anderen Aufgaben ausführen.

Release: Ein Release-Block gibt Ressourcen wieder frei. Folgt einem Seize kein Release, so sind die allokierten Ressourcen bis zum Ende der Simulation blockiert.

Delay: Der Delay-Block repräsentiert die eigentliche Behandlung. Hier wird spezifiziert, wie lange der Termin für Patient und Ressourcen dauert. Auch wenn die Dauer durch eine Verteilung gegeben ist, so steht bei Betreten dieses Blocks fest, wie lange der Prozess für den jeweiligen Patienten dauern wird.

Queue: Im Gegensatz zum Delay ist die Verweildauer in der Queue immer von unbestimmter Dauer. Sie hält so lange an, bis der nächste Prozessschritt freigegeben wird. Patienten, die sich hier aufhalten, warten.

Select Output: In diesem Modul werden Patienten aufgrund ihrer Attribute oder einer Wahrscheinlichkeitsverteilung in verschiedene Prozesspfade geleitet.

### **Leistungskennzahlen und Ausgabewerte**

Zur Analyse der Simulationsläufe werden relevante Parameterwerte und deren Verläufe auf dem Computerbildschirm dargestellt und in Dateien ausgelesen. Von besonderem Interesse ist die Messung der Leistungskennzahlen.

- **Behandelte Patienten:** Die Anzahl der behandelten Patienten an einem Tag wird nach Ablauf der Öffnungs- und Karenzzeit gemessen. Als behandelter Patient gilt jeder, der bis zum Ablauf der Zeit die Praxis verlassen hat.
- **Wartezeiten:** Als Wartezeit zählt jeder Aufenthalt des Patienten in einer Queue. Diese können vor dem Check-In sowie vor jeder Behandlung auftreten. Wartezeiten werden kumuliert und für jeden Behandlungsstrang einzeln aufgenommen.

Zusätzlich zu den Leistungskennzahlen werden noch andere Ausgabewerte aufgezeichnet und zur Modellanalyse verwendet. Hierzu zählen u.a. die Auslastung der Ressourcen, Warte-, Delay- und Bewegungszeiten für Patienten und die Dauer eines Behandlungstages.

### **Visualisierung 3D**

Zusätzlich zu der AnyLogic Visualisierung der Prozessschritte (Bild 7, Bild 19, Bild 20), wurde eine 3D Visualisierung der Vorgänge in der Strahltherapiepraxis implementiert. Basierend auf dem entwickelten Grundriss werden Personal und Patienten graphisch dargestellt und bewegen sich entsprechend ihrer Prozessschritte im Modell durch die Praxis. Ressourcen wie LINAC und CT werden in denen für sie vorgesehenen Räumen fest installiert und von Personal und Patienten aufgesucht. Ein Screenshot findet sich in Bild 22 im Anhang A.8

## 4.5 Verifikation und Validierung

Nach jedem Umsetzungsschritt wurde das Modell auf Richtigkeit überprüft. Hierzu wurden Methoden verwendet, die z.B. von Banks [41], Law [40] und Pidd [64] beschrieben und die im Folgenden vorgestellt werden.

Viele Zeitmessungen im System wurden parallel auf voneinander unabhängigen Wegen durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Zwei AnyLogic Funktionen erlauben, Zeiten zwischen zwei beliebigen Punkten zu messen sowie die Dauer eines Prozesses auszugeben. Zudem wurden Zeiten bei Betreten und Verlassen von Modellbausteinen aufgenommen. Es konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Methoden identische Ergebnisse lieferten.

Eingabeparameter wurden nach Modelllauf ausgelesen und mit der Eingabe verglichen, um auszuschließen, dass diese versehentlich geändert wurden.

Für 200 Modellläufe wurden die Patientenzahlen für alle Behandlungspfade ausgelesen. Es erhielten 1799 Patienten eine Konsultation, 487 eine Erstbestrahlung, 516 eine Abschluss- und 390 eine Nachsorgeuntersuchung. Daraus ergeben sich für die Verteilung die zugehörigen Faktoren zu 0,546, 0,153, 0,162 sowie 0,126. Somit wurde nachgewiesen, dass die tatsächliche Verteilung der Behandlungsschritte der vorgegebenen Verteilung entspricht. Zudem konnte gezeigt werden, dass im Schnitt 10,2 Patienten ein CT und 118,4 Patienten eine Folgebestrahlung erhielten. Die Abweichung der Bestrahlungspatienten vom erwarteten Mittelwert 120 liegt darin begründet, dass zwar im Mittel 120 Patienten generiert werden aber aufgrund der beschränkten Öffnungszeiten nicht alle die Praxis betreten können.

Auch für die Behandlungszeiten der einzelnen Behandlungspfade wurde nachgewiesen, dass die tatsächlichen Dauern mit ihren Eingabeverteilungen übereinstimmen. Je höher die Patientenzahlen pro Behandlungspfad, desto kleiner ist die Schwankung. Exemplarisch sind die Verteilungen in Bild 8 für die Behandlungspfade Folgebestrahlung und Konsultation dargestellt. Deutlich sind die Dreiecksverteilung bzw. die Gleichverteilung zu erkennen.

AnyLogic visualisiert die Prozesse der ereignisdiskreten Simulation (siehe Bild 7, Bild 19, Bild 20). Damit lässt sich zu jedem Zeitpunkt das Geschehen an allen Prozesspunkten verfolgen. Zudem wurden Histogramme und Zeitdiagramme modelliert, die zur Überprüfung von Wartezeiten, Behandlungs- und Verweildauern und Auslastung der Ressourcen in Echtzeit dienen. Anhand dieser Visualisierungen wurde ebenfalls überprüft, dass das Verhalten des Modells den Erwartungen entspricht. Ein Ausschnitt befindet sich im Anhang A.8 in Bild 21.

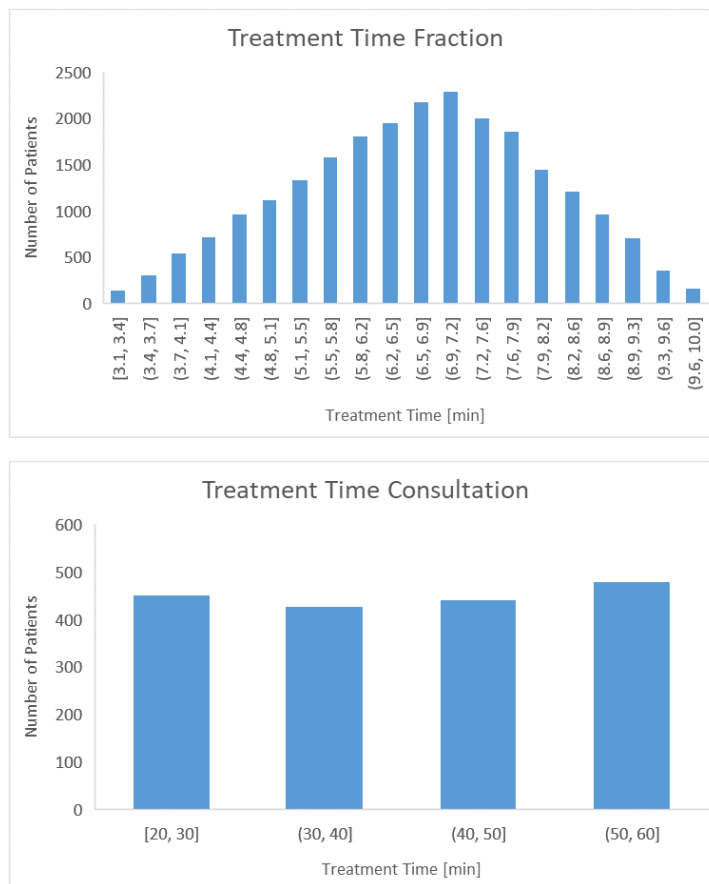


Bild 8: Behandlungszeiten für Folgebestrahlung (oben) und Konsultation (unten) für 200 Wiederholungen. Aufgetragen ist die Anzahl der Patienten gegen die Behandlungszeiten.

## 4.5.1 Sensitivitätsanalyse

Im Anschluss wurde das Modell einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Dazu wird das Modell unter Extrembedingungen getestet und untersucht, welche Eingabeparameter zu starken Änderungen führen und daher besonders sorgfältig modelliert werden müssen. Gleichzeitig kann überprüft werden, ob sich die Ausgabeparameter in erwarteter Weise ändern. Es wurden jeweils 50 Läufe durchgeführt und die Auswirkungen auf Wartezeiten und die Anzahl der behandelten Patienten untersucht.

### 4.5.1.1 Änderung der Ressourcen

#### Ressourcen mit Wert null

Das Setzen einzelner Ressourcen auf den Wert 0 zeigte, dass keine Patienten für den betroffenen Behandlungspfad die Praxis betraten. Alle anderen Patienten durchliefen nahezu unverändert die Praxis. Wartezeitreduktionen gab es geringfügig nur dort, wo es Korrelationen mit den ausgefallenen Ressourcen gab. Da diese Abhängigkeiten wegen guter Ressourcenplanung bereits über die Modelllogik weitestgehend abgefangen wurden, sind die Auswirkungen auf einzelne Zweige gering.

## **Erhöhung der Ressourcen**

Eine Erhöhung von zwei auf drei Onkologen verringerte die mittlere Wartezeit nur unwesentlich. Die maximale Wartezeit konnte von maximal 13 Minuten auf etwa 5,5 Minuten verringert werden. Eine Vergrößerung des RTT- bzw. Administratorenpools über die im Basismodell angegebenen Werte hinaus hatte nahezu keine Auswirkungen auf die Wartezeiten oder Patientenzahlen.

Weitere Variationen in den Ressourcen werden in Kapitel 4.7 besprochen. An dieser Stelle sei lediglich erwähnt, dass die Reduktion von Personal zu teils sehr hohen Wartezeiten führt und die Mindestanzahl der Mitarbeiter daher genau an der Realität abgeglichen werden muss, um belastbare Aussagen treffen zu können.

## **Terminplanung**

Für jeden Planungszweig wurden die Auswirkungen kürzerer Planungsslots untersucht. Es wird angenommen, dass die Patienten pünktlich zu ihren Terminen erscheinen.

Termine bei zwei Onkologen wurden statt alle 30 Minuten alle 20 Minuten vergeben. Dies führte zu mittleren Wartezeitanstiegen im Minutenbereich. Es konnte gezeigt werden, dass bei Pfaden, bei denen die maximale Wartezeit unter 10 Minuten lag, nun etwa 10 % der Patienten länger als 10 Minuten warten mit Maximaldauern zwischen 21 und 28 Minuten.

Termine zum CT wurden alle 15 Minuten statt alle 30 Minuten vergeben. Patienten warten im Mittel nun statt unter 1 Minute knapp 9 Minuten und im Maximum 34 Minuten statt 4 Minuten.

Termine zur Folgebestrahlung werden alle 3,5 Minuten vergeben. Mittlere Wartezeiten erhöhen sich von 0,9 auf 27 Minuten, das Maximum von knapp 15 auf 80 Minuten. Die Anzahl behandelter Patienten erhöhte sich um 1,7. Dies sind genau diejenigen, die im Basismodell außerhalb der Öffnungszeiten ankommen.

## **Anzahl an Patienten**

Für jeden Planungszweig wurde jeweils nur ein Patient erzeugt und durch das Modell geschickt. Erwartungsgemäß gab es keine Wartezeiten.

Die Anzahl aller Patienten wurde über die Kapazitätsgrenzen hinaus erhöht. Insbesondere für Termine mit Onkologen sowie CT-Scans sind aufgrund der Terminabstände von 30 Minuten maximal 20 Patienten pro Tag zugelassen. Auch die Folgebestrahlungen sind auf rund 118 Patienten am Tag durch die Terminplanung beschränkt, was auch ohne eine Erhöhung der Patientenzahl im Basismodell bereits voll ausgenutzt wird.

Es konnte gezeigt werden, dass im Schnitt knapp 2 Konsultationen, 9 CT-Scans, 0,4 Abschluss- und 0,5 Nachsorgetermine zusätzlich durchgeführt werden konnten. Durch die Zunahme an CT-Terminen und die bevorzugte Behandlung dieser Patienten durch die RTT, konnten 0,2 Patienten weniger eine Folgebestrahlung erhalten, was bedenklich ist. Es gab keine nennenswerte Veränderung der Wartezeiten.

Die mittlere Auslastung der zwei Onkologen zusammen betrug 45% und überschreitet somit nicht deren Verfügbarkeit von 75%. Bei Bedarf könnten also selbst bei bestehender Terminplanung mehr Patienten für Onkologen-Termine angenommen werden, was jedoch bei der bereits vollen Auslastung der Bestrahlungskapazität nicht sinnvoll ist. Dieser Parameter ist nicht sensitiv.

### **Dauer der Termine**

Die Dauer der Folgebestrahlungstermine wurde um den Faktor 1,2 erhöht. Dies führte zu 0,26 weniger Patienten, die an einem Tag bestrahlt werden konnten. Die mittlere Wartezeit erhöhte sich auf 2,7 Minuten mit einem Maximum von 25 Minuten. Um den Faktor 1,5 längere Termine führten zu einer um 13,2 Patienten geringeren Anzahl durchgeführter Folgebestrahlungen mit mittleren Wartezeiten von 39 und maximalen Wartezeiten von 113 Minuten für diesen Behandlungszeitpunkt. Da selbst eine geringe Variation dieses Parameters direkte Auswirkungen auf die Anzahl der behandelten Patienten hat, sollte er sorgfältig modelliert werden.

Eine Verlängerung der Erstbestrahlungstermine um rund 5 Minuten mit einer Variabilität von  $\pm 5$  Minuten führten zu einer sehr geringen mittleren Wartezeitverlängerung von 0,4 Minuten für Patienten zur Folgebestrahlung. Deren maximale Wartezeit erhöhte sich auf 23,4 Minuten. Dies liegt darin begründet, dass Erstbestrahlungen eine höhere Priorität als Folgebestrahlungen haben und die dafür allokierten Ressourcen bei längerer Behandlungsdauer weniger für Folgebestrahlungen zur Verfügung stehen. Erstbestrahlungspatienten erlebten keine nennenswerten Wartezeitverlängerungen.

Insgesamt konnte bestätigt werden, dass die Modellantworten angemessen bezüglich der Eingabeänderungen sind. Die Anzahl des modellierten Personals ist unter gleichzeitiger Betrachtung der Wartezeit und des Patientendurchsatzes gut eingestellt. Die Dauer der Behandlungszeiten für Folgebestrahlungen ist ein sensibler Parameter, den es sorgfältig zu modellieren gilt. Schon eine geringe Verlängerung der Bestrahlungsdauern führt zu einer Reduktion in der Anzahl an täglich bestrahlten Patienten. Ebenso verlängerte eine Verkürzung der Planungseinheiten für Folgebestrahlungen die Wartezeiten in diesem Bereich erheblich. Dieser Parameter muss daher ebenfalls genau an der Realität abgeglichen werden. Eine engere Staffelung der Termine ohne erhebliche Wartezeitverlängerungen könnte bei CT- und Onkologenterminen vorgenommen werden und ist daher ein nicht-sensibler Parameter. Ebenso ist eine Verlängerung der Ersteinstellungstermine um gute 30% unproblematisch.

Da im Rahmen dieser Arbeit eine exemplarische Praxis modelliert wird, kann keine Validierung anhand historischer Daten erfolgen. Daher wurde das Modell abschließend in einer Microsoft Teams Konferenz mit einer Mathematikerin und Expertin für Simulationen im Gesundheitswesen und einem Experten aus der Industrie mit langjähriger Erfahrung in der Strahlentherapie validiert. Hierfür wurden insbesondere die Modelllogik, die Annahmen und Eingabeverteilungen und deren Bezug zu

den erhobenen Daten untersucht und diskutiert. Ebenso wurde die Zusammensetzung der Ausgabedaten besprochen. Somit konnten strukturelle und Daten bezogene Modellannahmen validiert und Augenscheinvalidität bescheinigt werden.

#### 4.6 Bestimmung der Anzahl an Simulationsläufen

Da das Modell stochastische Elemente enthält, werden zu einer Abschätzung der gemessenen Mittelwerte mehrere Simulationsläufe benötigt. Von besonderem Interesse sind die Leistungskennzahlen, die die Wartezeiten und den Patientendurchsatz quantifizieren. Sie werden zur Bestimmung der benötigten Anzahl an Simulationsläufen betrachtet.

Zur Bestimmung der Anzahl an benötigten Replikationen wurde das Modell mit 10, 50, 100, 150, 200, 250 und 300 Iterationen ausgeführt und die Ergebnisse ausgewertet. Sofern die Ergebnisse voneinander unabhängig sind, kann die Auswertung rechnerisch auf Basis von Konfidenzintervallen erfolgen. Sind die Ergebnisse korreliert, so können keine Konfidenzintervalle angegeben werden und die Auswertung erfolgte graphisch [65].

Im vorliegenden Modell hängt die Anzahl der behandelten Patienten nicht voneinander ab. Somit konnte die Genauigkeit  $d_n$  dieser Leistungskennzahl nach Hoad et al [66] bestimmt werden:

$$d_n = \frac{100 \cdot t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \cdot s_n / \sqrt{n}}{\bar{X}_n}$$

mit  $d_n$ : Genauigkeit,  $t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}$ : Student-t-Verteilung für n-1 Freiheitsgrade und Signifikanz  $1-\alpha$ ,  $s_n$ : Standardabweichung,  $\bar{X}_n$ : kumulierter Mittelwert

Hierbei ist die Genauigkeit  $d_n$  der prozentuale Anteil der Halbwertsbreite des Vertrauensintervalls am kumulativen Mittelwert. Als Signifikanz wurde  $\alpha=0,5$  gewählt, was einem Konfidenzintervall von 95% entspricht [65].

Für die Anzahl der an einem Tag behandelten Patienten konnte gezeigt werden, dass die Genauigkeit schon für 10 Replikationen unter 2% liegt. Die zugehörigen Daten befinden sich in Tabelle 7. Für diese Leistungskennzahl wäre eine Wiederholung von 10 Läufen bereits ausreichend.

Tabelle 7: Genauigkeit  $d_n$  der Patientenzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Replikationen n.

Replikationen n	$d_n$ für Patientenzahl	Replikationen n	$d_n$ für Patientenzahl
10	1.5	200	0.3
50	0.7	250	0.3
100	0.5	300	0.3
150	0.4		

Ebenso müssen die Anzahl der Replikationen für die Leistungskennzahl Wartezeit abgeschätzt werden. Da die Wartezeiten voneinander abhängen, können keine Konfidenzintervalle angegeben werden. Die benötigten Läufe werden in diesem Falle graphisch bestimmt [65]. Hierzu werden die kumulierten Mittelwerte gegen die Anzahl der Replikationen aufgetragen. Da eine Zeitmessung im Rahmen eines Praxismodells nur bis zu einer gewissen Genauigkeit sinnvoll ist, werden Zeiten bis 15 Minuten mit einer Nachkommastelle und Zeiten ab 15 Minuten ohne Nachkommastelle angegeben. Die benötigte Anzahl an Läufen kann im Graphen an der Stelle abgelesen werden, an der die Kurve in eine Horizontale übergeht und kein Trend mehr zu erkennen ist. Der Verlauf der Wartezeiten in Bild 9 zeigt eine benötigte Anzahl von 150 Läufen. Danach tritt keine Änderung mehr ein.

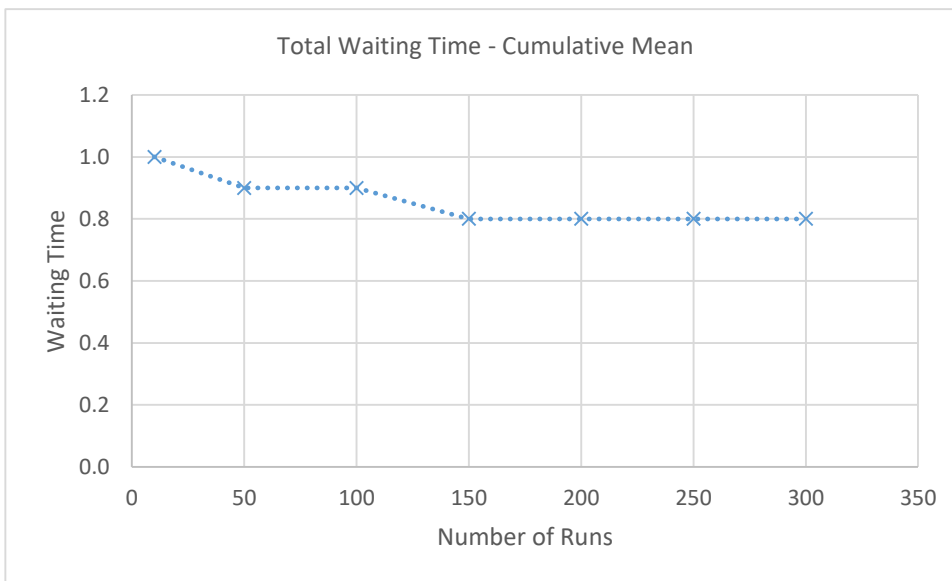


Bild 9: Bestimmung der Anzahl der Läufe für die Leistungskennzahl Wartezeit. Die kumulierten Mittelwerte über alle Patienten sind gegen die jeweilige Anzahl an Iterationen aufgetragen.

Da im Verlaufe der Auswertung Wartezeiten auch bezogen auf einzelne Behandlungspfade untersucht werden, müssen auch hier die notwendigen Iterationen festgestellt werden. Bild 10 zeigt exemplarisch die entsprechenden Graphen zur Bestimmung der Anzahl an Läufen für die Wartezeiten für Termine der Abschlussuntersuchung sowie Folgebestrahlung. Aus beide Kurven ergibt sich jeweils eine Mindestanzahl von 250 Läufen. Zur Bestätigung der Stabilität der Werte wurden zusätzlich die Werte für 400 Iterationen ermittelt. Für alle anderen Behandlungspfade reicht eine geringere Anzahl an Läufen aus. Gleiches gilt für die Verweildauern aller Pfade. Die zugehörigen Daten befinden sich in Anhang A.9.

Nach Robinson [65] ist es üblich, die Anzahl der Läufe des Basismodells auch für die Experimentläufe der zu untersuchenden Szenarien anzunehmen und sie daher zur Sicherheit geringfügig zu überschätzen. Aus diesem Grund wird für die Anzahl der Läufe auf 300 festgesetzt.



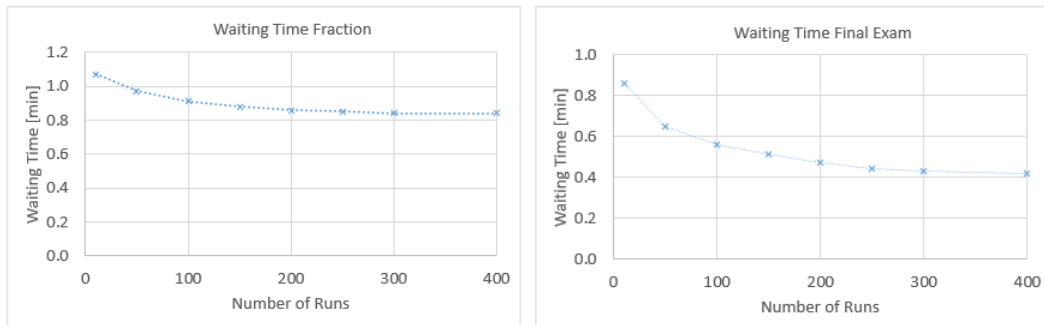


Bild 10: Bestimmung der Anzahl der Läufe für die Wartezeiten der Abschlussuntersuchung (links) und der Folgebestrahlungen (rechts). Die kumulierten Mittelwerte sind gegen die jeweilige Anzahl an Iterationen aufgetragen.

## 4.7 Experimentläufe

Mit dem vorliegenden Simulationsmodell sollen Auswirkungen Corona bedingter Änderungen auf die Wartezeiten und die Anzahl der behandelten Patienten untersucht werden. Der Vergleich wird mit dem oben vorgestellten Basismodell vorgenommen. Im Folgenden werden die Experimente präsentiert und diskutiert.

Während der Pandemie entstehen Personalausfälle aufgrund einer COVID-Erkrankung, Quarantäneauflagen oder Versorgung von Betreuungsbedürftigen, die aufgrund von Corona-Auflagen oder Krankheit nicht im üblichen Rahmen betreut werden können. Ein Beispiel hierzu ist die Schließung von Schulen und Betreuungseinrichtungen. Auch Maschinen können betroffen sein, da Wartungen, Reparaturen oder verpflichtende Qualitätsüberprüfungen nicht durchgeführt werden können.

Um Personalausfällen entgegenzuwirken und die Ansteckung von Patienten untereinander zu verhindern, werden im vorliegenden Modell am Praxiseingang die oben beschriebenen Coronamaßnahmen durchgeführt. Zudem wird die Behandlung von an COVID-19 erkrankten Patienten um 30 Minuten verlängert, um dem Personal das Anlegen von Schutzkleidung zu ermöglichen sowie nach der Behandlung Desinfektions- und Lüftungsmaßnahmen durchzuführen.

Es wurde untersucht, welche Auswirkungen Ressourcenausfälle haben, für den Fall, dass keine Coronamaßnahmen implementiert werden, sowie bei Implementierung ausgewählter Maßnahmen bei einer 7-Tage-Inzidenz (im Folgenden Inzidenz) von 100 Coronafällen pro 100.000 Einwohnern als auch bei einer Inzidenz von 1000. Der Inzidenzwert von 100 wurde gewählt, da in Deutschland als Richtwert für die bundeseinheitliche Notbremse des vierten Bevölkerungsschutzgesetzes diente [67]. Der Inzidenzwert von 1000 wurde repräsentativ für hohe Inzidenzwerte gewählt. Am 4.09.2021 lag beispielsweise die 7-Tage-Inzidenz Israels bei 750 trotz rund 62% Zweitimpfungen [68].

Es wurden jeweils die gleichen Szenarien des Personalausfalls analysiert (siehe Tabelle 8). Da immer zwei RTT gemeinsam eine Maschine bedienen, werden für diese Gruppe nur Ausfälle in Zweiergruppen untersucht.

Zunächst wurde der Personalausfall in jeder Berufsgruppe einzeln betrachtet, um den Einfluss der Gruppe auf die Leistungsparameter zu erforschen. Anschließend wurde der Personalausfall in Kombination analysiert.

Variationen in der Verfügbarkeit der MPE werden nicht betrachtet. Der MPE hat keine Abhängigkeiten und ist lediglich bei Ersteinstellungen im Modell vertreten. Hier gäbe es lediglich Konflikte, wenn zwei Ersteinstellungen zur gleichen Zeit durchgeführt werden sollten. Dies ist bei durchschnittlich 2,5 Terminen am Tag eher unwahrscheinlich und würde zu einer maximalen zusätzlichen Wartezeit von 15 Minuten führen. Da die Ersteinstellungstermine von insgesamt rund 15 Minuten Dauer im 30 Minuten-Takt vergeben werden, hat dies nahezu keine Auswirkungen auf Folgetermine. Der MPE ist zur potentiellen Erweiterung des Modells um Planungsaufgaben und Qualitätsmaßnahmen bereits abgebildet, spielt aber im Simulationsgeschehen der vorliegenden Arbeit keine wesentliche Rolle.

Tabelle 8 Experimentszenarien der Simulationsstudie. Angegeben ist das Ausmaß des Ressourcenausfalls. Nicht genannte Berufsgruppen stehen wie im Basismodell zur Verfügung.

Ressourcenausfall	Kategorie 1: Keine Corona- maßnahmen	Kategorie 2: Coronamaßnahmen bei Inzidenz 100	Kategorie 3: Coronamaßnahmen bei Inzidenz 1000
Kein Ausfall	Szenario 0	Szenario 7	Szenario 13
1 Onkologe	Szenario 1	Szenario 8	Szenario 14
2 RTT	Szenario 2	Szenario 9	Szenario 15
4 RTT	Szenario 3	Szenario 10	Szenario 16
1 Administrator	Szenario 4	Szenario 11	Szenario 17
1 Onkologe, 2 RTT, 1 Administrator	Szenario 6	Szenario 12	Szenario 18
1 LINAC	Szenario 5		Szenario 19

Das Personal wurde in den einzelnen Experimenten wie folgt verändert. Nicht angegebene Personal steht in vollem Umfang des Basismodells zur Verfügung:

- Kein Ausfall: Personal und Maschine stehen mit zwei Onkologen zu jeweils 75%, 6 RTT, einem MPE zu 0,1% und zwei Administratoren sowie einem CT und zwei LINAC voll zur Verfügung.
- 1 Onkologe: Ausfall eines Onkologen. Ein Onkologe steht zur Verfügung.
- 2 RTT: Ausfall von zwei RTT. Es treten vier RTT zum Dienst an.
- 4 RTT: Ausfall von vier RTT. Zwei RTT können ihren Dienst aufnehmen.
- 1 Administrator: Ausfall eines Administrators. Ein Administrator arbeitet.
- 1 Onkologe, 2 RTT, 1 Administrator: Ein Onkologe, vier RTT und ein Administrator nehmen ihre Arbeit auf.
- 1 LINAC: Nur ein Linearbeschleuniger steht zur Verfügung.

Eine Tabelle mit den Wartezeiten aller Behandlungsgruppen für alle Szenarien gemittelt über 300 Simulationsläufe befindet sich in Anhang A.10. Ein Überblick über die Wartezeiten aller Patienten ist in Bild 11, die Anzahl aller behandelten Patienten in Bild 12 jeweils für jedes Szenario dargestellt.

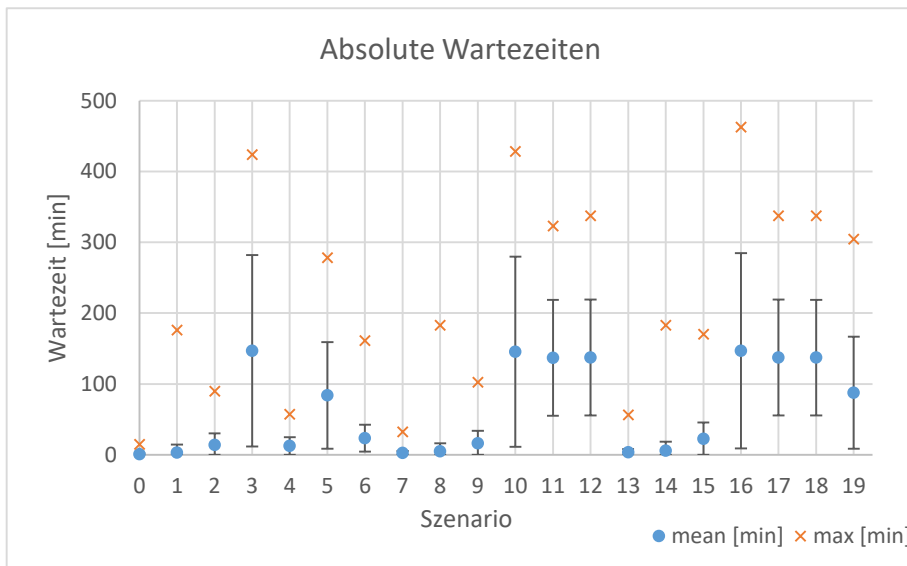


Bild 11: Wartezeiten gemittelt über alle Patienten für jedes Szenario. Angegeben sind Mittelwerte, Standardabweichungen sowie das Maximum.

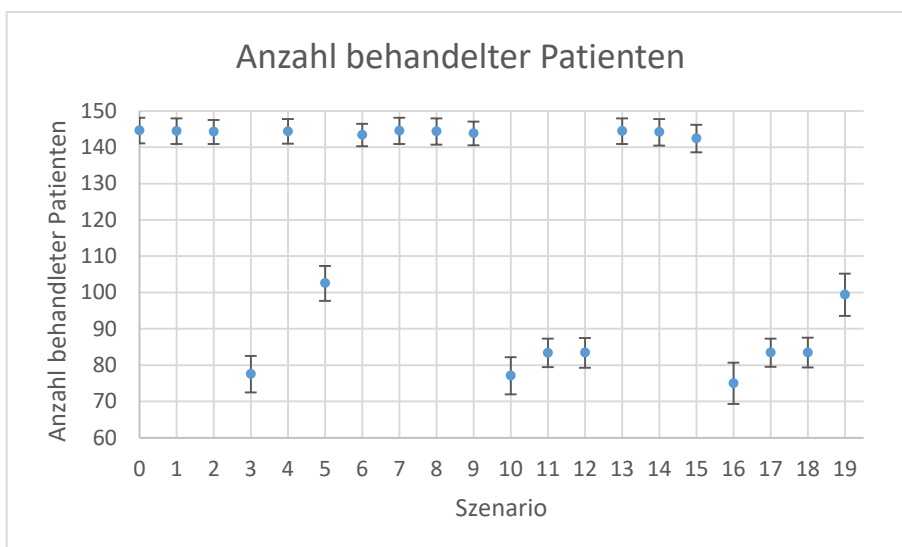


Bild 12: Anzahl der behandelten Patienten für die verschiedenen Szenarien. Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen.

### 4.7.1 Abhängigkeit von der Inzidenz

Die Daten zeigen (siehe Anhang A.10 und Bild 12), dass die Veränderungen überwiegend unabhängig von der Inzidenz zwischen 100 und 1000 sind. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei einer Inzidenz von 100 im Mittel 0,1 (-0,1/+0,4) Patienten am Tag eine COVID-Erkrankung haben, bei einer Inzidenz von 1000 sind es rund  $1,4 \pm 1,2$ . Die Behandlung jedes Coronapatienten verlängert sich zwar um 30 Minuten im Vergleich zu einem gesunden Patienten, sorgt aber wegen der geringen Anzahl an Betroffenen nur für geringfügige Verlängerungen der mittleren Wartezeiten. Insbesondere alle Patienten, die vor dem ersten Coronapatienten die

Praxis betreten haben, sind vollkommen unbeeinflusst. Die Streuung und das Maximum der mittleren Wartedauern vergrößert sich etwas, da direkt nachfolgende Patienten stark von der Änderung im Betriebsablauf betroffen sein können.

Aus diesem Grunde werden im Folgenden nur die Coronaszenarien bei einer Inzidenz von 1000 explizit besprochen. Ebenso wurde auf eine Untersuchung der Wartezeiten bei Wegfall eines Linearbeschleunigers bei Inzidenz 100 verzichtet. Daten der Inzidenz 100 werden aber der Vollständigkeit halber in zusammenfassenden Diagrammen und Tabellen weiterhin dargestellt.

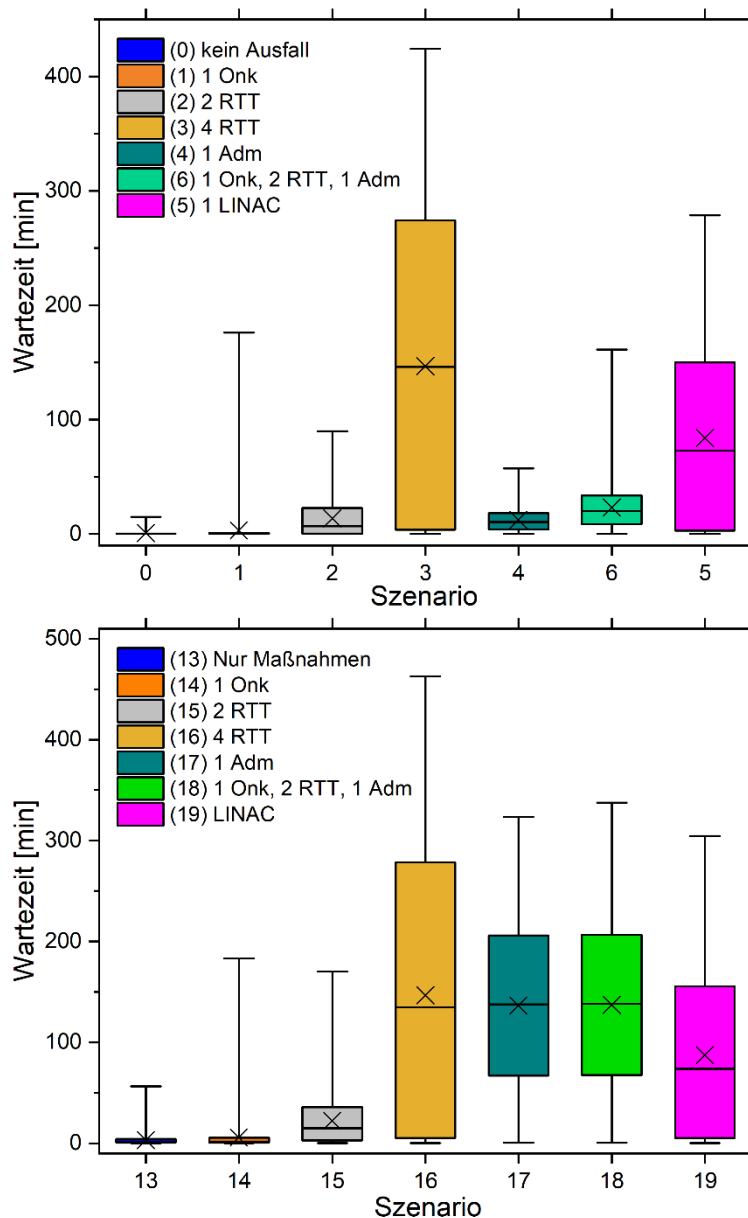


Bild 13: Kastendiagramme der Wartezeiten aller Patienten der Kategorie 1 (Szenarien 0-6 ohne Coronamaßnahmen) (oben) und der Kategorie 3 (Szenarien 13-19 mit Coronamaßnahmen bei Inzidenz 1000) (unten). Die Legende gibt das Szenario und den zugehörigen Ressourcenausfall an.

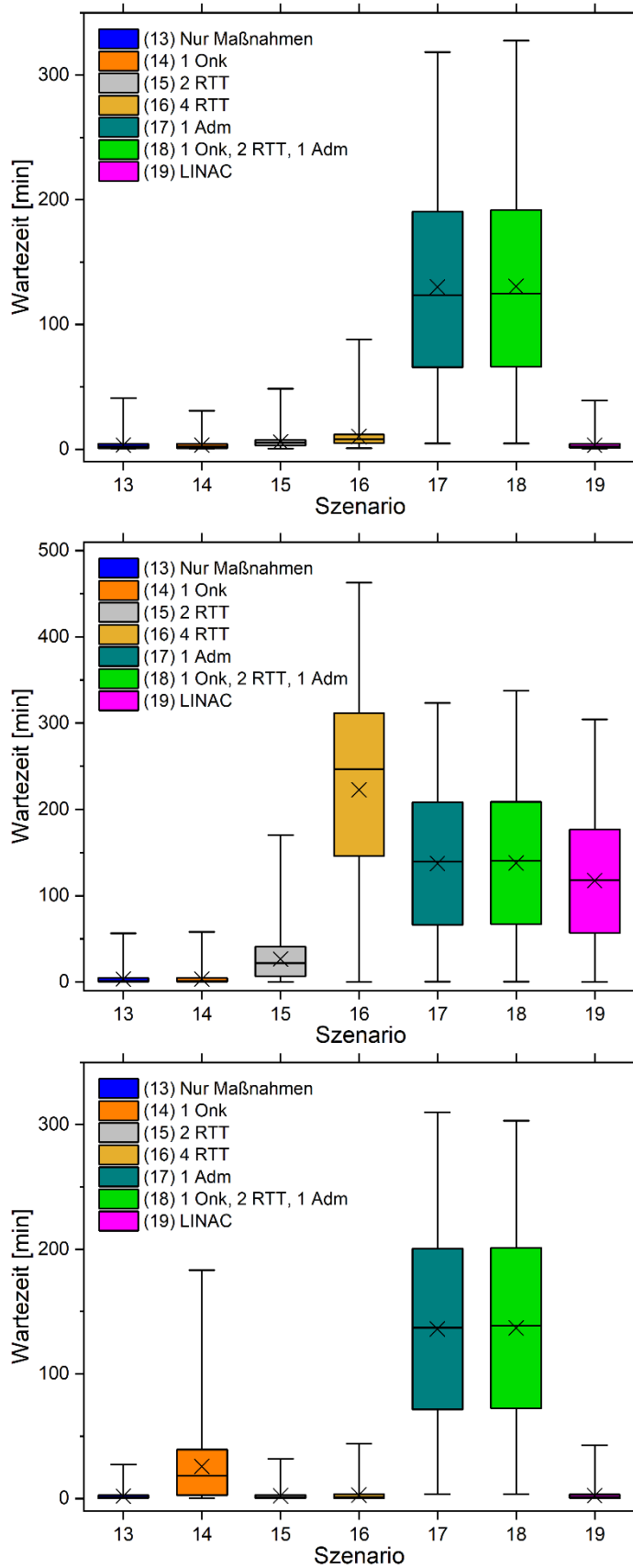


Bild 14: Wartezeiten bei Inzidenz 1000 und Implementierung von Coronamaßnahmen (Kategorie 3). Dargestellt sind die Wartezeiten auf CT-Termine (oben), Folgebestrahlungen (Mitte) und Termine beim Onkologen (unten). Die Legende gibt das Szenario und den zugehörigen Ressourcenausfall an.

## 4.7.2 Vergleich der Szenarien

In diesem Unterkapitel werden die Szenarien ohne Ergreifen von Coronamaßnahmen (im Folgenden Kategorie 1) mit den äquivalenten Szenarien bei Implementierung von Coronamaßnahmen bei Inzidenz 1000 (im Folgenden Kategorie 3) miteinander verglichen. Hierbei werden insbesondere die Wartezeit der Patientengruppen und die Anzahl der behandelten Patienten betrachtet. Die Auswertung erfolgt anhand der Graphen in Bild 11, Bild 12, Bild 13 und Bild 14 sowie der zugehörige Wertetabellen in Anhang A.10. Aus Gründen der Lesbarkeit werden sie nicht in jedem Abschnitt wiederholt referenziert.

### 4.7.2.1 Keine Ausfälle – Szenario 0 und 13

Szenario 0 und 13 können als Basisszenarien angesehen werden, da sie die Situation in der Praxis ohne Ausfälle von Ressourcen darstellen. Ein Vergleich der beiden Szenarien miteinander zeigt den Einfluss der Implementierung von Coronamaßnahmen auf die Wartezeiten der Patienten. Die mittlere Wartezeit steigt durch Maßnahmen für alle Patienten im Minutenbereich. Jedoch kann die maximale Wartezeit von vormals 15 Minuten in Kategorie 1 auf bis zu 57 Minuten in Kategorie 3 ansteigen. Dies liegt vornehmlich darin begründet, dass die Administratoren zusätzlich zur Anmeldung und Terminvergabe auch die Coronamaßnahmen am Eingang der Praxis durchführen und in dieser Zeit nicht an der Rezeption zur Verfügung stehen. Patienten warten nun potentiell am Eingang und zusätzlich länger an der Rezeption. Termine der Folgebestrahlung sind im Allgemeinen etwas stärker betroffen, da sie am engsten gestaffelt sind und sich auch kleine Störungen im Ablauf auf die Taktung der Termine auswirken.

### 4.7.2.2 Ausfall eines Onkologen – Szenario 1 und 14

Steht nur ein Onkologe zur Verfügung, so sind alle Patienten mit Termin beim Onkologen von verlängerten Wartezeiten betroffen. Dies sind namentlich die Termine zur Konsultation, Erstbestrahlung, Abschlussuntersuchung oder Nachsorge. Obwohl sich die Patienten der Folgebestrahlung den Linearbeschleuniger mit den Patienten der Erstbestrahlung teilen, gibt es hier nahezu keine Interferenzen, da der Linearbeschleuniger für eine Ersteinstellung erst reserviert wird, wenn der Onkologe schon zur Verfügung steht. CT-Patienten profitieren leicht von den verlängerten Wartezeiten auf Onkologentermine. Da sich Onkologentermine nun in den Nachmittag verschieben, liegen diese oft nicht mehr parallel zu den CT-Terminen, die überwiegend in der ersten Tageshälfte stattfinden. Die prioritäre Behandlung der Erstbestrahlung verzögert somit nicht mehr die Durchführung der Bildgebung.

In Kategorie 1 warten Patienten im Schnitt zwischen 21 und 25 Minuten auf den Onkologen, in Kategorie 3 durchschnittlich zwischen 24 und 30 Minuten. In beiden Kategorien kann die Wartedauer bis zu 3 Stunden betragen.

Es konnte gezeigt werden, dass der Onkologe zu 75 % ausgelastet ist, was seiner Kapazitätsgrenze entspricht. Mehr Patienten hätte der Onkologe nicht behandeln können, ohne dass andere seiner Aufgaben unerledigt geblieben wären. Es konnten alle Patienten behandelt werden. Der Mittelwert der behandelten Patienten eines Tages liegt mit  $144,4 \pm 3,6$  Patienten knapp unter dem des Basisszenarios, kann aber aufgrund seiner Schwankungsbreite nicht eindeutig als Trend identifiziert werden.

### 4.7.2.3 Ausfall von RTT – Szenario 2, 3, 15 und 16

RTT werden für die Durchführung von Erst- und Folgebestrahlungen sowie für die Durchführung von Planungs-CTs benötigt. Um Ressourcen bestmöglich zu nutzen und nicht zu blockieren, werden CT- und Ersteinstellungspatienten bevorzugt behandelt. Was gut im Regelbetrieb funktioniert, stellt sich bei Unterbesetzung der RTT als Komplikation für Folgebestrahlungen heraus. Bei Dienst von vier RTT können nicht alle Geräte gleichzeitig betrieben werden. Für die Dauer der Bildgebung bleibt ein LINAC ungenutzt und Bestrahlungspatienten müssen warten. Da das Planungs-CT der Folgebestrahlung vorgezogen wird und mehr Zeit in Anspruch nimmt, entstehen längere Wartezeiten vorrangig zu Lasten der Folgebestrahlungspatienten. CT-Patienten müssen ihrerseits nur im Falle einer Ersteinstellung zurückstehen und erfahren daher etwas längere Wartezeiten als die der ersten Bestrahlung.

Stehen nur zwei RTT zur Verfügung, so kann ein Linearbeschleuniger nicht genutzt werden, da für eine Behandlung immer zwei RTT pro Gerät benötigt werden. Ebenso können nur entweder das CT oder der LINAC betrieben werden. Eine gleichzeitige Nutzung ist nicht mehr möglich. In beiden Kategorien erhöhen sich die mittleren Wartezeiten für Folgebestrahlungspatienten auf ca. 220 Minuten mit maximalen Wartezeiten weit über 400 Minuten. Patienten mit CT-Termine warten durchschnittlich zwischen 7 und 10 Minuten, in Kategorie 3 maximal bis zu 88 Minuten. Für Ersteinstellungen wird im Schnitt zwischen 6 und 9 Minuten zum Warten benötigt, maximal jedoch 44 Minuten.

Patienten, deren Behandlung keine RTT benötigt, sind im Vergleich von Wartezeitenänderungen überwiegend unbetroffen. Lediglich in Einzelfällen kann das Warten der Onkologen auf die RTT zur Ersteinstellung zu Wartezeiten bei anderen Onkologenterminen führen.

Das vorrangigste Problem beim Ausfall von RTT liegt in der reduzierten Anzahl an Folgebestrahlungen. Mit vier RTT können in Kategorie 1 im Schnitt 2 Patienten pro Woche, in Kategorie 3 rund 2 Patienten pro Tag ihre Folgebestrahlung nicht wahrnehmen. Beide Ergebnisse sind problematisch, da Folgebestrahlungen nicht unterbrochen werden sollen. Da die Anzahl der nicht bestrahlten Patienten vergleichsweise gering ist, könnte dies über eine Verlängerung der Öffnungszeiten kompensiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Praxis schon unterbesetzt ist und eine Verlängerung der Dienstzeiten unter Umständen nicht möglich ist.

Bei lediglich zwei verfügbaren RTT werden im Schnitt nur  $51,3 \pm 7,5$  (Kategorie 1) bzw.  $48,8 \pm 7,8$  Patienten (Kategorie 3) bestrahlt. Dies entspricht 43% bzw. 41%

der üblichen Folgebestrahlungen. Dies ist ein dramatisches Ergebnis, dass nicht mehr einfach durch Verlängerung der Öffnungszeiten gelöst werden kann.

Dies zeigt wiederholt den Bedarf an qualifiziertem Personal in ausreichender Menge. Mangel an solchem führt zu einer Unterversorgung von Behandlungsbedürftigen Patienten und einer erheblichen Unterauslastung teurer Geräte.

#### **4.7.2.4 Ausfall eines Administrators – Szenario 4 und 17**

Steht nur noch ein Administrator für die Anmeldung zur Verfügung, so betrifft dies alle Patienten. Man sieht ohne das Ergreifen von Coronamaßnahmen in Kategorie 1 einen mittleren Wartezeitzuwachs auf  $12,3 \pm 12,3$  Minuten mit Maximum von 57 Minuten. Die Verlängerung ist gleichmäßig über alle Behandlungspfade verteilt und rührt von der zusätzlichen Wartedauer an der Anmeldung her. Alle Patienten können während der Öffnungszeiten behandelt werden.

Auch in Kategorie 3 sind die Wartezeitzuwächse gleichmäßig verteilt. Hier jedoch steigt die mittlere Wartezeit mit  $137 \pm 81$  Minuten stark an und kann bis zu 338 Minuten betragen. Dies liegt darin begründet, dass der Administrator zusätzlich zur Anmeldung auch die Coronamaßnahmen am Praxiseingang durchführt und nun sowohl auf die Aufnahme als auch die Maßnahmen gewartet werden muss. Aufgrund der extremen Dauern können nur  $83,4 \pm 3,9$  Patienten statt der üblichen  $144,4 \pm 3,5$  behandelt werden. Anders als beim Ausfall von vier RTT, werden hiervon alle Behandlungszweige beeinflusst. CT Patienten haben hier die geringsten Auswirkungen, da die durchschnittlich 10 Patienten üblicherweise nur bis mittags geplant sind. Somit steht die zweite Hälfte des Arbeitstags zur Verfügung, um Verzögerungen abzufangen. Diese Möglichkeit ist insbesondere für Folgebestrahlungen nicht gegeben, da diese bis kurz vor Praxisschluss eingeplant sind. Daher ist dieser Behandlungszweig mit einem Ausfall von 45% am stärksten betroffen.

Dies zeigt sehr deutlich, dass auch das nicht-medizinische Personal essenziell für den Praxisbetrieb und die Versorgung der Patienten ist. Fällt dieses aus oder steht aufgrund anderer Aufgaben nicht zur Verfügung, kommt es zu schwerwiegenden Verzögerungen und einer signifikanten Reduktion in der Anzahl behandelter Patienten. Obwohl die Implementierung der Coronamaßnahmen am Eingang für den einzelnen Patienten üblicherweise nur ein paar Minuten dauert, summiert sich die dafür benötigte Zeit zu täglich rund 300 Minuten für das Team von Administratoren. Dies sind 60% des Arbeitstages eines einzelnen Administrators. Sofern das Administratorenteam nicht überbesetzt ist, führt dies unweigerlich zu oben beschriebenen Auswirkungen.

#### **4.7.2.5 Gleichzeitiger Ausfall von Onkologe, RTT und Administrator – Szenario 6 und 18**

Verrichten nur ein Onkologe, vier RTT und ein Administrator ihren Dienst, so hat das Auswirkungen auf alle Patientengruppen.



In Kategorie 1 zeigt sich bei den mittleren Wartezeiten ein nahezu additiver Effekt aus den Szenarien 1, 2 und 4 die jeweils einzeln die Ausfälle von einem Onkologen, zwei RTT bzw. einem Administrator beziffern. Insbesondere im Vergleich zu Szenario 4 steigen mittlere und maximale Wartezeiten deutlich an. Eine Ausnahme bilden die CT-Patienten, die aufgrund der bevorzugten Behandlung durch die RTT kaum zusätzliche Wartezeiten auf die Bildgebung verzeichnen. Es zeigt sich, dass ca. 1 Folgebestrahlung nicht ausgeführt werden kann. Auch in diesem Falle kann man über die Möglichkeit einer Öffnungszeitenerweiterung für den betroffenen Patienten diskutieren.

Kategorie 3 zeigt einen anderen Sachverhalt. Hier zeigen sich nahezu die gleichen Auswirkungen wie bei Wegfall eines Administrators in Szenario 17. Wartezeiten und die Anzahl behandelter Patienten sind nahezu identisch. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Wartezeiten am Eingang mit der Zeit immer stärker ansteigen. Dadurch verzögert sich das Eintreffen der einzelnen Patienten zu ihren Terminen schlussendlich so sehr, dass die vorhergehende Behandlung bereits abgeschlossen ist, wenn der nächste Patient eintrifft und es keine zusätzlichen Wartezeiten gibt. Eine Darstellung dieses Sachverhalts ist exemplarisch in Bild 15 für einen Simulationslauf zu finden. Die graue Kurve zeigt, dass es nahezu keine Wartezeiten auf die Behandlung gibt. Patient 38 kam zur Folgebestrahlung und traf relativ zeitgleich mit einem CT-Patienten ein, dessen Behandlung durch die RTT bevorzugt durchgeführt wird. Daher musste dieser Patient warten.

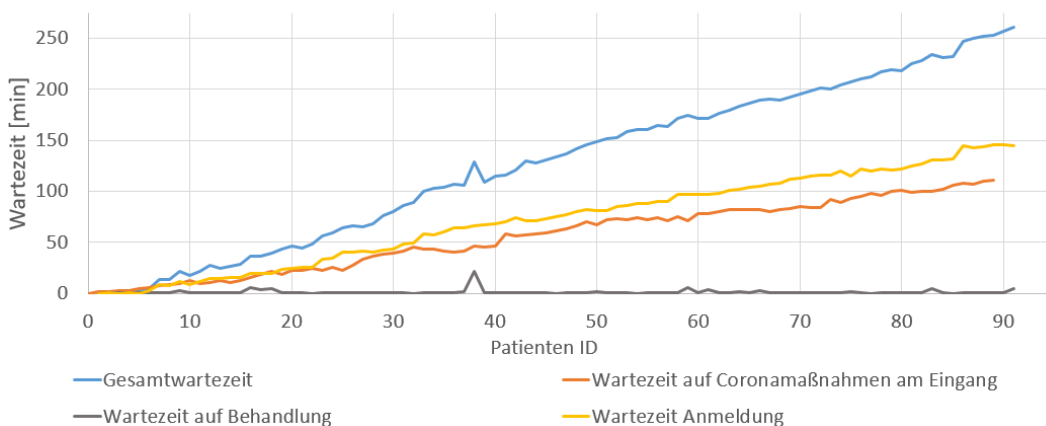


Bild 15: Wartezeiten für Szenario 18 für jeden einzelnen Patienten. Die Patienten haben in Reihenfolge ihrer ID die Praxis betreten. Diese ist daher ein Maß für den zeitlichen Verlauf.

Die mittlere Wartezeit sinkt minimal und ist durch stochastische Effekte begründet.

#### 4.7.2.6 Ausfall eines Linearbeschleunigers – Szenario 5 und 19

Fällt ein Linearbeschleuniger aus, so hat dies Auswirkungen auf alle Patienten, die zur Erst- oder Folgebestrahlung kommen. Ihre mittleren und maximalen Wartezeiten verlängern sich. Jedoch ist der Effekt für die Folgebestrahlungen wesentlich stärker ausgeprägt als für die Ersteinstellungen. Auch hier ist dies darin begründet,

dass die Patienten der Erstbestrahlungen am Linearbeschleuniger bevorzugt werden. Somit warten sie lediglich bis der Patient vor ihnen den Bestrahlungsraum verlassen hat. Im schlimmsten Fall haben sie eine weitere Ersteinstellung vor sich, die ihrerseits den Beschleuniger bevorzugt belegt und dadurch die Wartezeit der nachfolgenden Erstbestrahlung zusätzlich erhöht.

In Kategorie 1 können aufgrund der Verzögerungen nur  $76,3 \pm 3,7$  Patienten eine Folgebestrahlung erhalten. Dies sind 64% des Basisszenarios. Aufgrund der Wartezeiten, die durch die Coronamaßnahmen entstehen, warten Patienten der Kategorie 3 etwas länger als die der Kategorie 1. Daher können in Kategorie 3 nur  $73,2 \pm 4,9$  und damit 62% der Folgebestrahlungspatienten behandelt werden.

Auch bei Dienstantritt von nur zwei RTT fällt praktisch ein Beschleuniger komplett aus. Der Effekt im Falle des Personalausfalls ist jedoch insofern größer, als dass hier der verbleibende LINAC zusätzlich ungenutzt bleibt, wenn die RTT mit der Bildgebung am CT beschäftigt sind.

Die CT-Termine und Untersuchungstermine beim Onkologen bleiben vom Ausfall des Beschleunigers unberührt.

### 4.7.3 Diskussion

Es konnte allgemein gezeigt werden, dass sich bei Ausfall von Personal grundsätzlich die mittleren Wartezeiten der Patienten verlängern. Überwiegend ist das Verhalten des Systems in den einzelnen Szenarien zwischen Kategorie 1 und Kategorie 3 vergleichbar, auch wenn das Ausmaß in Kategorie 3 grundsätzlich größer ist durch die zusätzlich entstehenden Wartezeiten aufgrund der Coronamaßnahmen. Lediglich bei Szenarien mit Reduktion auf einen Administrator, weichen Kategorie 3 und 1 stark voneinander ab. Wartezeiten der Kategorie 3 steigen überproportional, da der Administrator zusätzlich zu seinen eigentlichen Aufgaben auch die Coronamaßnahmen am Praxiseingang durchführt. Die größten Verlängerungen in der Wartezeit treten bei Dienst von lediglich zwei RTT auf. Auch das Fehlen eines Linearbeschleunigers führt zu langen mittleren Wartezeiten. Arbeiten nur vier RTT oder nur ein Onkologe, so sind die durchschnittlich entstehenden Wartezeiten vertretbar, die maximalen Wartezeiten allerdings bedenklich.

Lange Wartezeiten sind für die schwer kranken Patienten schon bei Einzelterminen eine seelische und körperliche Belastung. In der Strahlentherapie kommen die meisten Patienten über Wochen hinweg täglich zur Bestrahlung. Daher sind durchgehend lange Wartezeiten unbedingt zu vermeiden. In Pandemiezeiten liegt in langen Wartezeiten eine zusätzliche Problematik. Da eine Großzahl an Patienten wartet, ist es nicht möglich, in den Wartezimmern die zur Infektionsprävention nötigen Abstände einzuhalten. Zudem halten sich viele Patienten lange im Wartezimmer auf, wodurch selbst eine Einhaltung des Mindestabstandes potentiell nicht ausreicht, um angemessen vor einer Ansteckung zu schützen [69]. Zusätzlich zur Übertragung von COVID-19 wird auch die Übertragung anderer Infektionskrankheiten durch überfüllte Wartezimmer begünstigt. Dies ist bei den immungeschwächten Patienten

unter allen Umständen zu vermeiden. Gleichzeitig steigt das Risiko einer Ansteckung des Personals, was zu einem Teufelskreis von weiteren Ausfällen und dadurch zusätzlich verlängerten Wartezeiten führen kann. Ausdehnung des Wartezimmers auf weitere Räume könnte zu einer Entspannung der Lage beitragen, ist aber durch Kapazität und Eignung vorhandener Räumlichkeiten beschränkt.

Lange Wartezeiten bedeuten auch, dass unter Umständen weniger Patienten während der geltenden Öffnungszeiten behandelt werden können. Dies tritt insbesondere bei einer starken Reduktion der RTT, bei Ausfall eines Linearbeschleunigers sowie in Kategorie 3 bei Ausfall eines Administrators ein und kann mehr als 50% weniger Patienten bedeuten. In allen Fällen sind die Patienten mit Folgebestrahlungen betroffen. Bei Ausfall eines Administrators in Kategorie 3 sind zusätzlich auch Patienten aus allen anderen Behandlungszweigen betroffen. Ein Ausfall insbesondere von Folgebestrahlungen gilt es unbedingt abzuwenden, da dies eine beschleunigte Repopulation der Krebszellen und dadurch potentiell geringeren Heilungschancen nach sich ziehen kann [3]. Aber auch alle anderen Termine müssen eingehalten werden, da der Patient ohne Konsultation oder Planungs-CT keine lebensrettende Behandlung antreten kann. Ebenso sind Abschluss- und Nachsorgeuntersuchungen unerlässlich, um den Behandlungserfolg zu kontrollieren und das weitere Vorgehen zu planen.

Eine Möglichkeit, den Ausfall von lebenswichtigen Behandlungen zu reduzieren, könnte die Verschiebung von benignen Bestrahlungen sein. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass auch diese Patienten krank sind und sich deren Leiden verlängert und möglicherweise verschlimmert. Dies muss also wohlüberlegt sein und kann keine Lösung auf Dauer sein. Auch die Durchführung von medizinisch vertretbaren Hypofraktionierungen kann die Behandlungsdauer verkürzen und so mehr Verfügbarkeit der Ressourcen schaffen [27].

Die untersuchten Szenarien zeigen deutlich, dass eine Besetzung der Praxis mit fachkundigem Personal in allen Bereichen in ausreichender Menge unerlässlich ist und Personalausfälle zu hohen Wartezeiten mit schwerwiegenden Folgen führen können. Dementsprechend gilt es, Lösungen zu entwickeln, die solche Ausfälle auf ein Minimum reduzieren. Dies sind zum einen die Prävention vor Infektion aber auch die Verhinderung von Personalausfällen, die nicht auf eine nachgewiesene oder potentielle eigene Erkrankung zurückzuführen sind. Als ein Beispiel seien hier Angebote zur Kinderbetreuung in der Praxis genannt.

Die Berufsgruppe der Administratoren zeigte sich als potentieller Flaschenhals mit weitreichenden Konsequenzen für den Praxisbetrieb, wenn diese zusätzlich zu ihren administrativen Tätigkeiten die Coronamaßnahmen am Praxiseingang implementieren müssen. Dies könnte durch Outsourcen der Coronaaufgaben an externe Hilfskräfte mitigiert werden, die insbesondere für das korrekte Durchführen von COVID-Tests speziell ausgebildet werden müssten. Auf längere Sicht könnte auch die Möglichkeit einer Selbstanmeldung beispielsweise durch Scannen eines patientenspezifischen QR-Codes in Betracht gezogen werden. Dies würde die Arbeitslast der Administratoren und dadurch Wartezeiten für die Patienten reduzieren.

Zur Verhinderung von hohem Patientenaufkommen im Wartezimmer, könnten ausgewählte Termine beim Onkologen, die keine physische Untersuchung benötigen, in telemedizinischer Umgebung durchgeführt werden. Hierzu könnten sowohl Video- als auch Telefonsprechstunden genutzt werden [27]. Insbesondere das Aufsetzen von Videosprechstunden kann bei erster Einführung durch Datenschutzanforderungen und den Bedarf an Infrastruktur in zeitlicher und finanzieller Hinsicht aufwändig sein. Zu berücksichtigen ist hierbei auch, dass auch der Patient persönlich und technologisch in der Lage sein muss, ein solches Angebot wahrzunehmen.

Es zeigte sich, dass die teils immensen Abweichungen im Betriebsablauf durch die COVID-19 Pandemie nicht von infizierten Patienten herrühren, deren Behandlung sich durch besondere Schutzmaßnahmen verlängert. Auch konnte keine wesentliche Abhängigkeit von der Inzidenz bis zu einem Inzidenzwert von 1000 nachgewiesen werden. Der Inzidenzwert spielt nur insofern eine Rolle, als dass zum einen staatliche Auflagen wie beispielsweise Schließungen von Betreuungseinrichtungen als auch lokales Infektionsgeschehen mit einhergehenden Erkrankungen und Quarantäneverpflichtungen an den Inzidenzwert gekoppelt sind und diese zu verstärkten Personalausfällen führen können.

#### **4.7.4 Limitationen**

Das Modell bildet einen Teilausschnitt der Abläufe in einer Strahlentherapiepraxis ab. Arbeiten, die ohne Patientenpräsenz stattfinden, wie die Therapieplanung oder Qualitätsmaßnahmen werden nicht berücksichtigt, obwohl diese von den gleichen Personalgruppen, allerdings bei größerer Mitarbeiterzahl, ausgeführt werden. Einflüsse aus diesen Bereichen auf den Tagesablauf können somit nicht durch das Modell evaluiert werden. Auch wurden nur ausgewählte pandemiebedingte Veränderungen untersucht und die Ergebnisse dieser Studie zeigen daher nur einen Auszug des Einflusses von COVID-19 auf die Strahlentherapieprozesse.

Im vorliegenden Modell werden Vollzeitäquivalente in einer pausenlosen 10-Stunden-Schicht betrachtet. Untersucht man den Ausfall eines solchen Vollzeitäquivalents, so wird effektiv der Ausfall mehrerer realer Personen betrachtet. Um die Umrechnungen zu vermeiden und die Interpretation zu erleichtern, könnte in einem nächsten Schritt ein Schichtsystem modelliert werden, das die Verfügbarkeiten der einzelnen Mitarbeiter abbildet.

Zusätzliche Eingabedaten können das Simulationsmodell verbessern. Die beste, aber auch zeitaufwändigste Methode ist eine Zeitstudie in mehreren Praxen, in der die Dauern der relevanten Aktivitäten explizit gemessen werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die COVID-19 Pandemie stellt Strahlentherapieeinrichtungen weltweit vor große Herausforderungen. Da Krebspatienten aufgrund ihrer Immunsuppression besonders gefährdet sind, schwer an Corona zu erkranken, sind sie auch in der Strahlentherapieeinrichtung besonders vor einer Ansteckung zu schützen. Zudem gilt es, die Infektion des hochqualifizierten und dringend benötigten Personals zu verhindern, um eine ununterbrochene und uneingeschränkte Fortdauer des Praxisbetriebs zu gewährleisten. Zu diesem Zweck werden Coronamaßnahmen in den Praxen ergriffen.

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen pandemiebedingter Personalausfälle und ausgewählter Coronamaßnahmen auf die Wartezeiten und den Durchsatz von Patienten in Strahlentherapiepraxen in einer Simulationsstudie mit ereignisdiskreter Simulation zu quantifizieren.

Die strukturierte Literaturrecherche und Analyse bereits durchgeführter Simulationsstudien von Strahlentherapieeinrichtungen unter Anwendung ereignisdiskreter Systeme haben ergeben, dass die Entwicklung eines Simulationsmodells spezifisch für eine Strahlentherapiepraxis notwendig ist. Der Fokus der Forschungsliteratur lag auf der Untersuchung der Strahlentherapieprozesse in Krankenhäusern unter dem Aspekt der Effizienzsteigerung. Strahlentherapiepraxen wurden nicht betrachtet. Keine der wissenschaftlichen Simulationen beschäftigte sich mit dem Einfluss von COVID-19 auf die Strahlentherapieprozesse. Zur Schließung dieser Lücke leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag.

Es konnte gezeigt werden, dass Personalausfälle dramatische Konsequenzen haben. In allen Berufsgruppen bedeutet der Ausfall von Personal teilweise unvermeidbare Wartezeiten für Patienten und kann in kritischen Fällen sogar zu einer drastischen Reduktion der Anzahl behandelter Patienten führen. Durch die Implementierung von Coronamaßnahmen am Praxiseingang durchgeführt durch Administratoren wird diese Berufsgruppe zu einer Engstelle mit negativen Konsequenzen für den Patientendurchsatz und die Wartezeiten.

Die Daten zeigten auch, dass die negativen Effekte nahezu unabhängig von der Inzidenz sind. Das eigentliche Problem liegt in pandemiebedingten Personalausfällen und der Durchführung der Coronaschutzmaßnahmen durch Personal zusätzlich zu ihren bestehenden Aufgaben.

Nächste Schritte bestehen in der Erweiterung des Modells um die Prozessschritte der Bestrahlungsplanung und der Durchführung von Qualitätssicherungsmaßnahmen, um den gesamten Praxisablauf abzubilden und systematisch untersuchen zu können. Das Modell kann auch genutzt werden, um Lösungsvorschläge sowie bereits implementierte Veränderungen auf Effektivität und Effizienz zu überprüfen. Um diese Möglichkeit allen klinischen Nutzern zugänglich zu machen, kann das Simulationsmodell als Entscheidungsunterstützungssystem genutzt werden, welches Praxisbetreibern hilft, faktenbasierte Entscheidungen zu treffen.

# Anhang

## A.1 Protokoll der strukturierten Literaturrecherche

Tabelle 9: Protokoll der Suchstrategie in Anlehnung an Dresch et al.

Protokoll der Suchstrategie					
Konzeptioneller Rahmen	Krebs als zweithäufigste Todesursache weltweit mit steigenden Zahlen fordert immer mehr medizinische Behandlungskapazitäten. Rund 50% der Krebserkrankten sollten mittels Strahlentherapie behandelt werden. Um dies auch bei wachsendem Bedarf zu gewährleisten, ist es wichtig, dass die benötigten Ressourcen optimal eingesetzt werden. Dies stellt insbesondere dann eine Herausforderung dar, wenn sich äußere Parameter schnell ändern wie z.B. bei der Corona Pandemie. Der Einsatz von ereignisdiskreten Simulationen kann Einblick in die Ablaufprozesse der Strahlentherapie geben und erlaubt eine unkomplizierte Simulation am PC.				
Kontext	Ablaufprozesse in der perkutanen Strahlentherapie in Kliniken und Praxen.				
Zeitraum	Unbegrenzt				
Theoretische Strategien	Ereignisdiskrete Simulation der Ablaufprozesse in der perkutanen Strahlentherapie				
Sprachen	Englisch				
Review-Frage	Welche Ablaufprozesse in der perkutanen Strahlentherapie wurden mittels ereignisdiskreter Simulationen schon wissenschaftlich untersucht?				
Review-Strategie	Mischform (aggregativ-konfigurativ)				
Suchkriterien	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Inklusionskriterien</th> <th>Exklusionskriterien</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauptthema: perkutane Strahlentherapie unter Einsatz von Linearbeschleunigern</li> <li>• Simulation von Strahlentherapieprozessen</li> <li>• Modellierung von Prozessen und Abläufen in der Strahlentherapie</li> <li>• Empirische Daten, die als Eingabe für ein Simulationsmodell dienen können</li> </ul> </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Bezug zur perkutanen Strahlentherapie</li> <li>• Kein Einsatz ereignisdiskreter Simulationsmethoden</li> <li>• Modellierung der Wirksamkeit von Therapien/ klinische Forschung</li> <li>• Protonentherapie/ Ionentherapie</li> <li>• Abstract nicht vorhanden</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	Inklusionskriterien	Exklusionskriterien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauptthema: perkutane Strahlentherapie unter Einsatz von Linearbeschleunigern</li> <li>• Simulation von Strahlentherapieprozessen</li> <li>• Modellierung von Prozessen und Abläufen in der Strahlentherapie</li> <li>• Empirische Daten, die als Eingabe für ein Simulationsmodell dienen können</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Bezug zur perkutanen Strahlentherapie</li> <li>• Kein Einsatz ereignisdiskreter Simulationsmethoden</li> <li>• Modellierung der Wirksamkeit von Therapien/ klinische Forschung</li> <li>• Protonentherapie/ Ionentherapie</li> <li>• Abstract nicht vorhanden</li> </ul>
Inklusionskriterien	Exklusionskriterien				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauptthema: perkutane Strahlentherapie unter Einsatz von Linearbeschleunigern</li> <li>• Simulation von Strahlentherapieprozessen</li> <li>• Modellierung von Prozessen und Abläufen in der Strahlentherapie</li> <li>• Empirische Daten, die als Eingabe für ein Simulationsmodell dienen können</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Bezug zur perkutanen Strahlentherapie</li> <li>• Kein Einsatz ereignisdiskreter Simulationsmethoden</li> <li>• Modellierung der Wirksamkeit von Therapien/ klinische Forschung</li> <li>• Protonentherapie/ Ionentherapie</li> <li>• Abstract nicht vorhanden</li> </ul>				
Kategorien der Suchbegriffe	Simulationsmethoden Simulation und Optimierung Strahlentherapie				

Suchquellen			
Datenbanken ScienceDirect Scopus PubMed	Berichte	Internet GoogleScholar	Andere

## A.2 Systematischen Literaturrecherche: Suchterme in den Datenbanken

Abfrage bei ScienceDirect am 12.04.2021

Title, abstract, keywords: („discrete event“ OR agent OR “system dynamics”) AND (modelling OR simulation OR optimization) AND (radiotherapy OR “radiation oncology” OR "radiation therapy") kombiniert mit “articles with these terms: (work-flow OR process)”

Article Type: Review articles, research articles, book chapters, conference abstracts

Sprache: Englisch

Anzahl identifizierter Publikationen: 336

Abfrage bei PubMed am 12.04.2021

((discrete event[Title/Abstract]) OR (agent[Title/Abstract]) OR (system dynamics[Title/Abstract])) AND ((modelling[Title/Abstract]) OR (simulation[Title/Abstract]) OR (optimization[Title/Abstract])) AND ((radiotherapy[Title/Abstract]) OR (radiation oncology[Title/Abstract]) OR (radiation therapy[Title/Abstract])) AND ((process) OR (workflow))

Sprache: Englisch

Anzahl identifizierter Publikationen: 15

Abfrage bei Scopus am 12.04.2021

TITLE-ABS-KEY ( ( ( discrete AND event ) OR ( agent ) OR ( system AND dynamics ) ) AND ( ( modelling ) OR ( simulation ) OR ( optimization ) ) AND ( ( radiotherapy ) OR ( radiation AND oncology ) OR ( radiation AND therapy ) ) AND ( ( process ) OR ( workflow ) ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "cp" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ch" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) ) )

Article Type: articles ar, review articles re, conference papers cp, book chapters ch

Sprache: Englisch

Anzahl identifizierter Publikationen: 399



### A.3 Kodes und Kodegruppen

Nachfolgend sind die relevanten Kodes und Kodegruppen aufgelistet, die in Abschnitt 3.3.2 vorgestellt und analysiert wurden. Die Tabelle wurde aus der verwendeten Analysesoftware Atlas.ti exportiert.

Tabelle 10: Betrachtete Kodes und Kodegruppen (Ausschnitt aus dem Kodebuch)

Kode	Häufig- keit	Dichte	Kodegruppen
The Netherlands	3	0	Country
Canada	2	0	Country
England	2	0	Country
Brazil	1	0	Country
Iran	1	0	Country
Texas, USA	1	0	Country
Expert Interviews	8	0	Data Sources
Observation	8	0	Data Sources
Historical Data	4	0	Data Sources
Electronic Health Records	2	0	Data Sources
Inhouse Tracking S/W	2	0	Data Sources
Internal Database	2	0	Data Sources
Staff Survey	2	0	Data Sources
Machine Records	1	0	Data Sources
Model Calibration	1	0	Data Sources
Distribution_Patient Arrivals	17	0	Distribution
Distribution_Patient Attributes	10	0	Distribution
Distribution_Interarrival times	5	0	Distribution
Distribution_Treatment Mix per LINAC	3	0	Distribution
Distribution_Dropouts	2	0	Distribution
Distribution_Arrival time de- viation from scheduled time	1	0	Distribution
Distribution_Planned Delay	1	0	Distribution
Distribution_Process Interrup- tions_Duration	1	0	Distribution
Distribution_Process Interrup- tions_Frequency	1	0	Distribution
Distribution_Scheduling of first fraction	1	0	Distribution
Distribution_Slots with dupli- cated schedules	1	0	Distribution
Distribution_Technician called away	1	0	Distribution
Distribution_Time between unscheduled Patients	1	0	Distribution
Distribution_Uniform	15	0	Distribution Functions
Distribution_Deterministic	11	0	Distribution Functions
Distribution_Empirical	10	0	Distribution Functions
Distribution_Exponential	7	0	Distribution Functions
Distribution_Normal	5	0	Distribution Functions

---

Distribution_Poisson	5	0	Distribution Functions
Distribution_Gamma	2	0	Distribution Functions
Distribution_Lognormal	2	0	Distribution Functions
Distribution_Probability	2	0	Distribution Functions
Distribution_Triangular	2	0	Distribution Functions
Distribution_Beta	1	0	Distribution Functions
Distribution_Conditional Probability	1	0	Distribution Functions
Radiation Oncologist	21	0	Human Resources
Physicist	10	0	Human Resources
Dosimetrist	8	0	Human Resources
Radiation Therapist	6	0	Human Resources
Receptionist	3	0	Human Resources
CT Simulation Therapist	2	0	Human Resources
Imaging Technicians	2	0	Human Resources
Radiation Technologist	2	0	Human Resources
Technician	2	0	Human Resources
Administrator Staff	1	0	Human Resources
Clinical Physicians	1	0	Human Resources
Servants	1	0	Human Resources
Staff_Brachytherapy	1	0	Human Resources
Technician_LINAC	1	0	Human Resources
Specialisation_RO	6	0	Human Resources
Specialisation_RT	3	0	Human Resources
Availability_Machine Other	5	0	Input Parameters
# Machines_Other	4	0	Input Parameters
# scheduled patients/day	2	0	Input Parameters
Staff Salary	2	0	Input Parameters
Average Number of Patients requiring treatment per week	1	0	Input Parameters
Average RTTT	1	0	Input Parameters
capacity	1	0	Input Parameters
Capacity_OPD	1	0	Input Parameters
Percentage of Rework or Alternate Paths	1	0	Input Parameters
Percentage Patient No Shows	1	0	Input Parameters
Availability_LINAC	8	0	Input Parameters
Availability_Center (opening hours)	4	0	Input Parameters
Availability_CT	4	0	Input Parameters
Availability_Machines	1	0	Input Parameters
Availability_Staff	12	0	Input Parameters
Availability_RO	10	0	Input Parameters
			Input_Availability Machines
			Input_Availability Machines
			Input_Availability Machines
			Input_Availability Machines
			Input_Availability Staff
			Input_Availability Staff

---

---

# LINAC	9	0	Input Parameters Input_Number of Machines
# CT Simulator	6	0	Input Parameters Input_Number of Machines
# Rooms	4	0	Input Parameters Input_Number of Machines
# CT Scanner	2	0	Input Parameters Input_Number of Machines
# Simulator	2	0	Input Parameters Input_Number of Machines
# RO	7	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# dosimetrist	3	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# Physicists	3	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# Radiation therapy technologists	2	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# receptionists	2	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# Technician	2	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# Administrator Staff	1	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# Clinical Physicians	1	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# CT simulation therapists	1	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# radiation technologists	1	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# radiographer	1	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# Servants	1	0	Input Parameters Input_Number of Staff
# Technician_LINAC	1	0	Input Parameters Input_Number of Staff
Duration_Task	20	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Treatment Session	8	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Contour RO	3	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Consultation	2	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Scanning	2	0	Input Parameters Input_Task Duration
Length_Schedule Slot	2	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Length of stay	1	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Mould Testing	1	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Planning	1	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Radiographer	1	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Simulator	1	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Task Physicist	1	0	Input Parameters Input_Task Duration
Duration_Task RO	1	0	Input Parameters Input_Task Duration

---

---

Hospital	7	0	Institution
University Hospital	7	0	Institution
Local Radiotherapy Center	1	0	Institution
Outpatient Center	1	0	Institution
Private Hospital	1	0	Institution
KPI_Utilisation	14	0	Key Performance Indicators
KPI_Personnel Costs	5	0	Key Performance Indicators
KPI_Patient Throughput	4	0	Key Performance Indicators
KPI_Percentage of first fraction rebooks	2	0	Key Performance Indicators
KPI_Length of Stay	12	4	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Patient Waiting Time	8	3	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Exit Time Last Patient	5	2	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Process Delay (PD)	3	2	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Time per stage	3	2	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Total Waiting Time	1	3	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Time	0	14	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Percentage Access Time within target date	12	2	Key Performance Indicators KPI_Time
KPI_Access Time	11	4	Key Performance Indicators KPI_Time KPI_Time Until First Fraction
KPI_Average Planning Time	10	4	Key Performance Indicators KPI_Time KPI_Time Until First Fraction
KPI_Waiting Time	10	3	Key Performance Indicators KPI_Time KPI_Time Until First Fraction
KPI_RTTT	8	3	Key Performance Indicators KPI_Time KPI_Time Until First Fraction
KPI_Percentage RTTT within target date	5	2	Key Performance Indicators KPI_Time KPI_Time Until First Fraction
KPI_Percentage Patients breaching waiting time target	4	2	Key Performance Indicators KPI_Time KPI_Time Until First Fraction
KPI_Time to Consultation	2	2	Key Performance Indicators KPI_Time KPI_Time Until First Fraction
Consultation until Treatment including	2	0	Model Scope
Patient Flow from Check-In to Departure on a treatment visit	2	0	Model Scope
Referral until treatment (including)	2	0	Model Scope
Consultation until first treatment	1	0	Model Scope
From tumor localization until plan completion	1	0	Model Scope

---

---

Patient Flow from Arrival to Departure for any type of visit	1	0	Model Scope
Referral to treatment start	1	0	Model Scope
Care Pathway	12	0	Patient Attributes
Priority	6	0	Patient Attributes
# treatment sessions	5	0	Patient Attributes
Cancer Type	4	0	Patient Attributes
Inpatient or Outpatient	3	0	Patient Attributes
Treatment Technique	3	0	Patient Attributes
RO_assigned	2	0	Patient Attributes
Treatment Intent	2	0	Patient Attributes
Arrival Time	1	0	Patient Attributes
Attended to by own Doctor	1	0	Patient Attributes
Cosultation Type	1	0	Patient Attributes
Imaging Technique	1	0	Patient Attributes
Mould required	1	0	Patient Attributes
patient delay	1	0	Patient Attributes
Planned Delay before pre-treatment	1	0	Patient Attributes
Process anticipation (earlier than scheduled)	1	0	Patient Attributes
Process delay (later than scheduled)	1	0	Patient Attributes
Return the next day	1	0	Patient Attributes
scheduled time	1	0	Patient Attributes
Simulator Type	1	0	Patient Attributes
Start of treatment date	1	0	Patient Attributes
Start time of treatment	1	0	Patient Attributes
Treatment Duration	1	0	Patient Attributes
Treatment Location	1	0	Patient Attributes
Unique ID	1	0	Patient Attributes
LINAC	10	0	Physical Resources
CT Simulator	6	0	Physical Resources
CT Scanner	5	0	Physical Resources
Rooms	4	0	Physical Resources
Simulator	3	0	Physical Resources
Machines_Other	2	0	Physical Resources
Mould Room	2	0	Physical Resources
equipment	1	0	Physical Resources
facilities	1	0	Physical Resources
Consultation_RO	8	0	Process Steps
Treatment Planning	8	0	Process Steps
Treatment	7	0	Process Steps
Contour_RO	6	0	Process Steps
Simulation	6	0	Process Steps
Dosimetry	4	0	Process Steps
Independent Plan Verification	3	0	Process Steps

---

---

Patient Waiting	3	0	Process Steps
Check-In	2	0	Process Steps
CT Scan	2	0	Process Steps
Independent Treatment Verifi- cation	2	0	Process Steps
Mould	2	0	Process Steps
Other Appointments	2	0	Process Steps
Physicist_Planning	2	0	Process Steps
Physics QA	2	0	Process Steps
Approval_RO	1	0	Process Steps
Blocks	1	0	Process Steps
Contour_Therapist	1	0	Process Steps
CT_QA	1	0	Process Steps
Imaging	1	0	Process Steps
Physics_Consult	1	0	Process Steps
Plan into Machine	1	0	Process Steps
Printing	1	0	Process Steps
RO_Verification	1	0	Process Steps
DES	12	0	Simulation Method
Queuing Theory	3	0	Simulation Method
Integer Linear Programming (ILP)	2	0	Simulation Method
Optimisation	2	0	Simulation Method
Arena	2	0	Simulation Software
WhatIf_Combination Scenario	3	1	What If Scenarios
WhatIf_More Standard Plans	3	1	What If Scenarios
WhatIf_Less Patients by Own Doctor	2	1	What If Scenarios
WhatIf	0	39	What If Scenarios
WhatIf_More/Less Staff	0	9	What If Scenarios
WhatIf_Resource Changes	0	6	What If Scenarios
WhatIf_More/Less Machines	0	5	What If Scenarios
WhatIf_Changes in Availabil- ity/Capacity	0	4	What If Scenarios
WhatIf_Changes in Patient Arrivals	0	4	What If Scenarios
WhatIf_Changes in Producti- vity	0	4	What If Scenarios
WhatIf_Increase Staff Quali- fication	0	3	What If Scenarios
WhatIf_Scenarios	0	3	What If Scenarios
WhatIf_More LINAC capacity	5	2	What If Scenarios
			Testgruppe
WhatIf_Enhance CT and LINAC availability	2	3	What If Scenarios
			Testgruppe
			WhatIf_Changes in Availability/Capacity
WhatIf_Enhance Availability of staff and machines	1	4	What If Scenarios
			Testgruppe
			WhatIf_Changes in Availability/Capacity

---

WhatIf_Increase Oncologist Productivity	4	2	What If Scenarios Testgruppe WhatIf_Changes in Productivity
WhatIf_Less LINAC capacity	3	2	What If Scenarios WhatIf_Changes in Availability/Capacity
WhatIf_Enhance Radiooncologist Availability	2	2	What If Scenarios WhatIf_Changes in Availability/Capacity
WhatIf_Automatic Machine Breakdown	1	2	What If Scenarios WhatIf_Changes in Availability/Capacity
WhatIf_More patient arrivals	11	2	What If Scenarios WhatIf_Changes in Patient Arrivals
WhatIf_Less Patient Arrivals	4	2	What If Scenarios WhatIf_Changes in Patient Arrivals
WhatIf_Increase CT process time	2	2	What If Scenarios WhatIf_Changes in Patient Arrivals
WhatIf_Decrease Oncologist Productivity	2	1	What If Scenarios WhatIf_Changes in Productivity
WhatIf_double Radiation Therapist task time	2	1	What If Scenarios WhatIf_Changes in Productivity
WhatIf_Enhance Specialisation_RTT	4	2	What If Scenarios WhatIf_Increase Staff Qualification
WhatIf_Enhance Specialisation_RO	2	2	What If Scenarios WhatIf_Increase Staff Qualification
WhatIf_Less CT machines	3	2	What If Scenarios WhatIf_Less Equipment WhatIf_More/Less Machines
WhatIf_Less Radiation Therapy Technologists	6	2	What If Scenarios WhatIf_Less Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_Less physicists	4	2	What If Scenarios WhatIf_Less Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_Less dosimetrists	3	2	What If Scenarios WhatIf_Less Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_More LINACs	7	2	What If Scenarios WhatIf_More Equipment WhatIf_More/Less Machines
WhatIf_More CT machines	5	2	What If Scenarios WhatIf_More Equipment WhatIf_More/Less Machines
WhatIf_More simulators	2	2	What If Scenarios WhatIf_More Equipment WhatIf_More/Less Machines
WhatIf_More dosimetrists	4	2	What If Scenarios WhatIf_More Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_More Radiation Therapy Technologists	4	2	What If Scenarios WhatIf_More Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_More oncologists	3	2	What If Scenarios WhatIf_More Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_More phycisists	3	2	What If Scenarios WhatIf_More Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_More Planners	2	2	What If Scenarios WhatIf_More Staff WhatIf_More/Less Staff
WhatIf_Increase of Pull Patients	5	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes

---

WhatIf_Increase Length_Schedule Slot	4	2	What If Scenarios
WhatIf_Optimized doctors' scheme	3	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Slot Duplication_false	3	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Slot Duplication_true	3	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Spreading consultation slots throughout the week	3	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Balancing doctor availability for contouring	2	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Consistent Oncologist Delays	2	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_No pre-allocated CT time slots	2	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_No RO_Contouring time slots	2	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Scheduling Adaptation	2	2	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Less variance in OPD Capacity	2	1	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
Radiation Oncologist Scheduling	0	7	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
Changes_Scheduling Concept	0	5	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
Changes_Scheduling Slot	0	5	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Changes in Scheduling	0	3	What If Scenarios WhatIf_Scheduling Changes
WhatIf_Scheduling Changes	0	4	WhatIf_Scheduling Changes
Model Scope	20	0	
Research Objective	18	0	
Other Treatment Methods	2	0	

---



## A.4 Tabellen zur strukturierten Inhaltsanalyse

Tabelle 11: Modellierter Prozessschritte in Abhängigkeit von Modellumfang und Publikation. Es wurden vier verschiedene Modellumfänge identifiziert: Modellierung der Schritte von Überweisung bis zur Bestrahlung, von erster Konsultation bis zur Bestrahlung, nur Prozessschritte der Planung oder Prozessschritte, die während eines Patientenbesuchs in der Klinik an und mit dem Patienten stattfinden.

Modellumfang → Publikation	Überweisung bis Bestrahlung			Konsultation bis Bestrahlung			Nur Planung			Tagesbesuch Patient		
	Babashov et al.	Bikker et al.	Proctor et al.	Joustra et al.	Kapamara et al.	Vieira et al.	Werker et al.	Hosseini et al.	Miranda et al.	Famiglietti et al.		
Prozessschritte												
Check-in								x			x	
Konsultation	x	x		x	x			x				
CT und Simulation	x	x	x		x	x		x				
Konturierung	x	x				x						
Bestrahlungsplanung	x	x	x	x	x	x		x				
Kontrolle und Freigabe	x		x		x			x				
Bestrahlung	x	x	x	x	x			x	x			x

Tabelle 12: Kookkurrenz von Prozessdauern in der Strahlentherapie und Verteilungsfunktionen, die diese Dauern beschreiben. Gr steht für Groundedness, d.h. die Häufigkeit der Verwendung des Codes in den untersuchten Publikationen. ‚Aufgabe‘ beschreibt zusammengefasste oder nicht weiter spezifizierte Prozessschritte.

Prozess- dauer	Dauer										Summe	
	Konsultation Gr=2	Kontur Gr=3	Masken Testen Gr=1	Planung Gr=1	Scan Gr=2	Simulator Gr=1	Aufgabe Gr=20	Bestrahlung Gr=8				
Verteilung												
Uniform Gr=15	0	3	0	1	1	1	1	6	1			13
Deterministisch Gr=11	2	1	1	0	1	0	0	4	1			10
Lognormal Gr=2	0	0	0	0	0	0	0	1	1			2
Normal Gr=5	0	0	0	0	0	0	0	2	0			2
Triangulär Gr=2	0	0	0	0	0	0	0	2	0			2
Beta Gr=1	0	0	0	0	0	0	0	0	1			1
Empirisch Gr=8	0	0	0	0	0	0	0	1	0			1

## **A.5 Was-Wäre-Wenn Szenarien**

Nachfolgend befinden sich die Codebäume der Was-wäre-wenn Szenarien der Kategorien Ressourcen und Terminplanung. Sie wurden mit der Analysesoftware Atlas.ti erstellt und stellen die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Codes dar. Innerhalb eines Schaubildes stellt Gleichfarbigkeit die Zugehörigkeit zur gleichen Unterkategorie dar. Titel der Kategorien und Unterkategorien sind grau unterlegt.

G steht für Groundeness und erklärt, wie oft dieses Szenario in den Publikationen kodiert wurde und ist ein Maß für die Wichtigkeit dieses Szenarios. D steht für Density und beschreibt, wie oft der jeweilige Code mit anderen Codes in Zusammenhang gesetzt wurde.

Nachfolgend findet sich Tabelle 13 mit den Kookkurenzen zwischen den häufigsten Leistungskennzahlen und den betrachteten Was-wäre-wenn Szenarien, die aus der Kodierung der Publikationen hervorgehen.

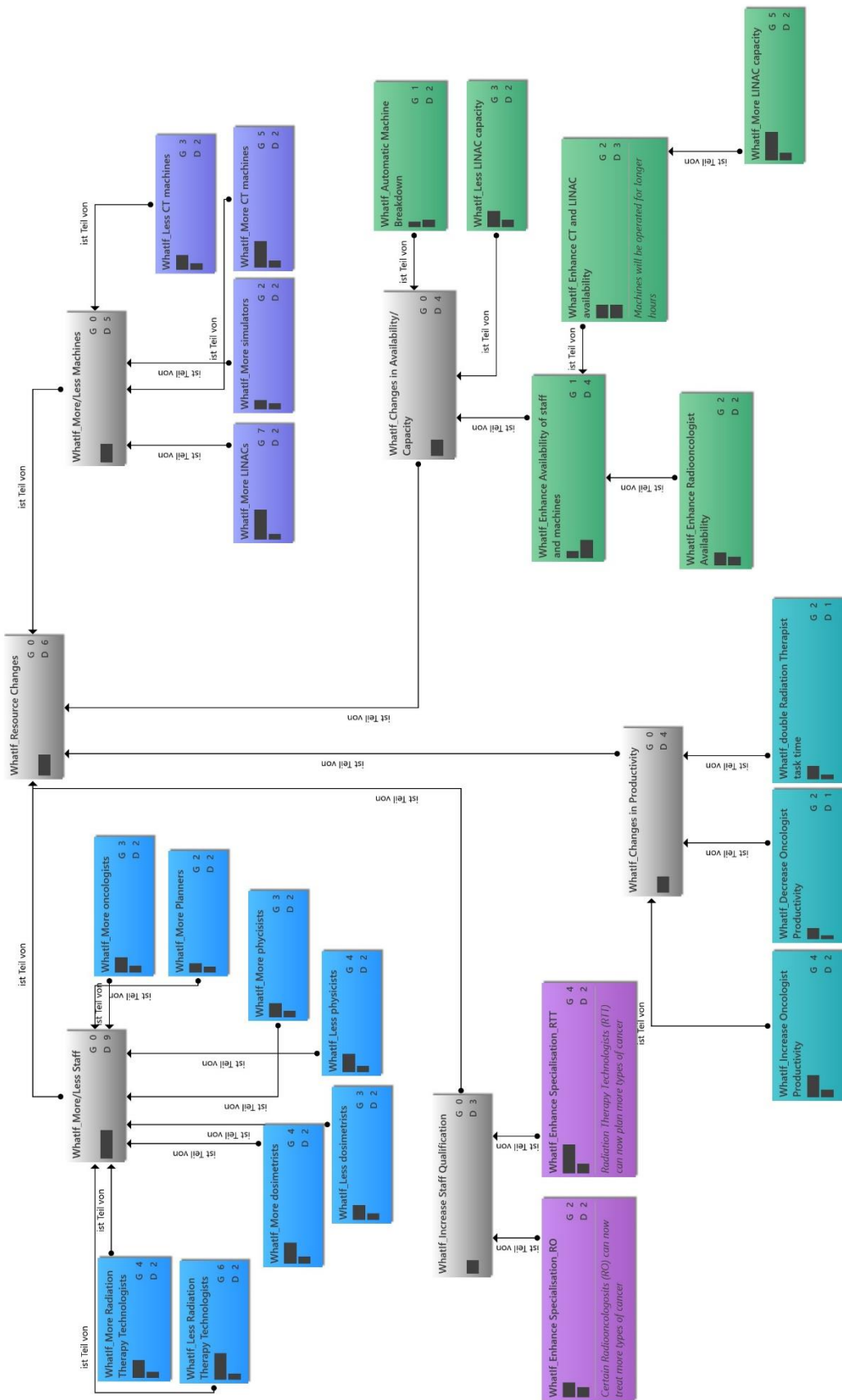


Bild 16: Kodebaum der Was-Wäre-Wenn Szenarien der Kategorie Ressourcen

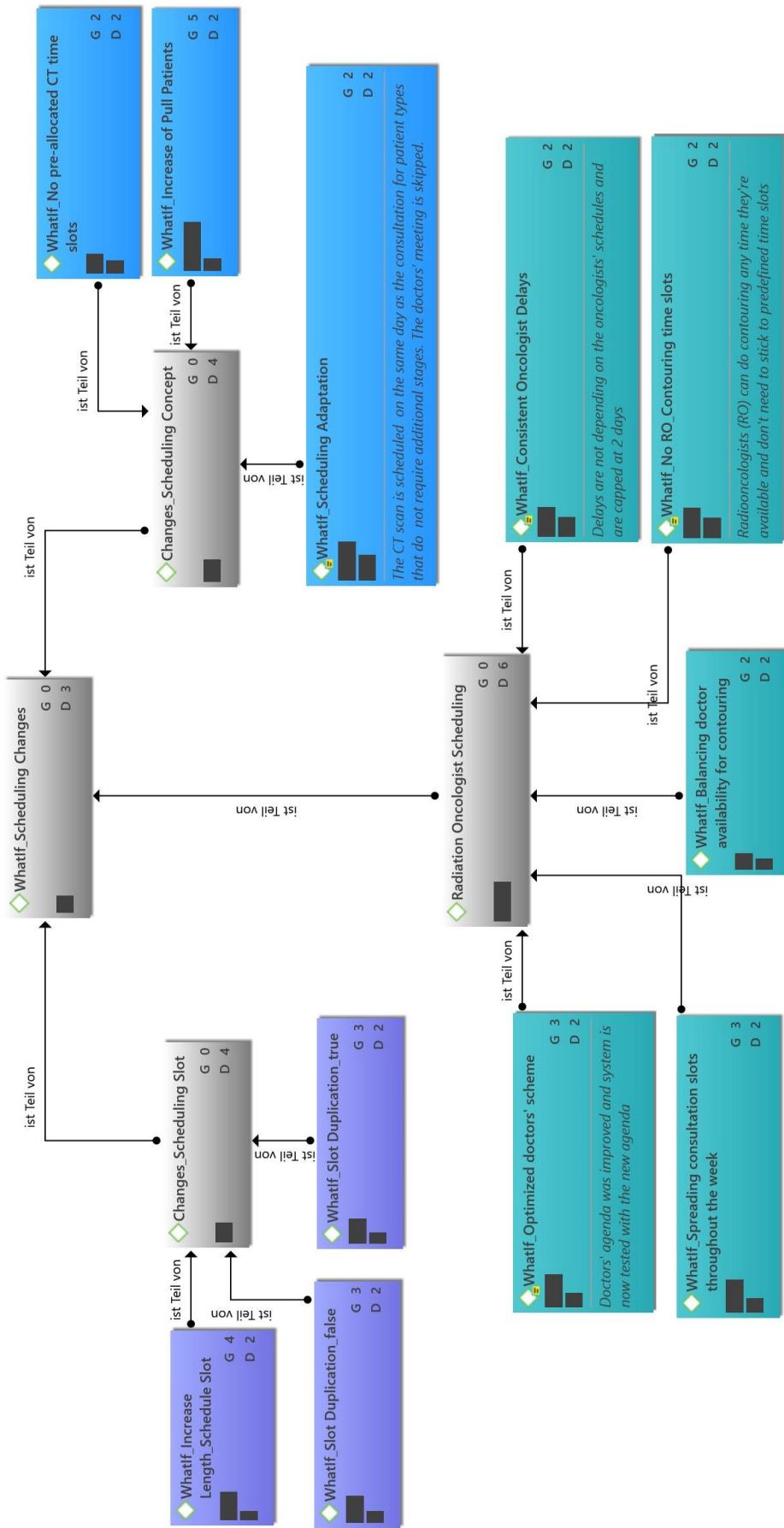


Bild 17: Kodebaum der Was-Wäre-Wenn Szenarien der Kategorie Terminplanung

Tabelle 13: Was-wäre-wenn Szenarien (What If Scenario) und die mit ihnen im Zusammenhang am häufigsten betrachteten Leistungskennzahlen (Key Performance Indicator). Hierbei ist zu beachten, dass eine Kodierung mit einer Leistungskennzahl gleichzeitig mit mehreren Was-wäre-Wenn-Szenarien verknüpft sein kann. Die Summen geben die Anzahl der Kookkurenzen an und nicht notwendigerweise die Anzahl der einzelnen Kodierungen.

Key Performance Indicator \ What If Scenario	RTTT	Access Time	Average Planning Time	Waiting Time	Sum
WhatIf_Less Radiation Therapy Technologists	4	2	0	1	7
WhatIf_More patient arrivals	4	2	0	0	6
WhatIf_More dosimetrists	6	0	0	0	6
WhatIf_More LINAC capacity	4	0	2	0	6
WhatIf_Increase of Pull Patients	0	2	0	3	5
WhatIf_More LINACs	0	0	4	0	4
WhatIf_More CT machines	4	0	0	0	4
WhatIf_Less CT machines	4	0	0	0	4
WhatIf_Less dosimetrists	4	0	0	0	4
WhatIf_Less LINAC capacity	4	0	0	0	4
WhatIf_Less physicists	4	0	0	0	4
WhatIf_More oncologists	4	0	0	0	4
WhatIf_More phycisists	4	0	0	0	4
WhatIf_More Radiation Therapy Technologists	4	0	0	0	4
WhatIf_No pre-allocated CT time slots	0	1	0	2	3
WhatIf_Spreading consultation slots throughout the week	0	1	0	2	3
WhatIf_Less Patient Arrivals	0	2	0	0	2
WhatIf_Less Patients by Own Doctor	0	0	2	0	2
WhatIf_Less variance in OPD Capacity	0	0	2	0	2
WhatIf_More simulators	0	0	2	0	2
WhatIf_Automatic Machine Breakdown	0	1	0	1	2
WhatIf_Balancing doctor availability for contouring	0	1	0	1	2
WhatIf_Enhance Availability of staff and machines	0	1	0	1	2
WhatIf_Increase Oncologist Productivity	0	1	0	0	1

---

WhatIf_Consistent Oncologist Delays	0	1	0	0	1
WhatIf_Decrease Oncologist Productivity	0	1	0	0	1
WhatIf_double Radiation Therapist task time	0	1	0	0	1
WhatIf_Enhance Radiooncologist Availability	0	1	0	0	1
WhatIf_Enhance Specialisation_RTT	0	1	0	0	1
WhatIf_More Standard Plans	0	1	0	0	1
Sum	50	20	12	11	

---





## A.6.2 Fragebogen

Aufgrund der Vielfalt von Behandlungen und Patienten wird es zu einigen Fragen keine exakten Antworten geben. Geben Sie hier bitte Bereiche an, gerne auch der Art "zwischen 5 und 15 Minuten, meistens allerdings 10 Minuten". Wenn nötig, schätzen Sie bitte!

Herzlichen Dank für Ihre Zeit und Unterstützung!

Frage	Antwort	Bemerkung
<b>1. Wie viele Stunden am Tag und Tage in der Woche ist ihr Zentrum zur Behandlung von Patienten geöffnet?</b>		
<b>2. Wie viele Linearbeschleuniger besitzt Ihr Zentrum?</b>		
<b>3. Wie viele CT-Geräte besitzt Ihr Zentrum?</b>		
<b>4. Wie viele Mitarbeiter (Vollzeitäquivalente à 40 h/Woche) der folgenden Berufsgruppen besitzt Ihr Zentrum?</b>		
Strahlentherapeuten/innen		
MTRA		
Medizinphysiker/innen		
MFA, die in der Anmeldung/Patientenaufnahme arbeiten		
<b>5. Wie viele Patienten kommen im Schnitt pro Tag oder pro Jahr (bitte angeben) zur/zum</b>		
Erstgespräch mit Strahlentherapeut/in		
Planungs-CT		
Ersteinstellung/Erstbestrahlung		
Folgebestrahlung		
Abschlussuntersuchung		
Nachsorgeuntersuchung		
<b>6. Wie viele Minuten verbringt ein/e Patient/in bei folgenden Terminen? (Angaben von Bereichen (z.B. 5-10 Minuten oder ähnliches) sind möglich!)</b>		
Patientenaufnahme/Anmeldung/Terminvergabe		
Erstgespräch mit Strahlentherapeut/in		
Planungs-CT inklusive Positionierung		
Ersteinstellung/Erstbestrahlung inklusive Positionierung		
eine Folgebestrahlung inklusive Positionierung		
Abschlussuntersuchung		
eine Nachsorgeuntersuchung		
<b>7. Wie viele Minuten verbringt ein/e MTRA im Schnitt mit folgenden Aufgaben?</b>		
Vorbereitung <u>einer</u> Bestrahlung		
Nachbereitung <u>einer</u> Bestrahlung		
Vorbereitung <u>eines</u> CT Scans		
Nachbereitung <u>eines</u> CT Scans		
<b>8. Wie viele Minuten verbringt ein/e MFA im Schnitt mit der Nachbereitung <u>einer</u> Patientenaufnahme/Anmeldung (Zeit, in der keine andere Anmeldung bearbeitet werden kann)?</b>		
<b>9. Wie viele Minuten verbringt ein/e MPE im Schnitt mit <u>einer</u> Ersteinstellung?</b>		

<b>10. Ist bei der Ersteinstellung/Erstbestrahlung folgende Berufsgruppe die ganze Zeit anwesend? Wenn nein, wieviel der Zeit?</b>		
Strahlentherapeut/in		
MTRA		
MPE		
<b>11. Nur ein Teil der Aufgaben jeden Mitarbeiters ist im Modell vertreten. Wieviel Zeit eines Arbeitstages verbringt ein/e</b>		
Strahlentherapeut/in mit Erstgesprächen + Ersteinstellungen + Abschlussuntersuchungen + Nachsorgeuntersuchungen zusammen		
MTRA mit der Durchführung von CT Scans + Ersteinstellungen + Folgebestrahlungen zusammen		
MPE mit Ersteinstellungen		
MFA mit Anmeldungen/Patientenannahmen		
<b>12. Welche Behandlungsarten werden trotz einer bekannten COVID-19-Infektion durchgeführt? (Angabe als ja/nein)</b>		
Erstgespräch mit Strahlentherapeut		
Planungs-CT		
Ersteinstellung/Erstbestrahlung		
Folgebestrahlung		
Abschlussuntersuchung		
Nachsorgeuntersuchung		

### A.7 Grundriss einer Strahlentherapieeinrichtung

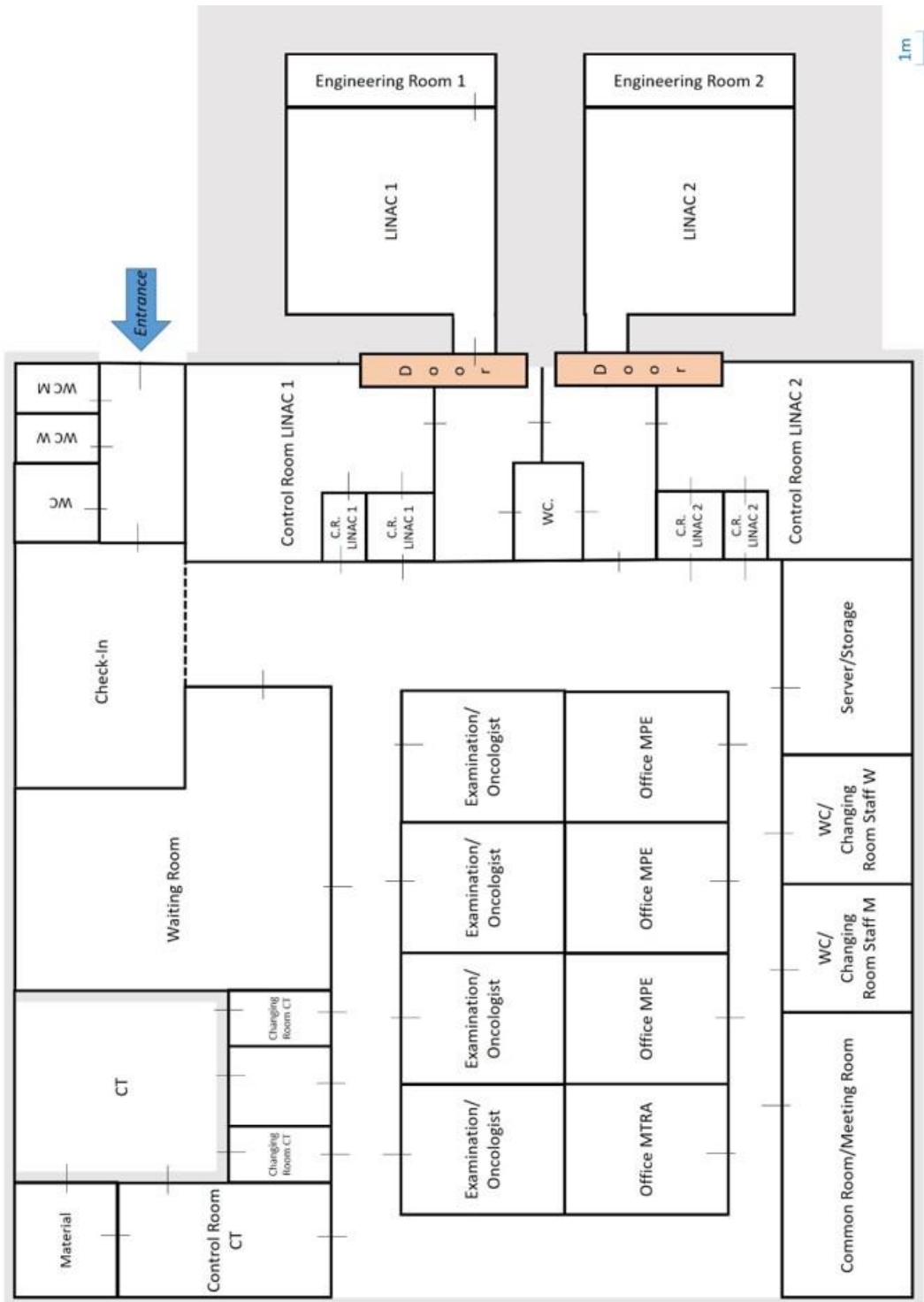


Bild 18: Eigener Entwurf eines Grundrisses einer Strahlentherapieeinrichtung in Grundausrüstung.

## **A.8 Grafische Oberfläche in AnyLogic**

In diesem Abschnitt befinden sich exemplarisch einige Ausschnitte der grafischen Oberfläche des vorliegenden Modells in AnyLogic.

Zur besseren Lesbarkeit wurde die Modellgrafik in zwei Teile geteilt und auf zwei aufeinanderfolgenden Seiten dargestellt (Bild 19 und Bild 20). Anhand der Grafik kann der Lauf eines Patienten durch das Modell verfolgt werden. Die Zahlen an den einzelnen Bausteinen geben an, wie viele Patienten sich derzeit in diesem Block befinden, bzw. ihn betreten oder verlassen haben. Eine dunkelblaue Färbung zeigt, dass das Element gerade aktiv ist.

Bild 21 zeigt einen Ausschnitt der Verteilungen, die angelegt wurden, um das Modellgeschehens in Echtzeit zu verfolgen und zu verifizieren. Die 3D Visualisierung der Prozesse in der modellierten Strahlentherapiepraxis findet sich in Bild 22.

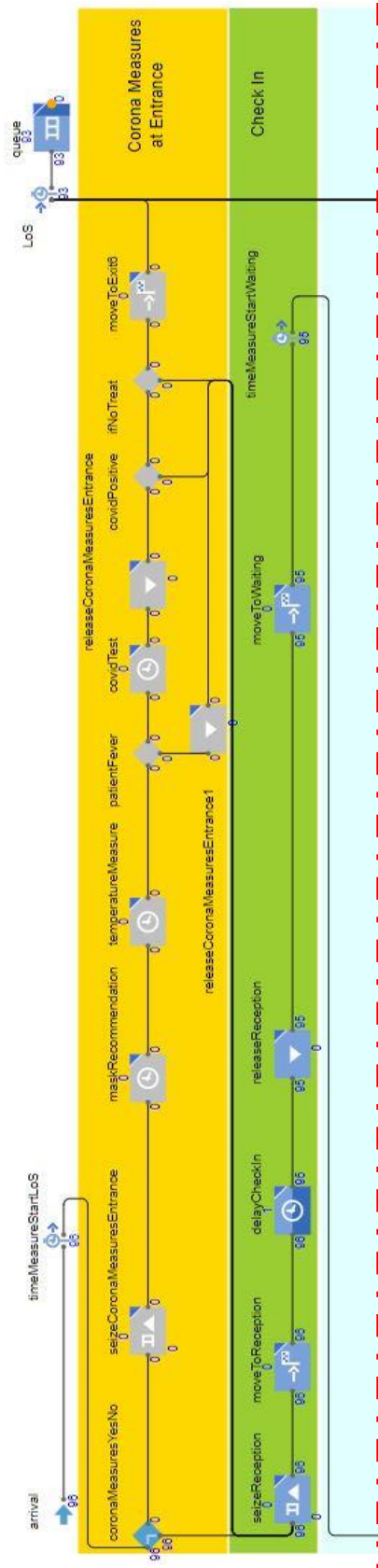


Bild 19: (Teil 1 von 2) Modellgrafik in AnyLogic. Zur besseren Lesbarkeit wurde die Grafik an der rot gestrichelten Linie geteilt und vergrößert. Teil 2 befindet sich in Bild 20.

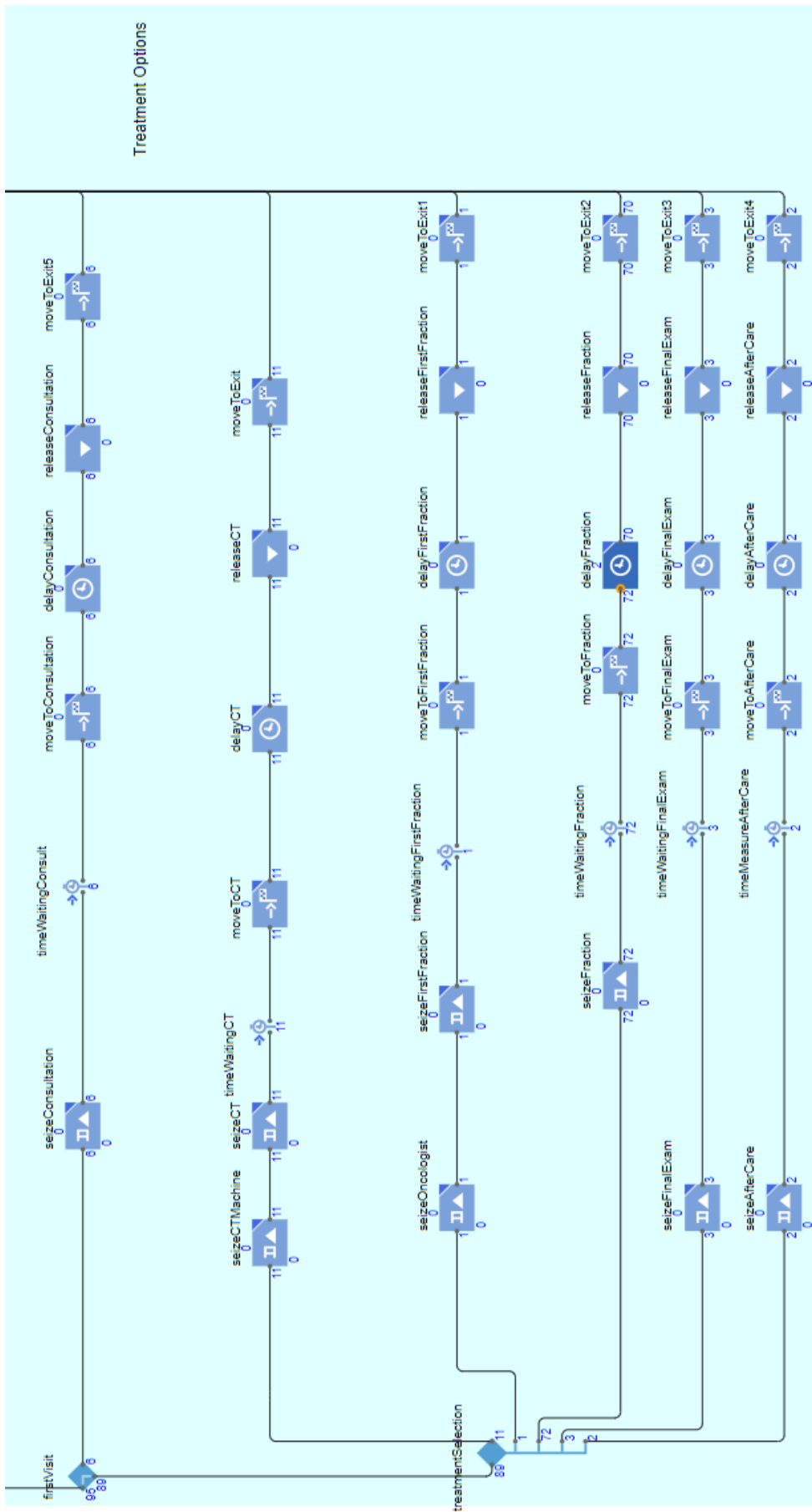


Bild 20: (Teil 2 von 2) Modellgrafik in AnyLogic.

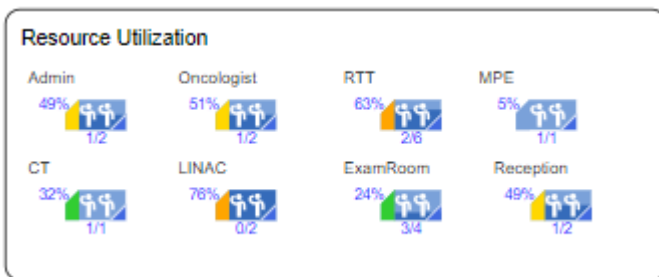


Bild 21 Ausschnitt aus der Modelloberfläche für einen einzelnen Lauf. Es können zeitliche Verteilungen für einzelne Behandlungspfade (oben) und die Ressourcenauslastung (unten) in Echtzeit verfolgt werden.

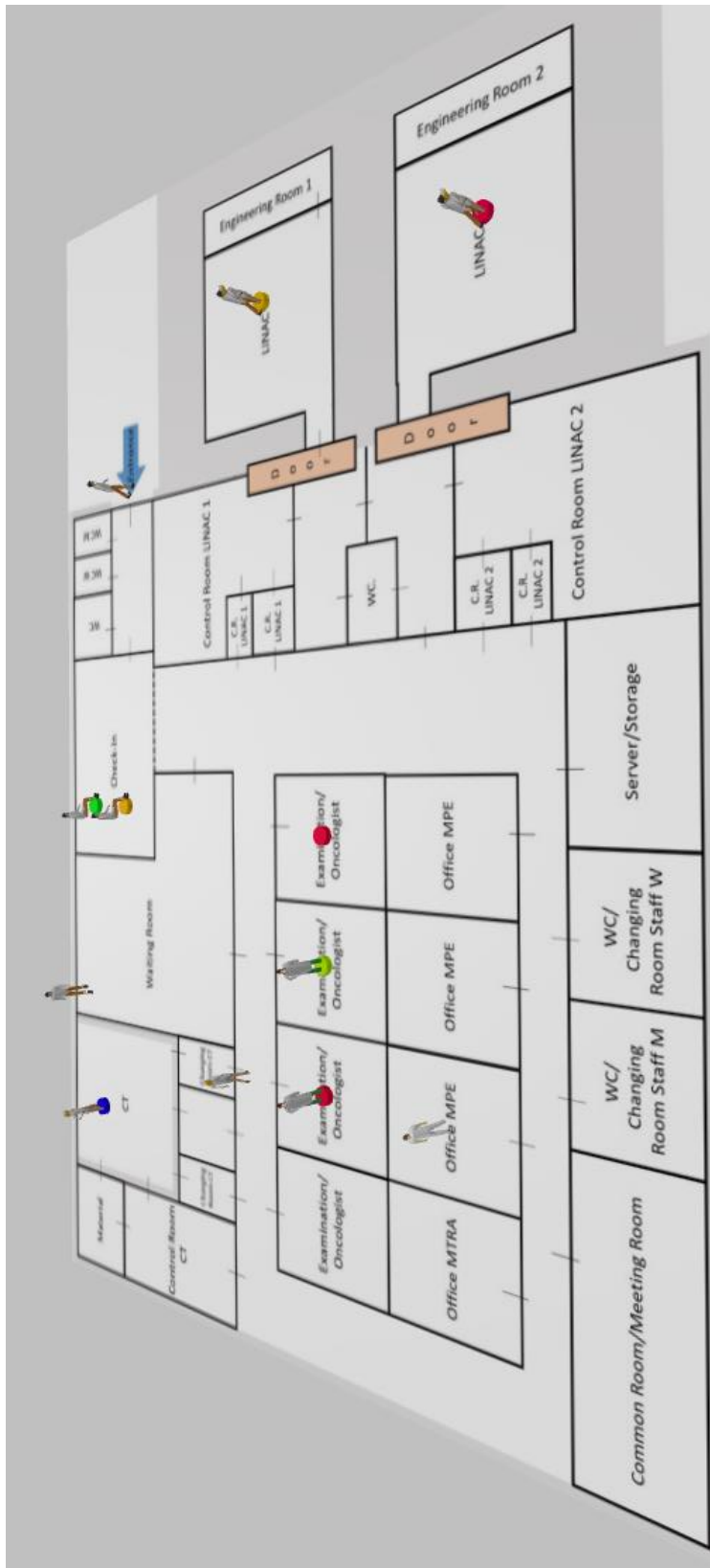


Bild 22: 3D-Visualisierung der modellierten Strahlentherapiepraxis.



## A.9 Bestimmung der Anzahl der Simulationsläufe

Tabelle 14: Kumulativer Mittelwert der Wartezeit in Minuten pro Behandlungspfad in Abhängigkeit der Anzahl der Simulationsläufe.

Number of Runs	Fraction	First Fraction	Consultation	CT	After Care	Final Exam
10	1.1	1.5	0.2	1	0.6	0.9
50	1.0	1.5	0.2	0.9	0.5	0.6
100	0.9	1.5	0.2	0.9	0.4	0.6
150	0.9	1.6	0.2	0.9	0.4	0.5
200	0.9	1.6	0.2	0.9	0.4	0.5
250	0.9	1.6	0.2	0.9	0.4	0.4
300	0.8	1.6	0.2	0.9	0.4	0.4
400	0.8	1.6	0.2	0.9	0.4	0.4

Tabelle 15: Kumulativer Mittelwert der Verweildauer in Minuten pro Behandlungspfad in Abhängigkeit der Anzahl der Simulationsläufe.

Number of Runs	Fraction	First Fraction	Consultation	CT	After Care	Final Exam
10	12.7	21	53	21	15	16
50	12.6	22	53	21	15	16
100	12.6	22	52	21	15	15
150	12.5	22	52	21	15	15
200	12.5	22	52	21	15	15
250	12.5	22	52	21	15	15
300	12.5	22	52	21	15	15
400	12.5	22	52	21	15	15

## A.10 Datentabellen der Auswertung

### A.10.1 Wartezeiten der Patienten

Patientenwartezeiten für alle Behandlungen einzeln und kumuliert. Angabe von Mittelwert, Standardabweichung, Maximum und Minimum in Minuten.

Baseline	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	0.2	0.6	7.9	0.0
CT	0.9	0.9	5.6	0.4
First Fraction	1.6	1.8	13.9	0.3
Fraction	0.8	1.4	14.9	0.1
Final Exam	0.3	1.0	10.0	0.0
After Care	0.3	1.1	11.0	0.0
CheckIn	0.09	0.4	4.5	0
All Patients	0.8	1.4	14.9	0.0

Scenario 1	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	20.6	25.9	170.0	0.0
CT	0.9	0.9	5.2	0.4
First Fraction	22.7	25.3	157.8	0.3
Fraction	0.9	1.7	21.4	0.1
Final Exam	24.3	26.8	148.6	0.0
After Care	24.8	27.0	176.0	0.0
CheckIn				
All Patients	3.2	11.0	176.0	0.0

Scenario 2	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	0.2	0.7	11.2	0.0
CT	3.4	2.2	11.9	0.4
First Fraction	3.1	2.3	18.4	0.3
Fraction	16.4	16.8	90.0	0.1
Final Exam	0.4	1.2	10.3	0.0
After Care	0.4	1.1	13.0	0.0
CheckIn				
All Patients	13.7	16.2	90.0	0.0

Scenario 3	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	0.2	0.5	4.2	0.0
CT	6.5	5.3	32.5	0.5
First Fraction	6.3	4.8	30.1	0.3
Fraction	220.0	108.4	424.3	0.1
Final Exam	0.3	1.2	12.7	0.0
After Care	0.4	1.0	9.9	0.0
CheckIn				
All Patients	146.7	135.3	424.3	0.0

Scenario 4	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	10.9	9.5	52.1	0.0
CT	13.1	9.5	54.1	0.4
First Fraction	11.6	9.2	50.6	0.3
Fraction	12.4	10.4	57.4	0.1
Final Exam	11.1	9.4	54.5	0.0
After Care	10.5	9.6	47.1	0.0
CheckIn	10.8	10.1	57.0	0
All Patients	12.3	12.3	57.4	0.0

Scenario 5	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	0.2	0.7	10.2	0.0
CT	0.9	0.9	5.5	0.4
First Fraction	4.2	2.6	18.2	0.3
Fraction	112.3	66.6	278.6	0.1
Final Exam	0.3	0.9	8.1	0.0
After Care	0.3	1.1	14.1	0.0
CheckIn				
All Patients	83.8	75.3	278.6	0.0

Scenario 6	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	27.2	26.5	147.0	0.0
CT	14.6	9.6	64.7	0.4
First Fraction	30.6	27.1	154.1	0.3
Fraction	23.4	17.8	121.2	0.1
Final Exam	30.6	27.6	150.3	0.0
After Care	31.0	29.0	161.2	0.0
CheckIn	10.4	10.0	64.3	0
All Patients	23.3	18.9	161.2	0.0

Scenario 7	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	1.5	1.9	18.0	0.1
CT	3.0	2.5	23.9	0.6
First Fraction	2.9	2.5	21.8	0.4
Fraction	2.4	3.1	32.6	0.3
Final Exam	1.7	2.3	27.2	0.1
After Care	1.6	2.0	12.7	0.1
CheckIn	0.5	1.1	13.4	0.0
All Patients	2.4	3.0	32.6	0.1

Scenario 8	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	22.4	25.3	183.2	0.1
CT	2.9	2.6	29.9	0.6
First Fraction	25.5	26.6	144.4	0.5
Fraction	2.4	3.2	33.6	0.3
Final Exam	26.5	27.2	154.2	0.2
After Care	27.5	28.0	151.4	0.1
CheckIn				
All Patients	4.8	11.4	183.2	0.1

Scenario 9	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	1.6	2.4	33.8	0.1
CT	5.5	3.6	45.2	0.6
First Fraction	4.5	3.3	30.1	0.4
Fraction	19.2	18.1	102.6	0.3
Final Exam	1.7	2.3	22.0	0.1
After Care	1.8	2.5	18.6	0.1
CheckIn				
All Patients	16.3	17.6	102.6	0.1

Szenario 10	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	1.6	2.4	37.7	0.1
CT	8.8	6.1	54.7	0.7
First Fraction	8.0	5.5	38.1	0.6
Fraction	217.8	109.2	428.7	0.3
Final Exam	1.8	2.4	24.4	0.1
After Care	1.9	2.9	24.0	0.2
CheckIn				
All Patients	145.5	134.3	428.7	0.1

Szenario 11	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	132.8	74.2	298.5	3.4
CT	130.2	77.9	318.5	4.7
First Fraction	139.3	84.4	309.9	7.1
Fraction	137.8	83.2	323.2	0.4
Final Exam	142.4	79.6	309.2	7.0
After Care	140.3	78.3	293.6	6.1
CheckIn	78.6	47.2	197.2	0.1
All Patients	136.8	82.0	323.2	0.4

Szenario 12	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	132.5	73.8	297.4	3.3
CT	130.6	77.7	327.5	4.7
First Fraction	140.7	84.0	300.4	7.0
Fraction	138.2	83.0	337.5	0.4
Final Exam	143.5	79.2	303.0	7.0
After Care	142.0	79.1	296.2	6.1
CheckIn				
All Patients	137.3	81.8	337.5	0.4

Szenario 13	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	1.6	2.1	21.3	0.1
CT	3.3	3.2	40.9	0.6
First Fraction	3.3	3.1	26.6	0.4
Fraction	3.5	4.9	56.5	0.3
Final Exam	1.8	2.5	27.2	0.1
After Care	1.7	2.2	17.8	0.1
CheckIn	0.5	1.1	14.4	0.0
All Patients	3.3	4.6	56.5	0.1

Szenario 14	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	23.9	26.8	183.2	0.2
CT	3.2	3.1	31.0	0.6
First Fraction	27.7	26.8	153.7	0.5
Fraction	3.5	5.0	58.2	0.3
Final Exam	27.5	28.9	165.3	0.2
After Care	29.2	29.1	146.7	0.1
CheckIn				
All Patients	5.9	12.3	183.2	0.1

Szenario 15	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	1.6	2.2	32.0	0.1
CT	5.8	4.2	48.3	0.6
First Fraction	5.2	4.0	31.5	0.6
Fraction	26.7	23.7	170.4	0.3
Final Exam	1.8	2.4	22.0	0.2
After Care	1.7	2.3	18.6	0.1
CheckIn				
All Patients	22.4	23.2	170.4	0.1

Szenario 16	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	1.7	2.4	37.7	0.1
CT	10.0	8.5	88.1	0.7
First Fraction	8.9	6.7	44.2	0.6
Fraction	222.6	112.8	463.0	0.3
Final Exam	1.8	2.6	24.4	0.1
After Care	1.9	2.8	24.0	0.2
CheckIn				
All Patients	146.8	137.8	463.0	0.1

Szenario 17	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	132.5	73.8	297.4	3.3
CT	130.6	77.7	327.5	4.7
First Fraction	140.7	84.0	300.4	7.0
Fraction	138.2	83.0	337.5	0.4
Final Exam	143.5	79.2	303.0	7.0
After Care	142.0	79.1	296.2	6.1
CheckIn	78.7	47.0	206.8	0.1
All Patients	137.3	81.8	337.5	0.4

Szenario 18	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	132.8	74.1	283.7	3.3
CT	130.6	77.7	327.5	4.7
First Fraction	140.1	83.5	300.4	7.0
Fraction	138.0	82.9	337.5	0.4
Final Exam	143.6	79.4	303.0	7.0
After Care	141.7	78.9	296.2	6.1
CheckIn	78.5	46.9	198.0	0.13
All Patients	137.1	81.7	337.5	0.1

Szenario 19	mean [min]	deviation [min]	max [min]	min [min]
Consultation	1.6	2.2	25.8	0.1
CT	3.3	3.2	39.1	0.6
First Fraction	6.8	5.9	42.7	0.6
Fraction	117.7	70.9	304.5	0.3
Final Exam	1.8	2.6	21.5	0.2
After Care	1.7	2.3	18.6	0.2
CheckIn				
All Patients	87.4	79.2	304.5	0.4

## A.10.2 Anzahl behandelter Patienten

Angegeben sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Anzahl behandelter COVID-Patienten, der Gesamtzahl aller behandelten Patienten und der Anzahl der behandelten Patienten pro Behandlungspfad.

	# Covid Patients		# Treated Patients		# Consultation		# CT		# First Fraction		# Fraction		# Final Exam		# After Care	
	mean	deviation	mean	deviation	mean	deviation	mean	deviation	mean	deviation	mean	deviation	mean	deviation	mean	deviation
Baseline	0	0	144.6	3.5	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	118.4	1.7	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 1	0	0	144.4	3.6	8.9	2.0	10.2	3.0	2.4	1.5	118.3	1.7	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 2	0	0	144.2	3.3	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	118.0	2.0	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 3	0	0	77.5	5.1	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	51.3	7.5	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 4	0	0	144.4	3.4	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	118.2	1.8	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 5	0	0	102.5	4.8	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	76.3	3.7	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 6	0	0	143.3	3.1	8.9	2.0	10.2	3.0	2.4	1.5	117.3	2.6	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 7	0.1	0.4	144.5	3.6	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	118.3	1.7	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 8	0.1	0.3	83.4	3.9	5.4	1.5	8.8	1.8	1.6	1.2	64.6	3.7	1.6	1.2	1.3	1.1
Scenario 9	0.1	0.4	143.8	3.3	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	117.6	2.3	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 10	0.1	0.4	144.3	3.6	8.9	2.0	10.2	3.0	2.4	1.5	118.3	1.7	2.5	1.4	1.9	1.3
Scenario 11	1.4	1.2	144.4	3.5	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	118.2	1.7	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 12	1.3	1.1	142.4	3.8	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	116.2	3.9	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 13	0.7	0.8	75.0	5.7	9.0	2.2	10.2	3.0	2.4	1.5	48.8	7.8	2.6	1.4	2.0	1.3
Scenario 14	1.4	1.2	144.1	3.7	8.9	2.0	10.2	3.0	2.4	1.5	118.2	1.7	2.5	1.4	2.0	1.3
Scenario 15	0.8	0.9	83.5	4.1	5.4	1.5	8.8	1.8	1.6	1.2	64.7	3.8	1.7	1.2	1.3	1.1

## Literaturverzeichnis

- [1] Robert Koch Institut. Krebs in Deutschland für 2015/2016 [Korrigierte Fassung vom 17.08.2020]; 2020
- [2] Sharpless NE. COVID-19 and cancer. *Science* 2020; 368: 1290. doi:10.1126/science.abd3377
- [3] The Royal College of Radiologists. The timely delivery of radical radiotherapy: guidelines for the management of unscheduled treatment interruptions Fourth edition
- [4] Baskar R, Lee KA, Yeo R, et al. Cancer and radiation therapy: current advances and future directions. *Int. J. Med. Sci.* 2012; 9: 193–199. doi:10.7150/ijms.3635
- [5] Müller-Polyzou R, Reuter-Oppermann M, Engbert A, et al. Digitalisierung in der Strahlentherapie 4.0. Chancen und Möglichkeiten der digitalen Strahlentherapie. *Digitale Transformation im Krankenhaus* 2019
- [6] Müller-Polyzou R, Reuter-Oppermann M, Engbert A, et al. Identifying user assistance systems for radiotherapy to increase efficiency and help saving lives. *Health Systems* 2020: 1–19. doi:10.1080/20476965.2020.1803148
- [7] Mayor S. COVID-19: impact on cancer workforce and delivery of care. *The Lancet Oncology* 2020; 21: 633. doi:10.1016/S1470-2045(20)30240-0
- [8] Slotman BJ, Cremades V, Kirby AM, et al. European radiation oncology after one year of COVID-19 pandemic. *Clinical and Translational Radiation Oncology* 2021; 28: 141–143. doi:10.1016/j.ctro.2021.03.011
- [9] AnyLogic. Simulation Gesundheitswesen (09.09.2021). Im Internet: <https://www.anylogic.de/healthcare/>; Stand: 09.09.2021
- [10] Krebsforschungszentrum, Krebsinformationsdienst, Deutsches. Wie entsteht Krebs? (05.07.2021). Im Internet: <https://www.krebsinformationsdienst.de/tumorarten/grundlagen/krebsentstehung.php>; Stand: 17.08.2021
- [11] Who Headquarters. WHO report on cancer: setting priorities, investing wisely and providing care for all. World Health Organization, 03.02.2020. Im Internet: <https://www.who.int/publications/i/item/who-report-on-cancer-setting-priorities-investing-wisely-and-providing-care-for-all>; Stand: 08.08.2021
- [12] Karger CP. Der Strahlentherapie-Prozess. In: Schlegel W, Karger CP, Jäkel O, Hrsg. *Medizinische Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018: 399–404. doi:10.1007/978-3-662-54801-1\_19
- [13] Lievens Y, Borrás JM, Grau C. Provision and use of radiotherapy in Europe. *Mol Oncol* 2020; 14: 1461–1469. doi:10.1002/1878-0261.12690

- [14] Chen Z, King W, Pearcey R, et al. The relationship between waiting time for radiotherapy and clinical outcomes: a systematic review of the literature. *Radiotherapy and Oncology* 2008; 87: 3–16. doi:10.1016/j.radonc.2007.11.016
- [15] IAEA. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. Non-serial Publication. Vienna: IAEA; 2005
- [16] Schlegel W. Bestrahlungsgeräte der Teletherapie. In: Schlegel W, Karger CP, Jäkel O, Hrsg. *Medizinische Physik: Grundlagen – Bildgebung – Therapie – Technik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2018: 405–424. doi:10.1007/978-3-662-54801-1\_20
- [17] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Strahlenschutz in der Medizin. Richtlinie zur Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) (21.08.2021)*. Im Internet: [http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund\\_17102011\\_RSII4114321.htm](http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_17102011_RSII4114321.htm); Stand: 24.08.2021
- [18] Internationale Atomenergie-Organisation. *Setting up a radiotherapy programme: Clinical, medical physics, radiation protection and safety aspects*. Vienna: IAEA; 2008
- [19] ÄRZTESTELLEN. *Facharzt-Weiterbildung Strahlentherapie: Dauer, Inhalte, Berufsperspektiven (27.08.2021)*. Im Internet: <https://aerztestellen.aerzteblatt.de/de/redaktion/facharzt-weiterbildung-strahlentherapie>; Stand: 27.08.2021
- [20] Bundesagentur für Arbeit. *Facharzt/-ärztin für Strahlentherapie*. Im Internet: <https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/bkb/27507.pdf>; Stand: 27.08.2021
- [21] MTA-R.de. *Fachkunde und Kenntnisse im Strahlenschutz (27.08.2021)*. Im Internet: <https://www.mta-r.de/blog/fachkunde-im-strahlenschutz-gesetzliche-grundlagen/>; Stand: 27.08.2021
- [22] Arbeitskreis Junge Medizinphysik. *Fachkunde & Fachanerkennung; (27.08.2021)*. Im Internet: <https://www.jmp.dgmp.de/de-DE/686/fachkunde-fachanerkennung/>; Stand: 27.08.2021
- [23] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *Strahlenschutzverordnung StrlSchV (27.08.2021)*. Im Internet: [https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv\\_2018/](https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/); Stand: 27.08.2021
- [24] Bundesamt für Strahlenschutz. *Was ist Strahlentherapie? (27.08.2021)*. Im Internet: [https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/strahlentherapie/einfuehrung/einfuehrung\\_node.html](https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/strahlentherapie/einfuehrung/einfuehrung_node.html); Stand: 27.08.2021
- [25] Müller-Polyzou R, Reuter-Oppermann M, Wirtz H, Engbert A. *Digitale Prozesslandschaft in der Strahlentherapie 4.0*. Unpublished; 2019. doi:10.13140/RG.2.2.20879.53921

- [26] World Health Organization. Timeline: WHO's COVID-19 response. Im Internet: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/interactive-timeline#!>; Stand: 12.08.2021
- [27] Reuter-Oppermann M, Müller-Polyzou R, Wirtz H, et al. Influence of the pandemic dissemination of COVID-19 on radiotherapy practice: A flash survey in Germany, Austria and Switzerland. *PLoS One* 2020; 15: e0233330. doi:10.1371/journal.pone.0233330
- [28] Budach W, Fietkau R, Krause M, Nestle U, Petersen C, Willich N. Stellungnahme der ARO, DEGRO und des Berufsverbandes zur Strahlentherapie während der COVID-19 Pandemie. Im Internet: <https://www.degro.org/stellungnahme-der-aro-degro-und-des-berufsverbandes-zur-strahlentherapie-waehrend-der-covid-19-pandemie/>; Stand: 12.08.2021
- [29] Xia Y, Jin R, Zhao J, et al. Risk of COVID-19 for patients with cancer. *The Lancet Oncology* 2020; 21: e180. doi:10.1016/S1470-2045(20)30150-9
- [30] Budach W, Fietkau R, Krause M, Nestle U, Petersen C, Willich N. 2. Stellungnahme DEGRO/ARO/BVDST zur Strahlentherapie während der COVID-19 Pandemie, 25.3.2020. Im Internet: <https://www.degro.org/2-stellungnahme-degro-aro-bvdst-zur-strahlentherapie-waehrend-der-covid-19-pandemie-25-3-2020/>; Stand: 12.08.2021
- [31] Tsang Y, Duffton A, Leech M, et al. Meeting the challenges imposed by COVID-19: Guidance document by the ESTRO Radiation Therapist Committee (RTTC). *Technical Innovations & Patient Support in Radiation Oncology* 2020; 15: 6–10. doi:10.1016/j.tipsro.2020.05.003
- [32] Webster J, Watson RT. Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly* 2002; 26: xiii–xxiii
- [33] Tranfield D, Denyer D, Smart P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *Br J Management* 2003; 14: 207–222. doi:10.1111/1467-8551.00375
- [34] vom Brocke J, Simons A, Niehaves B, Niehaves B, Riemer K, Plattfaut R, Cleven A. Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process. In: Newell S, Whitley E, Pouloudi N, Wareham J, Mathiassen L, Hrsg. 17th European Conference on Information Systems (ECIS) 2009. Verona: Università di Verona, Facoltà di Economia, Dipartimento de Economia Aziendale; 2009: 2206–2217
- [35] Rowley J, Slack F. Conducting a literature review. *Management research news* 2004: 31–39
- [36] Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J, et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *BMJ* 2009; 339: b2700. doi:10.1136/bmj.b2700

- [37] Preston White K, Ingalls RG. Introduction to simulation. In: Winter Simulation Conference. Austin, Texas: Winter Simulation Conference; 2009: 12–23
- [38] Zhang X. Application of discrete event simulation in health care: a systematic review. *BMC Health Serv Res* 2018; 18: 687. doi:10.1186/s12913-018-3456-4
- [39] Vieira B, Hans EW, van Vliet-Vroegindeweyj C, et al. Operations research for resource planning and -use in radiotherapy: a literature review. *BMC Med Inform Decis Mak* 2016; 16: 149. doi:10.1186/s12911-016-0390-4
- [40] Law AM. Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education; 2015
- [41] Banks J, Carson II JS, Nelson BL, Nicol DM. Discrete-event system simulation. 5. Aufl. Upper Saddle River NJ u.a.: Prentice Hall; 2010
- [42] Ullrich O, Lückerath D. An Introduction to Discrete-Event Modeling and Simulation. *SNE* 2017; 27: 9–16. doi:10.11128/sne.27.on.10362
- [43] Gutenschwager K, Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S. Grundlagen der ereignisdiskreten Simulation. In: Gutenschwager K, Rabe M, Spieckermann S, Wenzel S, Hrsg. Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2017: 51–84. doi:10.1007/978-3-662-55745-7\_3
- [44] Dresch A, Lacerda DP, Antunes JAV. Systematic Literature Review. In: Dresch A, Lacerda DP, Antunes Júnior JA, Hrsg. Design Science Research. A Method for Science and Technology Advancement. Cham: Springer; 2015: 129–158. doi:10.1007/978-3-319-07374-3\_7
- [45] Swiss Academic Software GmbH. Citavi - Literaturverwaltung und Wissensorganisation (25.05.2021). Im Internet: <https://www.citavi.com/de/>; Stand: 25.05.2021
- [46] ATLAS.ti. ATLAS.ti: The Qualitative Data Analysis & Research Software (05.06.2021). Im Internet: <https://atlasti.com/de/>; Stand: 05.06.2021
- [47] Babashov V, Aivas I, Begen MA, et al. Reducing Patient Waiting Times for Radiation Therapy and Improving the Treatment Planning Process: a Discrete-event Simulation Model (Radiation Treatment Planning). *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 2017; 29: 385–391. doi:10.1016/j.clon.2017.01.039
- [48] Bikker IA, Kortbeek N, van Os RM, et al. Reducing access times for radiation treatment by aligning the doctor's schemes. *Operations Research for Health Care* 2015; 7: 111–121. doi:10.1016/j.orhc.2015.06.005
- [49] Famiglietti RM, Norboge EC, Boving V, et al. Using Discrete-Event Simulation to Promote Quality Improvement and Efficiency in a Radiation Oncology Treatment Center. *Quality Management in Health Care* 2017; 26: 184–189. doi:10.1097/QMH.000000000000145



- [50] Hosseini S, Jannat S, Al Khaled A. Discrete event simulation technique for evaluating performance of oncology department: a case study. In: Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference. Huntington Beach, California: IEEE Press; 2015: 1343–1354
- [51] Joustra PE, Kolfin R, van Dijk NM, et al. Reduce fluctuations in capacity to improve the accessibility of radiotherapy treatment cost-effectively. *Flex Serv Manuf J* 2012; 24: 448–464. doi:10.1007/s10696-011-9119-y
- [52] Kapamara T, Sheibani K, Petrovic D, et al. A simulation of a radiotherapy treatment system: A case study of a local cancer centre. *Proceedings of ORP3, EURO 2014*: 29–35
- [53] Miranda DM, Miranda MPM. Discrete-event simulation applied to a radiotherapy process: a case study of a cancer center. *J Simul* 2021; 18: e20211076. doi:10.14488/BJOPM.2021.012
- [54] Proctor S, Lehaney B, Reeves C, et al. Modelling Patient Flow in a Radiotherapy Department. *OR Insight* 2007; 20: 6–14. doi:10.1057/ori.2007.15
- [55] Vieira B, Demirtas D, B van de Kamer, Jeroen, et al. Improving workflow control in radiotherapy using discrete-event simulation. *BMC Med Inform Decis Mak* 2019; 19: 199. doi:10.1186/s12911-019-0910-0
- [56] Werker G, Sauré A, French J, et al. The use of discrete-event simulation modelling to improve radiation therapy planning processes. *Radiotherapy and Oncology* 2009; 92: 76–82. doi:10.1016/j.radonc.2009.03.012
- [57] Mayring P. *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Weinheim: Beltz Verlagsgruppe; 2010
- [58] Gläser J, Laudel G. *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer VS; 2019
- [59] StrlSchG - Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (05.06.2021). Im Internet: <https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/BJNR196610017.html>; Stand: 05.06.2021
- [60] Larson RC, Larson BM, Katz KL. Prescription for waiting–in line blues: Entertain, enlighten and engage. *Sloan Management review*,(winter) 1991; 32: 44–55
- [61] AnyLogic. AnyLogic: Softwarewerkzeuge für Simulationsmodellierung & geschäftliche Lösungen (13.08.2021). Im Internet: <https://www.anylogic.de/>; Stand: 13.08.2021
- [62] Ferlay J, Laversanne M, Ervik M, Lam F, Colombet M, Mery L, Piñeros M, Znaor A, Soerjomataram I, Bray F. Global Cancer Observatory: Cancer Tomorrow. Im Internet: <https://gco.iarc.fr/tomorrow>; Stand: 16.07.2021

- [63] Bartels B, Erbsmehl CT. Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr, Teil 1. FAT-Schriftenreihe. Berlin; 2014
- [64] Pidd M. Computer simulation in management science. 5th ed. Chichester: Wiley; 2004
- [65] Robinson S. Simulation: The practice of model development and use. Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd; 2004
- [66] Hoad K, Robinson S, Davies R. Automating DES output analysis: how many replications to run. In: Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference: 505–512
- [67] Bundestag. Viertes Gesetz zum Schutz der Bevölkerung bei einer epidemischen Lage von nationaler Tragweite vom 06.09.2021
- [68] Corona-Zahlen für Israel (06.09.2021). Im Internet: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBI&jumpTo=bgbl121s0802.pdf#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl121s0802.pdf%27%5D\\_\\_1630940080366](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl121s0802.pdf#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s0802.pdf%27%5D__1630940080366); Stand: 06.09.2021
- [69] RKI - Coronavirus SARS-CoV-2 - Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19 (08.09.2021). Im Internet: [https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges\\_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=96CCC4C7D1098EBA076298E9859A3E18.internet051?nn=13490888#doc13776792bodyText2](https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=96CCC4C7D1098EBA076298E9859A3E18.internet051?nn=13490888#doc13776792bodyText2); Stand: 08.09.2021