



SEMINARARBEIT

SIMULATION UND MODELLIERUNG UN DER MEDIZININFORMATIK

Kurzbeschreibung

Diese Arbeit gibt eine Übersicht über die Simulation und Modellierung, wie und in welcher Form, diese Fachbereiche in der heutigen Medizin angewendet werden, des Weiteren werden Anwendungen in der nahen Vergangenheit, sowie Ausblicke in die Zukunft erläutert. Diese Arbeit ist im Rahmen des Seminars „Aktuelle Themen der Medizininformatik (SoSe2025)“ entstanden.

Verfasser:

Mayer Nicolas

Aufgabensteller/Prüfer:

Rafael Mayoral Malmström

Arbeit vorgelegt am:

09.07.2025

Fakultät:

Fakultät für Informatik

Studiengang:

Informatik BA

Matrikelnummer:

473941

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	2
1 EINLEITUNG	3
2 EINSTIEGSERKLÄRUNGEN	3
2.1 Was ist Modellierung?	3
2.2 Modellierungsarten	4
2.3 Was ist Simulation?	6
2.4 Simulationstypen	7
3 MODELLE	10
3.1 Anwendungen von Modellen	10
3.2 Voraussetzungen von Modellen	12
3.3 Herausforderungen bei der Nutzung Modellen	13
4 SIMULATIONEN	14
4.1 Einsatzfelder von Simulationen	16
4.2 Vorteile der Anwendung von Simulationen	17
4.3 Herausforderungen bei der Nutzung Simulationen	19
5 ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN	21
5.1 Die Zukunft von Modellen	21
5.2 Die Zukunft von Simulationen	22
6 LITERATURVERZEICHNIS	24
7 ERKLÄRUNGEN	27
7.1 Selbstständigkeitserklärung	27
7.2 Ermächtigung	27

1 EINLEITUNG

Die Arbeit handelt von dem Thema Simulation und Modellierung in der Medizininformatik, welches über die letzten Jahre stark an Interessenzuwachs bekommen hat, da wir in der Medizin seit geraumer Zeit einen Wandel beobachten können, der vor allem in den letzten Jahren stark einschlägt. Die Tendenzen gehen immer mehr Richtung riesiger Datenmengen in egal welchem Unterbereich der Medizininformatik, immer mehr Prozesse, Diagnosen und Therapien werden digital unterstützt. Das alles sorgt dafür, dass wir nach Methoden suchen müssen, diese sinnvoll zu Verarbeiten und zu Analysieren. Modellierung und Simulation ist hierfür gerade einer der richtigen Wege. Durch das Konzept was uns hier vorliegt, erschaffen wir eine Schnittstelle zwischen der Medizin und der Datenwissenschaften in der Informatik. Wir reden hier über einen Weg die Analyse klinischer Prozesse zu vereinfachen, die Vorhersage von Krankheitsverläufen zu ermöglichen, Therapie datengestützt zu begleiten und medizinisches Fachpersonal besser aus- und weiterzubilden.

2 EINSTIEGSERKLÄRUNGEN

2.1 WAS IST MODELLIERUNG?

Modellierung bezeichnet den Prozess, ein vereinfachtes Abbild der Realität zu erstellen, um komplexe Systeme oder Phänomene besser verstehen und analysieren zu können, dies ermöglicht geschultem Fachpersonal, folglich die Daten besser zu verstehen und im Optimalfall schneller einer besseren Entscheidung, bezüglich der aktuellen Problemlage, zu treffen. Gute medizinische Modelle können klinische Entscheidungsabläufe verbessern und somit die Patientensicherheit und -versorgung positiv beeinflussen. In der Medizinischen Informatik gilt Modellierung als zentrale Methode: Durch abstrakte Modelle von z.B. pathophysiologischen Prozessen, Krankheitsbildern, diagnostischen Entscheidungsabläufen oder Gesundheitssystemen versucht man, Medizin und Gesundheitsversorgung systematisch abzubilden und besser zu verstehen. Somit können Modelle z. B. ein biologisches System (wie die Ausbreitung eines Erregers im Körper) oder einen organisatorischen Prozess (wie den Patientenfluss im Krankenhaus) nachbilden.^{1 2}

Ein Modell reduziert die Komplexität der realen Welt auf wesentliche Aspekte und ermöglicht so, Daten, Informationen und Wissen strukturiert aufzuzeigen. Wichtig ist der Unterschied zur Simulation: Während die Modellierung das Erstellen des Modells umfasst, bezeichnet Simulation das Ausführen des Modells, um dessen Verhalten zu untersuchen. Zusammen dienen beide Ansätze dazu, medizinische Fragestellungen mit informatischen Methoden zu bearbeiten.

¹ Universität Leipzig, www.imise.uni-leipzig.de, Q1

² Digitalisierung der Medizin, <https://digitalisierungdermedizin.de>, Q2

2.2 MODELLIERUNGSARTEN

In der Medizininformatik haben sich verschiedene Modellierungsansätze etabliert, die sich vor allem in der Art der Wissensrepräsentation und Datennutzung unterscheiden. Die wichtigsten Ansätze sind wissensbasiert, datengetrieben, agentenbasiert sowie hybride Kombinationen dieser Methoden:

Wissensbasierte Modelle:

Explizite Repräsentation von Expertenwissen und Regeln (sehr Faktenorientiert) analysiert Daten nach festgelegten medizinischen Regeln und Logiken, dies bringt den Entscheidenden Vorteil, dass eine hohe Transparenz in der Entscheidungslogik vorliegt.

Zum Beispiel fallen in diese Kategorie, die mathematischen, sowie stochastischen Modelle und auch Entscheidungsunterstützungssysteme, wenn diese mit IF-THEN Regeln arbeiten, welche auf Fakten basieren.

Datengetriebene Modelle:

Sind, wie der Name schon sagt, Modelle, die auf Unmengen an Daten basieren, diese sind vor allem bei Machine-Learning, sowie KI-Verfahren sehr interessant. Die Modelle suchen Muster in großen Datenfeldern. Um dies zu ermöglichen, handelt es sich hierbei meist um komplexe statistische oder neuronale Modelle, die sehr präzise Arbeiten, jedoch Aufgrund der Komplexität nur sehr schwer durchschaubar sind.

Ein Beispiel hierfür ist, die Auswertung radiologischer Bilder, was meist mit Deep-Learning-Modellen umgesetzt wird. Dies geschieht weitaus schneller als dem Menschen sonst möglich, jedoch nach dem „Black-Box“-Prinzip. (Das Black-Box-Prinzip beschreibt das Konzept, das wir nur die Eingabe und Ausgabe kennen und den internen Prozess nur erraten können.)³

Agentenbasierte Modelle:

Diese Art von Modell existiert eher selten ohne eine zugehörige Simulation, denn es arbeitet mit mehreren Agenten (meist virtuellen Personen), diesen werden dann Verhaltensmuster und -regeln gegeben. Wir versuchen in dieser Form von Modell möglichst genau das Verhalten von „echten“ Agenten widerzuspiegeln, um somit in unserer späteren Simulation ein möglichst genaues Abbild der Realität zu erhalten. Diese Art von Modell eignet sich sehr gut zur Untersuchung komplexer, nicht-linearer Systeme.⁴

Ein Beispiel findet dieses Modell in der Darstellung von Patientenflüssen im Krankenhaus, sowie in der Epidemievorhersage. In der Corona-Pandemie, wurden mit diesen Modellen Infektionsausbreitungen und die Wirkung von Interventionen simuliert.

³ Medizininformatik-Initiative, www.medizininformatik-initiative.de, Q3

⁴ Wikipedia, wikipedia.org, Q4

Hybride Modelle:

Hierbei handelt es sich um die Kombination von wissensbasierten und datengetriebenen Ansätzen, um Vorteile beider zu vereinen. Ein hybrides Modell nutzt einerseits medizinisches Expertenwissen und Regeln, andererseits lernt es aus Daten. Damit kann die Transparenz erhöht und zugleich eine hohe Genauigkeit erreicht werden.

Ein Beispiel hierfür ist ein Erklärbares KI-System zur Infektionskontrolle: Ein maschinell lernendes Frühwarnmodell für Krankenhausinfektionen, in das medizinische Regellogik eingebettet ist. Das System lernt aus Daten und nutzt zugleich verständliche Regeln. Das System lernt zudem aus dem Feedback der Ärzte, was zu einer stetigen Genauigkeitsverbesserung führt, welche nicht nur auf Daten, sondern auch auf medizinischem Wissen basiert.⁵

Zusammenfassend lässt sich sagen:

Die Arten von Modellen lassen sich, durchaus auch in andere Kategorien einteilen und auch weiter Aufteilen, sowie Zusammenfassen, jedoch habe ich mich im Rahmen meiner Arbeit für diese Aufteilung entschieden und die Kategorien meines Vortrages diesen untergeordnet. Wissensbasierte, sowie Datengetriebene Modelle, werden heutzutage vermehrt zusammengefasst zu Hybrid-Modellen, den somit erreicht man meist das, was man will, ein Faktengestütztes Datenabhängiges Modell, was wesentlich leichter nachzuvollziehen ist, jedoch trotzdem große Mengen an Daten in Betracht ziehen kann.

Agentenbasierte Modelle werden oft einzeln betrachtet, den diese benötigen sehr viel Wissen über die Begebenheit und damit sehr viel Zeit, um den Rahmen zu studieren. Des Weiteren kommt ein hohes Maß an Arbeit auf einen zu, um das Modell zu kalibrieren. Nach diesen Schritten ist das Modell dann für eine gewisse Zeit in der Lage mithilfe einer Simulation, die Begebenheiten in der Zukunft vorherzusagen. Dieser Zeitraum ist aber stark begrenzt, den über Zeit ändern sich die Rahmenbedingungen, da Menschen, zum Beispiel anders als erwartet auf ein Event reagiert haben. Zur Folge dessen muss dann das Modell komplett neu gebaut werden oder zumindest auf die neuen Rahmenbedingungen angepasst werden.

⁵ Medizininformatik-Initiative, www.medizininformatik-initiative.de, Q5

2.3 WAS IST SIMULATION?

Wir sprechen von einer Simulation, wenn wir mit einem Ansatz, eine Nachbildung eines realen Systems oder Prozesses, in einem virtuellen Modell erzeugen. Aus diesem wollen wir dann Erkenntnisse und Wissen gewinnen, welches auf die Realität übertragbar ist.

Nach Definition der VDI-Richtlinie 3633 ist Simulation das „Nachbilden eines Systems mit seinen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“.⁶

Der wesentliche Unterschied zur Modellierung (dem Erstellen des abstrakten Modells) ist, dass wir hierbei einen Vorgang zu simulieren. Wir nehmen uns ein Modell als Basis, zum Beispiel ein Agentenbasiertes Modell, indem wir jegliche Agenten definiert haben und ihnen einen Raum erstellt haben, sowie die Verhaltensmuster und -regeln in diesem Raum. Nun können wir in unserer Simulation die Entwicklung anhand aller dieser Werte und Regeln beobachten. Des Weiteren ist unser Ziel die Werte anzupassen und dann zu studieren, was sich verändern würde, wenn sich Rahmenbedingungen ändern, oder wenn wir die Menge an Agenten verändern, beziehungsweise neue Agenten mit in die Simulationen bringen, von denen wir zwar nicht erwarten, dass Sie in der Realität in das System eintreten, wir uns jedoch nicht sicher sein können, dass nicht doch so ein Ausnahmefall entsteht.

Bedeutet Schluss folglich, es besteht ein Interesse an dem Ausgang, gewisser Ereignisse unter gewissen Umständen.⁷ Wir können somit Szenarien erschaffen bei denen wir komplexe klinische Abläufe, Patientenschicksale oder organisatorische Prozesse gefahrlos im Computer oder unter künstlichen Bedingungen zu erproben.

Eine Simulation setzt also i.d.R. ein vorhandenes Modell voraus. Ist noch kein geeignetes Modell da, muss zuerst die Modellierung erfolgen. Sobald ein Modell (z. B. eines Notaufnahmeprozesses oder eines physiologischen Systems) vorliegt, können Simulationsexperimente durchgeführt werden.

⁶ Verein Deutscher Ingenieure, www.vdi.de, Q6

⁷ Wikipedia, wikipedia.org, Q7

2.4 SIMULATIONSTYPEN

Wie bei der Modellierung, gibt es auch in der Simulation unterschiedliche Arten. Die Frage welcher Typ von Simulation benötigt wird, lässt sich meist mit dem Zweck und Anwendungsgebiet der Simulation bestimmen. Es gibt vor allem außerhalb der Medizininformatik ein weites Feld an Möglichkeiten zur Simulation, deshalb werde ich mich im Folgenden auf die gängigen Typen in der Medizininformatik beschränken.

Medizinische Simulationszentren:

Hierbei handelt es sich um eine reale Trainingsumgebung, dies sind dann für eine Simulation spezielle Räume, die einem echten medizinischen Szenario sehr nahekommen.

Diese Arten von Simulationen können verschiedene Arten der Umsetzung haben.

Eine OP zum Beispiel kann über verschiedene Möglichkeiten simuliert werden.

Virtual-Reality-Setups:

Hierbei wird das Fachpersonal mithilfe von sogenannten VR-Brillen in einen virtuellen Raum versetzt, indem die OP dann durchgeführt wird. Einfluss nimmt das Team dann über Controller, die den Werkzeugen im realen angelehnt sind, welche dann bei fortschrittlicher Simulation auch haptisches Feedback geben.

Simulationszentren mit Puppen:

Hierbei findet das zu trainierende Team einen eins zu eins der Realität entsprechenden eingerichteten Raum vor. Auf der Patientenliege liegt jedoch kein echter Patient, sondern eine Puppe, welche die Eingriffe ziemlich genau widerspiegelt und über Datenbildschirme auch wie ein echter Patient auf Medikation und Eingriffe reagiert.

Diese Arten von Simulationen werden genutzt, um Eingriffe im Vorhinein proben zu können, ohne dass dabei ein echter Patient zu Schaden kommt. Es ist sehr hilfreich bei der Aus- und Weiterbildung des Personals, den auch unrealistische, aber mögliche Szenarien, die in seltensten Fällen auftreten, können hier trainiert werden.⁸

Dieser Simulationstyp fasst meine im Vortrag genannte Physikalische, Computergestützte, sowie VR-Simulation in einer Anwendung zusammen und erzeugt dadurch ein sehr realitätsnahes Trainingsszenario.

⁸ National Library of Medicine, pmc.ncbi.nlm.nih.gov, Q8

Virtuelle Patienten:

Dieser Typ basiert auf computerbasierter, interaktiver Patientensimulation, meist wird dies in Form von Fallgeschichten umgesetzt. Virtuelle Patienten stellen einen sehr realitätsnahen klinischen Fall dar (mit Symptomen, Befunden, und einem Krankheitsverlauf), dies kann dann genutzt werden, um Lernenden diese Szenarien zu zeigen und ihre Entscheidungskompetenz auf die Probe zu stellen. Das Ziel des ganzen ist es, eine praxisnahe Ausbildung zu ermöglichen und das klinische Entscheidungsvermögen zu fördern und zu prüfen.

In einem Beispiel können wir Medizinstudierenden nun online einen virtuellen Patientenfall vorlegen: Ein Programm präsentiert die Vorgeschichte, Symptome und Befunde eines fiktiven Patienten. Der*die Lernende muss Anamnese erheben, Diagnostik anordnen und Therapieentscheidungen treffen. Das System gibt Feedback zu Entscheidungen. Diese Methode schließt Lücken, wenn reale Patienten für Lehrzwecke fehlen, und erlaubt das Üben seltener Krankheiten im sicheren Rahmen.

Das Lernen an echten Patienten bringt oft auch Nachteile mit sich wie die Universität Heidelberg folgend schildert:

Fehlen geeigneter Patienten für Studentenunterricht:

In einem modernen Krankenhausbetrieb sinkt die Verweildauer der Patienten im Krankenhaus und es gibt an Universitätskliniken zunehmend Schwerstkranke, so dass für einen direkten Patientenunterricht immer weniger Patienten zur Verfügung stehen. Ebenfalls kann bei vielen wichtigen saisonalen Erkrankungen ein Unterricht durch direkten Patienten-Kontakt nicht gewährleistet werden. Weiterhin betreuen Studenten im Praxiseinsatz in den seltensten Fällen Patienten von der Aufnahme bis zur Entlassung oder sind in alle wichtigen Entscheidungsschritte der klinischen Betreuung einbezogen.

Fehlen der Verknüpfung vorklinischer und klinischer Inhalte:

Virtuelle Patienten bieten zudem die Möglichkeit, in vorklinischen Fächern durch Verknüpfung theoretischer Lerninhalte mit praktischen Anwendungsbeispielen in Fällen aus der Klinik bereits früh einen realitätsnahen Praxisbezug herzustellen und wichtige Konzepte bereits in der klinischen Anwendung zu üben.

Unzureichendes Feedback:

Studierende erhalten bei der Betreuung wirklicher Patienten häufig wenig Feedback.⁹

Durch die Aufzählung dieser Nachteile lässt sich leicht nachvollziehen, dass eine Lehre an einem virtuellen Patienten, basierend auf teils echten Patienten, eine bessere Ausbildungsmöglichkeit bietet.

⁹ Medizinische Fakultät Heidelberg, www.medizinische-fakultaet-hd.uni-heidelberg.de, Q9

Prozesssimulation:

Es handelt sich bei dieser Art um eine Computersimulation von klinischen Prozessen oder Versorgungsabläufen, sowie die Notfallplanung bei besonderen Ausnahmefällen. Diese Ausnahmefälle können die Ausbreitung von Infektionen innerhalb des Krankenhauses sein, jedoch aber auch die Ressourcenverwaltung bei sehr großem Patientenaufkommen.

Simulationen bezüglich hohem Patientenaufkommens können auch als reale Simulation auftreten, bei der das Team darstellt wie eine Überstrapazierung der Einrichtung aussehen könnte und wie diese dann Handzuhaben ist.

Ein gängiges Beispiel für die Simulation von klinischen Prozessen und Versorgungsabläufen ist der Ausbau eines Krankenhauses. Anhand von geschätzten Werten kann vorausgesagt werden an welchen Stellen, es nach dem Ausbau zu neuen Engpässen kommen wird. Somit können schon früh Umstrukturierungen geplant werden und/oder die Ausbauten weiter optimiert werden, damit nach einem erfolgreichen Umbau auch wirklich die gewünschte neue Patientenmenge sinnvoll abgearbeitet werden kann. Diese Planungen umfassen zum Beispiel die Bereitstellung von mehr Personal, sowie Engpässe in der Versorgung der Stationen mit Medikation. Des Weiteren können auch andere Engpässe, wie zum Beispiel Wartezeiten vorhergesagt werden und basierend darauf kann dann der Wartezeitenerzeuger auch einen Ausbau erhalten.^{10 11}

Weiteres:

Darüber hinaus gibt es weitere Simulationstypen, wie immersive Simulationen mittels Virtual/ Augmented Reality (Übungen in virtuellen Umgebungen, z.B. für chirurgische Eingriffe) oder Simulationspersonen (sog. „standardized patients“, also Schauspieler, die Patient*innen mimen, um Kommunikation und Anamnese zu trainieren). Diese ließen sich den obigen Kategorien zuordnen (Simulationspersonentraining als Teil der Simulationszentren; VR-Training teils in Zentren oder eigenständig). Wichtig ist auch die Unterscheidung: Hardware-nahe Simulationen (z.B. OP-Simulator mit realem Instrumentarium, anatomischen Modellen) vs. Software-Simulationen (rein rechnergestützt ohne physische Komponenten). In der Medizininformatik spielen softwarebasierte Simulationen naturgemäß eine große Rolle, etwa bei virtuellen Patienten oder Prozessmodellen.

¹⁰ Simplan, www.simplan.de, Q10

¹¹ Simplan, www.krankenhaussimulation.de, Q11

3 MODELLE

3.1 ANWENDUNGEN VON MODELLEN

Modellierung wird in der Medizininformatik breit eingesetzt – von der biomedizinischen Grundlagenforschung über die klinische Entscheidungsfindung bis hin zur Versorgungsplanung.

Wichtige Anwendungsbereiche sind unter anderem:

- **Krankheitsverläufe & personalisierte Medizin:**

Es werden hierbei individuelle Krankheitsprogressionen vorhergesagt und Therapien dann dementsprechend darauf abgestimmt. Beispielsweise erlauben uns prädiktive Modelle die Risikostratifizierung von Patienten zu ermitteln.

(Begriffserklärung „prädiktive Modelle“: „Bei der prädiktiven Modellierung wird mithilfe bekannter Ergebnisse ein statistisches Modell erstellt, mit dem prädiktive Analysen durchgeführt oder zukünftige Verhaltensweisen vorhergesagt werden können.“¹²)

(Begriffserklärung „Risikostratifizierung“: „Die Stratifikation bzw. Risikostratifizierung ist ein statistischer Prozess, der in der Medizin eingesetzt wird. Er dient dazu, Bedingungen zu identifizieren, die eine Erkrankung negativ beeinflussen.“¹³)

In diesem Bereich gibt es einen Anwendungsfall bei Menschen mit Herzinsuffizienz. Diese erhalten Wearables (in diesem Fall Smartwatches), welche die Gesundheitsdaten, nach der Entlassung, weiter an die Klinik senden. Sobald sich diese Werte verschlechtern und der somit eine Verschlechterung des Gesundheitszustandes vorliegt, können Ärzte rechtzeitig präventiv tätig werden, anstatt wie bisher erst wenn die Patienten wieder mit akuten Beschwerden ins Krankenhaus kommen.¹⁴

- **Entscheidungsunterstützung & Diagnostik:**

Modellbasierte Clinical Decision Support (CDS)-Systeme liefern Ärztinnen evidenzbasierte Empfehlungen. Ein Beispiel hierfür ist ein virtuelles Tumorboard: Wir führen hier alle relevanten Daten eines Krebspatienten zusammen und bereiten sie anschaulich auf. Diese Daten bleiben nun in diesem Modell und werden bei zukünftigen Entscheidungen mit einbezogen, wenn es darum geht einem Menschen mit einem eventuell sehr ähnlichen Krankheitsbild zu helfen. Dies ermöglicht dann bessere Therapieentscheidungen bei zukünftigen Fällen.¹⁵

¹² Splunk-Blogs, www.splunk.com, Q12

¹³ DocCheck-Flexikon, flexikon.doccheck.com, Q13

¹⁴ Medizininformatik-Initiative, www.medizininformatik-initiative.de, Q14

¹⁵ Medizininformatik-Initiative, www.medizininformatik-initiative.de, Q15

- **Klinische Abläufe und Prozessoptimierung:**

Die Abbildung von klinischen Prozessen in Modellen (z.B. Behandlungspfade, Notaufnahme-Triage, OP-Planung) ermöglicht es, Abläufe zu analysieren und zu verbessern, diese zu optimieren und gegebenenfalls überschüssige Ressourcen neu zu verteilen. Durch Geschäftsprozessmodellierung können z.B. Behandlungspfade standardisiert und Engpässe identifiziert besser werden. Die Prozessoptimierung arbeitet in der Regel mit auf den Modellen basierenden Simulationen, um Variablen und deren Auswirkungen besser zu verstehen. Ein konkretes Beispiel liefert die Universität Leipzig mit einer 2014 veröffentlichten Diplomarbeit. In dieser wurden die Pflegeprozesse in der Zentralen Notaufnahme des Universitätsklinikums Leipzig mithilfe agentenbasierter Simulation analysiert. Die Basis für diese Analyse lieferte ein Modell, das über Wochen hinweg mit realen Daten gefüttert wurde. Daten wie Patientenverteilung, Ressourcenverfügbarkeit und zu Triage Leveln wurden ununterbrochen eingespeist. Das Ergebnis der folgenden Simulation war es, dass Wartezeiten stark verkürzt wurden und die Sicherheit für Patienten, die unter Beobachtung standen, stark anstieg.¹⁶

- **Biometrische Simulation & Forschung:**

Im biologischen Bereich finden Modelle auch viel Anwendung auf molekularer, sowie organischer Ebene, da sie sich hier sehr gut eignen, um Zustände besser zu veranschaulichen und Vorgänge zu verstehen. Die biomedizinische Modellierung und Simulation zielt etwa darauf ab, Vorgänge in Organsystemen, Geweben oder auf Zellebene virtuell abzubilden.¹⁷ Es kann sich um Computermodelle handeln, bei denen Zustände in einem dreidimensionalen Raum dargestellt werden, jedoch kann es sich auch um Modelle aus dem echten Leben handeln, welche dann dafür genutzt werden, Dinge, die sonst nur schwer zu veranschaulichen sind, leicht verständlich zu machen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Anwendung von Modellen von Organen sowie Molekülen.

¹⁶ Publisso, journals.publisso.de, Q16

¹⁷ Westfälisches Institut für Gesundheit, gesundheit.w-hs.de, Q17

3.2 VORAUSSETZUNGEN VON MODELLEN

Damit Modellierung in der Medizininformatik erfolgreich sein kann, müssen gewisse Grundvoraussetzungen erfüllt sein. Zentral ist die Verfügbarkeit und Qualität von Daten: Moderne datengetriebene Modelle benötigen umfangreiche, gut aufbereitete medizinische Datensätze. Im deutschen Gesundheitssystem existieren jedoch traditionell viele Datensilos, die in sich geschlossen in ihren Ökosystem liegen. Jede Klinik sammelt zwar täglich Unmengen an Versorgungsdaten (Laborwerte, Bilddaten, Arztbriefe etc.), aber diese liegen oft heterogen und inkompatibel vor.¹⁸ Selbst einfache Informationen wie Blutdruckwerte werden in unterschiedlichen Häusern verschieden dokumentiert. Eine grundlegende Voraussetzung ist daher die Datenintegration über Sektorengrenzen hinweg und die Sicherstellung der Interoperabilität.

In Deutschland wird dies maßgeblich durch die Medizininformatik-Initiative (MII) vorangetrieben: Im Rahmen dieses BMBF-geförderten Projekts bauen viele Universitätskliniken sogenannte Datenintegrationszentren auf. Diese führen Patientendaten aus den verschiedenen Quellsystemen eines Krankenhauses (KIS, Labor, PACS, etc.) zusammen und bereiten sie so auf, dass sie maschinenlesbar und standortübergreifend nutzbar sind. Technisch bedeutet das die Umsetzung gemeinsamer Datenstandards: Die MII hat einen deutschlandweit einheitlichen Kerndatensatz definiert, bestehend aus Modulen mit Informationsmodellen für z.B. Diagnosen, Prozeduren, Laborbefunde etc. Dieser Kerndatensatz wurde mit dem internationalen Standard „HL7 FHIR“ implementiert, um eine syntaktisch und semantisch einheitliche Bereitstellung von Versorgungsdaten in allen Datenintegrationszentren zu ermöglichen. Zusätzlich werden internationale Terminologien (wie LOINC, SNOMED CT, ICD) und abgestimmte Metadaten eingesetzt, um die Bedeutung der Daten einheitlich zu beschreiben.

Neben technischen Standards (Formate, Schnittstellen) sind auch semantische Standards und ontologische Modelle (z.B. zur einheitlichen Kodierung von Diagnosen und Medikamenten) entscheidend, damit Modelle auf konsistente Daten zugreifen können. Interoperabilität umfasst dabei prozessuale, syntaktische und semantische Aspekte – von einheitlichen Workflows bis zur gleichen Bedeutung von Datenfeldern. Nur wenn Daten aus verschiedenen Quellen nahtlos integriert werden, können datengetriebene Modelle ihr volles Potenzial entfalten. Projekte wie die MII schaffen mit der Gesundheitsforschungsdateninfrastruktur die Grundlage dafür, dass umfangreiche Routinedaten für Forschung und Modellierung genutzt werden können. Diese Infrastruktur – etwa über das neue Forschungsdatenportal Gesundheit – berücksichtigt auch hohe Anforderungen an Datenschutz und IT-Sicherheit, damit sensible Gesundheitsdaten rechtskonform sekundärgenutzt und modelliert werden können.¹⁹

¹⁸ Medizininformatik-Initiative, www.medizininformatik-initiative.de, Q18

¹⁹ Springer Nature, springer.com, Q19

Zusammengefasst sind die wichtigsten Voraussetzungen für erfolgreiche Modellierung:

- Hochwertige, integrierte Datenbasis: Harmonisierung der heterogenen klinischen Daten (Stichwort Interoperabilität).
- Technische Infrastruktur: Vorhandensein von Datenplattformen, Rechenleistung und Tools zur Modellierung (z.B. Statistiksoftware, KI-Frameworks).
- Standards und Schnittstellen: Verwendung etablierter Austauschformate (FHIR, OpenEHR etc.) und Terminologien, damit Modelle universell anwendbar sind.
- Multidisziplinäres Know-how: Modellierung erfordert die Zusammenarbeit von Informatikerinnen, Medizinerinnen, Statistikern und ggf. Domänenexperten, um valide Modelle aufzubauen.
- Validierte Methoden: Etablierte Modellierungsmethoden und -frameworks sowie Best Practices (z.B. Versionierung von Modellen, Qualitätssicherung der Algorithmen).

3.3 HERAUSFORDERUNGEN BEI DER NUTZUNG MODELLEN

- **Datenheterogenität und -qualität:**

Wie bereits erwähnt und belegt sind die Rohdaten meist uneinheitlich, unvollständig oder im schlimmsten Fall sogar fehlerhaft. Um die Qualität zu verbessern, benötigen wir eine Datenvorbereitungsphase. Diese ist leider meistens der Teil, der den größten Zeitaufwand in der Modellbildung hat. Die Bereinigung der Daten ist essenziell und umfasst Aufgaben wie, die Aufarbeitung unterschiedlicher Abkürzungen und Kodierungen. Außerdem sind in älteren Datensätzen oft Verzerrungen (Bias) enthalten, welche das Modell stark verfälschen würden, was in der vor allem in der Medizin sehr schlecht ist.

- **Erklärbarkeit und Vertrauen:**

Hochkomplexe datengetriebene Modelle wie tiefe neuronale Netze erreichen zwar teils übermenschliche Leistungsfähigkeit, haben jedoch den großen Nachteil, dass sie oft ein „Black Box“-System sind. Das bedeutet, dass die internen Wege, wie Entscheidungen getroffen werden, sehr schlecht, bis gar nicht nachvollziehbar sind. Folglich daraus ist diesen Systemen bei der Entscheidungsfindung nur schwer zu vertrauen. Den im Bereich der Medizin ist vor allem für Ärzte die Transparenz wichtig, denn diese müssen die Entscheidung dann letztendlich vertreten und validieren. Ein Arzt tendiert eher nicht einem System zu folgen, welches für ihn undurchschaubar ist. Somit haben diese „Black Box“-Systeme geringere Akzeptanz bei medizinischem Personal.

Daher gewinnt der Ansatz der „Explainable AI“ (erklärbare KI) an Bedeutung, um die interne Logik von Modellen z.B. mittels Regelextraktion oder visueller Aufbereitung verständlich zu machen. Hier kann Fachpersonal, leichter Entscheidungen verstehen und im Falle einer Fehlfunktion besser von der empfohlenen Methodik abraten.

- **Validierung und Verifikation:**

Das Ziel aller Modelle ist es die Realität darzustellen oder etwas möglichst realitätsnah aufzuzeigen. Erst wenn das gegeben ist, können anhand eines Modells sinnvolle Vorhersagen getroffen werden. Die Validierung der Modelle ist ein wichtiger Schritt und ist entscheidend für die Anwendbarkeit eines Modells. In der Medizin bedeutet das z.B., ein prognostisches Modell zunächst retrospektiv an bekannten Patientendaten zu testen und anschließend prospektiv in klinischen Studien zu evaluieren. ²⁰

Hier besteht oft eine Lücke zwischen Forschung (die Prototyp-Modelle liefert) und praktischer Implementierung (die ein zertifiziertes, validiertes System erfordert).

Fehler in Modellen können schwere Folgen haben, den basierend auf dem Modell könnten dann falsche Schlussfolgerungen getroffen werden und aus diesen könnten dann falsche Entscheidungen entstehen. Eine falsche Entscheidung in der Medizin könnte schwere Folgen für einen Patienten haben. Im schlimmsten Fall, wenn das Modell zur Ermittlung von Nebenwirkungen eines Medikaments genutzt wird, könnte es sogar sehr schnell eine sehr große Menge an Patienten betreffen.

- **Regulatorische und rechtliche Aspekte:**

In sensiblen Bereichen wie zum Beispiel bei Diagnose-Software oder in der Therapie Hilfe muss neben einer guten Validierung auf noch mehr geachtet werden, denn hier gelten strenge Auflagen durch Aufsichtsbehörden. Ein KI-Modell, zum Beispiel, kann nach EU-Recht als Medizinprodukt gelten, das eine CE-Kennzeichnung benötigt. Die Behörden verlangen nachvollziehbare Evidenz für Sicherheit und Wirksamkeit eines Modells. Die Allgemeine Anerkennung für Computerbasierte Modelle ist nicht immer gegeben.²¹ Es herrschen weltweit unterschiedliche Regularien, mit welchen Modelle getestet und rechtlich abgenommen werden, diese fehlende internationale Harmonisierung, erschwert zudem die breite Einführung von großen Modellen.

Datenschutzrechtlich stellt die Modellierung auf Patientenbasis ebenfalls eine Herausforderung dar: Für die Nutzung von Versorgungsdaten zu Forschungszwecken müssen z.B. Einwilligungen (Broad Consent) vorliegen oder Pseudonymisierungsverfahren eingesetzt werden.

²⁰ Studysmarter, www.studysmarter.de, Q20

²¹ InVitro+Jobs, www.invitrojobs.com, Q21

- **Fachkräftemangel und interdisziplinäre Hürden:**

Die Entwicklung anspruchsvoller Medizinmodelle benötigt das richtige Fachpersonal, diese Fachpersonal braucht Wissen in der Informatik, sowie medizinische Expertise. Durch die gegebene Komplexität dieser beiden Felder ist dieses Fachpersonal sehr rar. Der enorme Arbeitsaufwand, der mit der Erstellung eines Modells einhergeht, macht das Problem nicht kleiner. Oft arbeiten Menschen aus unterschiedlichen Fachbereichen zusammen, welche jedoch oft nicht genug Kompetenz im jeweils andern Fachgebiet haben. Oft herrscht eine gewisse Aufteilung, medizinisches Personal stützt sich bei diesen Projekten oft sehr auf die Fakten-Seite, wobei das IT-Fachpersonal sich oft nur mit der Umsetzung beschäftigt. Diese Hürde, die hierbei entsteht, macht einen aufwändigen Prozess zu einem sehr umfangreichen Problem.

- **Wartung und Weiterentwicklung:**

Um das Ganze noch problematischer zu machen, besteht nun auch noch der Fakt, dass ein Modell nie zu Ende entwickelt ist und regelmäßig mit neuen Daten versorgt werden muss, um weiterhin repräsentativ die Realität darzustellen. Probleme wie der Fachkräftemangel und die interdisziplinären Hürden kommen hier natürlich auch wieder auf, jedoch muss auch bei Weiterentwicklung, erneute Validierung stattfinden. Wenn ein Modell nicht gewartet wird, dann entsteht ein Phänomen namens „Modell-Drift“, wobei sich die Voraussagefähigkeit des Modells stetig verschlechtert, da es den Bezug zur Realität verliert. Auch neue medizinische Erkenntnisse, sowie Überarbeitungen der Richtlinien erfordert Arbeit am Modell.

All diese Herausforderungen zeigen, dass erfolgreiche Projekte meist interdisziplinär, iterativ und mit starkem Qualitätsmanagement ablaufen müssen. Trotz der Hürden gilt: Die Medizininformatik hat in den letzten Jahren gezeigt, dass daten- und wissensbasierte Modelle einen echten Mehrwert stiften können – etwa in der Pandemie, wo mathematische Modelle und Simulationen entscheidend halfen, den möglichen Verlauf zu antizipieren und politisch fundierte Entscheidungen zu treffen. Die fortgesetzte Arbeit an besseren Daten, Standards und Algorithmen wird die meisten der genannten Probleme nach und nach entschärfen.²²

²² Social Science Open Access Repository, www.ssoar.info, Q22

4 SIMULATIONEN

4.1 EINSATZFELDER VON SIMULATIONEN

- **Aus- und Weiterbildung (Lehre):**

In der medizinischen Ausbildung hat die Simulation bereits einen festen Platz, den ihr keiner mehr nehmen kann. Simulationstraining hat sich über die Jahre stark bewährt, in der Aus- und Weiterbildung, sowie im Training von Ausnahmefällen. Studien zeigen sehr eindeutig, dass durch Training die Patientensicherheit stark erhöht wird, Fehler werden vermieden und klinisches Urteilsvermögen sowie Urteilsfähigkeit werden verbessert.²³ Die Simulation von Notfallszenarien (Herzinfarkte, Großeinsätze, Schockraum) sorgt für eine einzigartige Kompetenzbildung bei ausgebildetem Personal. Der größte Vorteil bei dieser Art Weiterbildung ist, alles kann trainiert werden, ohne dass ein Patient dabei zu Schaden kommen kann oder es zu Komplikationen kommt.

Auch sogenannte Team Trainings (Crew Resource Management in OP-Teams, Schockraummanagement) profitieren enorm von Simulation, da Kommunikation und Zusammenarbeit im Stress erprobt werden können. In jüngerer Zeit kommen Virtual Reality (VR)-Simulationen hinzu, etwa ein virtuelles Endoskopie-Training oder eine VR-Notfallraumumgebung, die ortsunabhängig Trainings ermöglicht. Zudem werden virtuelle Patientenfälle in den Curricula eingesetzt, wie an der Uni Heidelberg, um Praxisbezug schon in der Theoriephase herzustellen. Insgesamt verbessert Simulationstraining die Effektivität der Lehre und damit die Versorgungsqualität, da Absolventinnen besser vorbereitet in die Praxis gehen.²⁴

- **Therapie- und OP-Planung:**

Therapieplanung durch Simulation erweist sich immer mehr als essenziell. Genauso wird sie immer relevanter in der OP-Planung, wodurch sich schwierige oder komplexe Eingriffe schon vorher Anhand von Patientendaten in ein 3D-Modell umwandeln lassen, an welchem man nun per Simulation Schnitte und Zugangswege planen kann. Hierbei wird dann geplant, wie man die OP so minimalinvasiv wie möglich durchführen kann. Fraunhofer MEVIS berichtet etwa über die Simulation des Blutflusses im Herzen eines Patienten als Entscheidungsgrundlage für einen Eingriff.²⁵ Diese Patienten nahen Simulationen erleichtern die Entscheidungsfindung erheblich, den wir können verschiedene Szenarien einfach vorher ausprobieren, ohne den Patienten unnötigen Gefahren auszusetzen. Auch Bestrahlungspläne in der Radioonkologie werden zunehmend mit Simulationssoftware optimiert (z.B. Dosisverteilung simulieren, um gesundes Gewebe zu schonen).

²³ National Library of Medicine, [pmc.ncbi.nlm.nih.gov](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/), Q23

²⁴ Medizinische Fakultät Heidelberg, medizinische-fakultaet-hd.uni-heidelberg.de, Q24

²⁵ Fraunhofer MEVIS, [mevis.fraunhofer.de](https://www.mevis.fraunhofer.de/), Q25

- **Versorgungsmanagement und Prozessoptimierung:**

Versorgungsprozesse und Ressourcenverwaltungen, kann man, wenn sie vorher modelliert, wurden auch weiterführend in Simulationen darstellen und somit noch bessere Einblicke bekommen und Optimierungsmöglichkeiten erkennen. Das alles hat wie auch schon bei den Modellen das Ziel die Abläufe besser zu Analysieren und zu Optimieren.

Beispiele wären wie folgt: Kapazitätsplanung in Krankenhäusern (Simulation, wie viele Betten einer Intensivstation bei Pandemieverlauf nötig würden), Logistik (Simulation von Material- und Patientenflüssen, um Wartezeiten oder Wege zu minimieren) oder Notfallplanung (Durchspielen von Katastrophenszenarien, um die Vorbereitung zu testen).

Insgesamt können Simulationen Entscheidungsträgern helfen, "Was-wäre-wenn"-Analysen durchzuführen und evidenzbasierte Entscheidungen für Ressourcenallokation, Prozessänderungen oder Investitionen zu treffen, ohne ins kalte Wasser springen zu müssen.

- **Produktentwicklung und Geräte-Testung:**

Ein weiteres Einsatzgebiet ist direkt die Entwicklung von Produkten in der Medizin, sowie Software in der Medizin. Viele Hersteller von medizinischen Produkten testen diese Anhand von Simulationen, bevor sie in die klinischen Prüfungen übergehen. Hierbei verschwimmt die Grenze zwischen Modellierung, Prototyping und Simulation stark. Das alles hat einen hohen Innovationsgrad zur Folge, welcher die Entwicklung schnell vorantreibt.

4.2 VORTEILE DER ANWENDUNG VON SIMULATIONEN

Bei der Verwendung von Simulation ergeben sich viele Vorteile für die arbeitenden Teams, aber auch für die Patienten, diese Vorteile werden im Folgenden noch einmal strukturiert gesammelt und falls noch nicht genannt, ausführlich aufgeführt.

- **Allgemeine Verbesserung der Patientensicherheit:**

Dieser Punkt ist schon das ein oder andere Mal aufgekommen, jedoch ist es auch der entschiedenste, denn Sicherheit ist alles. Es ist ein absolutes Muss die Operationen für einen Patienten so sicher wie möglich zu gestalten und die Eingriffe so minimalinvasiv wie möglich zu halten. In einer Simulation herrscht das Motto: „Fehler machen erlaubt“, in der Realität: „Jeder Fehler, der verhindert werden kann, muss verhindert werden.“²⁶

- **Qualitäts- und Kompetenzsteigerung:**

Einige Studien besagen, wie schon erwähnt, das regelmäßiges Simulationstraining die klinischen Fähigkeiten und das Urteilsvermögen stark verbessern. Teams mit regelmäßigem Training arbeiten in echten Szenarien effizienter und koordinierter.²⁷

²⁶ National Library of Medicine, pmc.ncbi.nlm.nih.gov, Q26

²⁷ National Library of Medicine, Q27

- **Effizienz und Kostenersparnis:**

Zwar dauert das Aufsetzen eines Modells und der damit verbundenen Simulation einen großen Berg an Geld und Zeit, jedoch können damit Planungsfehler verhindert werden, die sehr viel mehr kosten könnten am Ende des Tages. Allein die Planung einer Krankenhauserweiterung legt viele Möglichkeiten der Simulation offen, „Sind die Wartebereiche groß genug?“, „Ist zum Tag der Eröffnung genug Personal da?“, „Gibt es Engpässe, die durch den Ausbau entstehen würden?“, dass alles sind Fragen, die sich mithilfe einer Simulation im vorherhinein beantworten lassen würden. Fehlentscheidungen bei diesen Fragen würden Umbauten am Gebäude oder Personalumstrukturierungen benötigen, welche einen sehr viel größeren wirtschaftlichen Aufwand hinter sich herziehen. Workflow-Simulationen ermöglichen effizientere Gesundheitsleistungen, indem Raum, Ausrüstung und Personal optimal genutzt werden, was bei meist knappen Ressourcen meist essenziell ist.²⁸

- **Beschleunigte Innovation und Forschung:**

Durch das virtuelle Versuchslabor namens „Simulation“ kann man schneller Dinge testen. Nahezu egal was kann zumindest in Teilstücken vorher in einer Simulation getestet werden. Dies kann sogar schon in der Prototyping-Phase stattfinden. Des Weiteren ist man in der Lage Dinge zu testen die in der realen Welt gar nicht möglich wären, da man hierfür Menschen in Lebensgefahr bringen müsste. Die Forschung profitiert noch mal extra von dem Fakt, dass alles viel schneller geht, denn es muss nicht mehr auf langwierige klinische Studien gewartet werden, sondern die Ergebnisse sind nahezu direkt auf dem Tisch, dies beschleunigt die Entwicklung von Therapien enorm.²⁹

- **Verfügbarkeit und Reproduzierbarkeit:**

Im Gegensatz zu passenden Laborbedingungen, sind Simulationsumgebungen, nachdem sie einmal aufgesetzt wurden, immer verfügbar und beliebig oft wiederholbar, ohne wertvolle Ressourcen zu verschwenden. Einen realen Patienten könnte man, selbst wenn man wollte, nicht mehrmals hintereinander mit anderen Rahmenbedingungen erneut vor den gleichen Test stellen, denn ein realer Körper braucht eine lange Erholungsphase, während man bei einer Simulation einfach neustartet. Durch die enorme Bandbreite an möglichen Wiederholungen kann ein sehr viel größerer Datenberg angehäuft werden, der der Medizin dann schlussfolgernd einen erhöhten Mehrwert liefert.³⁰

Natürlich müssen diesen Vorteilen die Grenzen der Simulation gegenübergestellt werden, wie im nächsten Abschnitt der Herausforderungen aufgeführt. Doch unterm Strich hat sich die Simulationsmethodik im Gesundheitswesen als enorm wertvoll erwiesen, um Sicherheit, Effizienz und Qualität zu steigern – ganz im Sinne des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses.

²⁸ Siemens Healthineers: „Workflow Simulation“, www.siemens-healthineers.com, Q28

²⁹ InVitro+Jobs, www.invitrojobs.com, Q29

³⁰ In Silico Trails: An updated SWOT Analysis, zenodo.org, Q30

4.3 HERAUSFORDERUNGEN BEI DER NUTZUNG SIMULATIONEN

Trotz ihres Nutzens bringt die Implementierung von Simulationen in der Medizin auch Herausforderungen mit sich:

- **Validität der Simulation:**

Es muss zwingend validiert werden, dass eine Simulation, die Realität nahe genug darstellt, damit die Ergebnisse übertragbar sind. Eine Simulation kann niemals besser sein, als das Modell, auf dem sie aufgebaut ist, ist das Modell nicht akkurat zur Realität, dann ist die Simulation zu Realitätsfremd, um sinnvolle Ergebnisse zu liefern.

Eine Simulationsvalidierung stellt sicher, dass das Modellverhalten dem realen Systemverhalten entspricht. Dies ist ein kontinuierlicher Prozess: Modelle und Simulatoren müssen regelmäßig nachjustiert werden, wenn neue Erkenntnisse auftauchen.³¹

- **Akzeptanz bei Anwendern:**

Die Einführung von Simulationen in den medizinischen Alltag, erfordert einen Kulturwandel innerhalb dieses Ökosystems. Es muss eine Menge an Personal von dem Nutzen der Simulationen überzeugt werden, diese müssen die neue Technik dann annehmen und auch in ihren Standardworkflow einbauen. In der Aus- und Weiterbildung ist Simulation schon seit einigen Jahren Standard, aber sobald eine Simulation dem entgegensteht, was eine Einheit im Management entschieden hat, steht oft ein gewisser Vorbehalt im Raum. Transparenz und Einbindung der Anwender in die Entwicklung von Szenarien erhöhen die Akzeptanz. Bei patientennahen KI-Simulationen (z.B. virtueller Zweitmeinung) müssen Ärzte darauf vertrauen können, dass die Simulations-“Empfehlung” valide ist. Vertrauen entsteht durch nachgewiesene Wirksamkeit und durch Erklärbarkeit. Zudem spielt die Behördenakzeptanz eine Rolle: Im Bereich in-silico Trials etwa ist die Zustimmung der Regulierer nötig, um Simulationsdaten offiziell zu nutzen, diese Akzeptanz ist leider von Land zu Land sehr unterschiedlich.³²

- **Ressourcenaufwand:**

Eine hochwertige Simulation, zieht genau wie das vorangehende Modell, erneut einen großen finanziellen und personellen Aufwand hinter sich her. Die benötigten Rechenzentren sind teuer und das nötige Fachpersonal oft schwer aufzufinden. Vor allem Simulationen, die mit modernster VR-Technik arbeiten sollen, benötigen einen enormen Ressourcenaufwand. Die aktuelle Lösung für dieses Problem ist, das meist große Unikliniken die Systeme bei sich aufstellen und diese dort gewartet und ausgebaut werden und dann kleinere Kliniken, diese zur Aus- und Weiterbildung mit verwenden.

³¹ Studysmarter, www.studysmarter.de, Q31

³² In Silico Trails: An updated SWOT Analysis, zenodo.org, Q32

- **Limitationen der Modelle:**

Keine Simulation kann die Realität in all ihren Facetten abbilden, unter anderem da sich die Realität zu schnell verändert und es zu viele Wahrscheinlichkeitsfaktoren gibt, die nahezu nicht zu erraten sind. Da sich diese Limitation auch schon bei den Modellen wiederfindet, ist es nur eine logische Schlussfolgerung, dass Simulationen auch diesem Limit folgen. Zum Beispiel beim Training von Notfallszenarien, wird des Öfteren kritisiert, dass die Teilnehmer darüber informiert sind, dass es sich hierbei „nur“ um eine Übung handelt. Es wird behauptet, dass die Simulation in diesem Fall nicht akkurat ist, da Faktoren wie physischer Stress nicht vorhanden sind. Zudem sind die Einzelszenarien von Patienten, oft nicht so dramatisch wie sie in der Realität durchaus sein könnten. Als Lösung hierfür werden vermehrt Psychologen und Organisationssoziologen in die Planung eingebunden, um menschliche Reaktionen so gut es geht nachzustellen.

- **Datenschutz und Ethik:**

Auch hier findet sich dasselbe Problem, wie bei den Modellen, wie können wir möglichst reale Daten in diese Systeme einspeisen, ohne den Datenschutz einer Person zu verletzen. Welche echten Klinikdaten können wir erheben, um die Simulationen besser der realen Welt anzupassen, während wir trotzdem noch alle Bestimmungen einhalten. Auch ethisch gibt es einige Probleme: Nur weil der virtuelle Patient in einer Simulation gut auf einen Therapieplan angeschlagen hat, heißt es noch nicht zwingend, dass das auch der Fall an der realen Person sein wird. Diese Fragen, die hier aufgeworfen werden, benötigen in Zukunft einiges an Denken, denn sie werden uns noch einige Zeit verfolgen.

5 ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN

Beide Technologien, auch wenn noch so sehr voneinander abhängig werden die Medizin doch auch ganz auf ihre Weise prägen und wir werden große Veränderungen in unserem Gesundheitswesen sehen. Im Folgenden wird erläutert inwiefern, dies passieren könnte und was aktuell so vermutet wird.

5.1 DIE ZUKUNFT VON MODELLEN

- **Digitale Zwillinge von Patienten:**

Es gibt Aussichten, dass man Anhang von Modellen und auch teils Simulation einen digitalen Zwilling von jemandem erstellt, also ein virtueller Medizinischer Mensch, welcher eine reale Person repräsentiert. Diese Modelle sollen dann anatomische, physiologische und molekulare Daten enthalten. Anhand dieser Daten kann man dann virtuelle Therapien testen.

In der Neuromedizin gibt es bereits Forschungsprojekte (z.B. ProModell), die hochpräzise Neuro-Zwillinge erzeugen. Diese erlauben es, Neurostimulations-Strategien (etwa bei Parkinson oder Querschnittslähmung) am Computermodell zu optimieren, bevor man sie dem realen Patienten appliziert.³³

Es ist durchaus auch vorstellbar das solche Zwillinge, in der Zukunft, auch in der Onkologie oder sogar der Chirurgie eingesetzt werden könnten.

- **KI-gestützte und selbstlernende Modelle der nächsten Generation:**

Der aktuelle Wandel in Sachen KI ist unaufhaltsam und zeigt auch in der Medizin immer mehr Fortschritt. Vor allem das Konzept der Deep-Learning-Modelle ist sehr interessant in diesem Fachbereich. Zwar ist man in der Medizin stark dem „Black Box“-Konzept abgeneigt, jedoch gibt es auch hier Möglichkeiten mit Hybridsystemen. Diese Hybriden Lösungen werden in den nächsten Jahren stark an Relevanz gewinnen. Auch „transfer learning“ (Nutzung vortrainierter Modelle) und „federated learning“ (Verteiltes Lernen über Standorte hinweg, ohne Datenzusammenführung) werden die datengetriebene Modellierung im deutschen Gesundheitswesen voranbringen, da sie Datenschutzproblemen entgegenkommen. Wichtig wird sein, Mechanismen für die Erklärbarkeit zu standardisieren, damit KI-basierte Modelle vertrauenswürdig in klinische Entscheidungsprozesse eingebunden werden können.³⁴

- **Standardisierung und Interoperabilität als Enabler:**

In Zukunft wird die weitere Standardisierung von medizinischen Daten und Schnittstellen eine noch größere Rolle spielen. Das Zusammenführen der ganzen Insellösungen der Einzelkliniken wird eine große Herausforderung, doch die Daten, die darin verborgen sind, sind zu wertvoll, dass man sich dieses Problems nicht annimmt. Gemeinsame Datentypen und Speichernormen werden den Aufwand, den der Bau eines neuen Systems mit sich bringt, weiter minimieren. Auch die Möglichkeit Daten zwischen Kliniken und Forschungseinrichtungen frei auszutauschen, bringt große Möglichkeiten mit

³³ Miracum „ProModell“, www.miracum.org, Q33

³⁴ Medizininformatik-Initiative, www.medizininformatik-initiative.de, Q34

sich. Die Datenaufbereitungsphase, die aktuell den größten Teil der Entwicklung von Modellen und Simulationen in Anspruch nimmt, wird enorm weniger Zeit in Anspruch nehmen, da die Daten dann lediglich nur noch validiert werden müssen, anstatt das vorher noch eine Vereinheitlichung stattfinden muss.³⁵

- **In-silico Trials und virtuelle Studien:**

Studien aktuell auch noch lange Zeiträume beanspruchen, könnten auch in Modelle verpackt werden und damit erheblich schneller sein. Bereits heute arbeiten Start-ups an virtuellen Patientenkollektiven (z.B. Virtonomy mit virtuellen Patienten, einem digitalen Zwilling für klinische Studien). Die Vorteile liegen auf der Hand: Kosten- und Zeitersparnis bis zur Marktreife neuer Therapien, da weniger physische Probanden benötigt werden, und Experimente beliebig oft wiederholbar sind. Zugleich eröffnen in-silico Trials die Chance, N-of-1-Trials (individuelle Tests am Modell) und Forschung zu seltenen Krankheiten zu ermöglichen, wo reale große Studien oft unmöglich sind.³⁶

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entwicklung von Modellen, der der Simulationen vorausgeht. Die Zukunft wird vor allem dadurch geprägt werden, wie schnell die Industrie die gegebene Rechenleistung steigert und wie die Rahmenbedingungen zu Datenschutzrechtlichen und Ethischen Richtlinien in einigen Jahren aussehen werden. Die Technik wird sich weiter verbessern und sie wird ein Standard im medizinischen Alltag, um das Personal, welches aktuell oft überlastet ist, sinnvoll zu unterstützen und alles präziser, effizienter und sicherer zu gestalten.

5.2 DIE ZUKUNFT VON SIMULATIONEN

- **Immersive Technologien und verstärkte Virtualisierung:**

Virtual Reality und Augmented Reality werden in den nächsten Jahren enorm an Relevanz gewinnen und in zwei, drei Jahrzehnten, werden sie nicht mehr wegzudenken sein. Die VR-Technologien zur Aus- und Weiterbildung werden sich enorm verbessern und das haptische Feedback wird immer realistischer werden. Dies wird die Ausbildungsqualität erhöhen und eventuell zu extrem gut ausgebildetem Personal führen. Durch das daraufhin auch verbesserte patientenindividuelle Training werden Eingriffe wesentlich sicherer und minimalinvasiver für den Patienten. AR-Technologien könnten operierenden Chirurgen aktuelle Informationen über den Patienten direkt liefern, ohne das dieser seine aktuelle Haltung ändern müsste.

- **Integration von Echtzeitdaten und KI in Simulationen:**

Simulationen in Zukunft könnten aufgrund der steigenden Verfügbarkeit an Rechenleistung, immer mehr mit Echtzeitdaten arbeiten, was aktuell vor allem bei Simulationen, die auf datengetriebenen Modellen bestehen, nicht der Fall ist. Mit IoT-Geräten im Krankenhaus (Stichwort Smart Hospital) könnten

³⁵ National Library of Medicine, pubmed.ncbi.nlm.nih.gov, Q35

³⁶ Medica Start-ups, www.medica.de, Q36

laufende Prozesse kontinuierlich überwacht und parallel in einem Simulations-“Shadow” gespiegelt werden. So entstünde eine Art Live-Digitalzwillings des Krankenhauses, an dem man unmittelbar Änderungen testen könnte (“Wenn wir jetzt Station X schließen, was passiert mit der Patientenverteilung?”). KI-Algorithmen könnten aus diesen Echtzeitsimulationen automatisch Optimierungsvorschläge generieren (z.B. Personalumlagerung bei prognostiziertem Engpass in Notaufnahme in 2 Stunden). Solche adaptiven Simulationen würden das Versorgungsmanagement auf eine neue Stufe heben.

- **Neue Anwendungsfelder:**

Mit fortschreitender Technik würden sich Anwendungsfelder auftun, bei denen heute eine Simulation noch undenkbar ist. Es könnte Simulationen geben, die Patienten selbst durchführen könnten, die anhand ihres virtuellen Zwillings Lebensstilveränderungen und deren Auswirkungen simulieren. Somit könnten Menschen, denen ihre Gesundheit wichtig ist, besser auf ihren eignen Körper eingehen. Genauere Simulationen bei der Public Health, könnten der Politik helfen Pandemieregeln und deren Auswirkungen besser abzuschätzen, wodurch sinnvollere Maßnahmen getroffen werden könnten, die in der Bevölkerung dann vielleicht auch auf mehr Akzeptanz treffen.

Zusammenfassend lässt sich auch hier sagen, dass die Entwicklung Richtung mehr Rechenleistung und mehr Akzeptanz einen unvorhersehbaren Durchbruch liefern könnte. Virtuelle Kliniken, digitale Patienten und KI-Assistenten werden Zukunftsentscheidend werden. Sobald die Grundlagen und Herausforderungen größtenteils bewältigt sind, werden wir vor einer großen Wende in der Medizin stehen. Jegliche Aspekte lassen sich mithilfe von Simulationen und Modellen verbessern. Beginnend mit der Ausbildung über Weiterbildungen und Schulungen, bis hin zur patientenspezifischen Schulung wird alles noch besser und schneller möglich sein. Die Zukunftsvorhersagen werden genauer werden und es können sinnvollere Entscheidungen getroffen werden. Doch das Wichtigste an dem ganzen ist: Die Sicherheit für das Personal und den Patienten, der am Ende des Tages auf dem Operationstisch liegt, steigt. Weniger Komplikationen, mehr richtige Entscheidungen.

6 LITERATURVERZEICHNIS

Q1: Universität Leipzig, 08.07.25

www.imise.uni-leipzig.de/Lehre/MSc-Medizininformatik/Ueber-den-Studiengang/Was-ist-Medizinische-Informatik

Q2: Digitalisierung der Medizin, 08.07.2025

<https://digitalisierungdermedizin.de/page/3/#>

Q3: Medizininformatik Initiative, 08.07.2025

<https://www.medizininformatik-initiative.de/de/die-medizininformatik-ist-ein-wegbereiter-der-personalisierten-medicin>

Q4: Wikipedia, 08.07.2025

https://de.wikipedia.org/wiki/Agentenbasierte_Modellierung

Q5: Medizininformatik Initiative, 08.07.2025

<https://www.medizininformatik-initiative.de/de/die-medizininformatik-ist-ein-wegbereiter-der-personalisierten-medicin>

Q6: Verein Deutscher Ingenieure, 08.07.2025

<https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3633-simulation-von-logistik-materialfluss-und-produktionssystemen-begriffe>

Q7: Wikipedia, 08.07.25

<https://de.wikipedia.org/wiki/Simulation>

Q8: National Library of Medicine, 08.07.25

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7879591>

Q9: Medizinische Fakultät Heidelberg, 08.07.25

<https://www.medizinische-fakultaet-hd.uni-heidelberg.de/studium-lehre/studium/medizin/lehrkonzepte/digitales-lernen/virtuelle-patienten>

Q10: Simplan, 08.07.25

<https://www.simplan.de/services/krankenhaussimulation>

Q11: Simplan-Krankenhaussimulation, 08.07.25

<https://www.krankenhaussimulation.de>

Q12: Splunk-Blog, 08.07.25

https://www.splunk.com/de_de/blog/learn/predictive-modeling.html

Q13: DocCheck-Flexikon, 08.07.25

<https://flexikon.doccheck.com/de/Risikostratifikation>

Q14: Medizininformatik-Initiative, 08.07.25

<https://www.medizininformatik-initiative.de/de/die-medizininformatik-ist-ein-wegbereiter-der-personalisierten-medicin>

Q15: Medizininformatik-Initiative, 08.07.25

<https://www.medizininformatik-initiative.de/de/die-medizininformatik-ist-ein-wegbereiter-der-personalisierten-medicin>

- Q16: Publisso, 08.07.25, (University Leipzig, Germany),
<https://journals.publisso.de/index.php/en/journals/mibe/volume10/mibe000151>
„Analysis and prediction of effects of the Manchester Triage System on patient waiting times in an emergency department by means of agent-based simulation“
- Q17: Westfälisches Institut für Gesundheit, 08.07.25,
<https://gesundheit.w-hs.de/forschungsschwerpunkte/biomedizinische-modellierung-und-simulation>
- Q18: Medizininformatik-Initiative, 08.07.25,
<https://www.medizininformatik-initiative.de/de/die-medizininformatik-ist-ein-wegbereiter-der-personalisierten-medizin>
- Q19: Springer Nature, 08.07.25, Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung,
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00103-024-03888-4>
„Arbeitsgruppe Interoperabilität: Kerndatensatz und Informationssysteme für Integration und Austausch von Daten in der Medizininformatik-Initiative“
- Q20: StudySmarter, 08.07.25, Simulationsvalidierung,
<https://www.studysmarter.de/schule/informatik/technische-informatik/simulationsvalidierung>
- Q21: InVitro+Jobs, 08.07.25,
<https://www.invitrojobs.com/index.php/de/neuigkeiten/news-archiv/item/6660-swot-analyse-pro-und-contra-in-silico-studien>
- Q22: Social Science Open Acces Repository, 08.07.25,
<https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/86139>
Direkt zum Dokument: <https://www.tatup.de/index.php/tatup/article/view/7038>
- Q23: National Library of Medicine, 08.07.25,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7879591>
- Q24: Medizinische Fakultät Heidelberg, 08.07.25,
<https://www.medizinische-fakultaet-hd.uni-heidelberg.de/studium-lehre/studium/medizin/lehrkonzepte/digitales-lernen/virtuelle-patienten>
- Q25: Fraunhofer MEVIS, 08.07.25, Patienten-individuelle Modellierung,
<https://www.mevis.fraunhofer.de/de/business-areas/integrative-klinische-entscheidungsunterstuetzung.html>
- Q26: National Library of Medicine, 09.07.25,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7879591>
- Q27: National Library of Medicine, 09.07.25,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7879591>
- Q28: Siemens Healthineers: “Workflow Simulation”, 09.07.25,
<https://www.siemens-healthineers.com/de-ch/services/value-partnerships/workflow-simulation>
- Q29: InVitro+Jobs, 09.07.25,
<https://www.invitrojobs.com/index.php/de/neuigkeiten/news-archiv/item/6660-swot-analyse-pro-und-contra-in-silico-studien>

Q30: In Silico Trials: An updated SWOT Analysis, 09.07.25,
<https://zenodo.org/records/14011927>

Q31: StudySmarter, 09.07.25, Simulationsvalidierung,
<https://www.studysmarter.de/schule/informatik/technische-informatik/simulationsvalidierung>

Q32: In Silico Trials: An updated SWOT Analysis, 09.07.25,
<https://zenodo.org/records/14011927>

Q33: Miracum, „ProModell“, 08.07.2025,
<https://www.miracum.org/forschung/nachwuchsforschergruppen/promodell>

Q34: Medizininformatik-Initiative, 08.07.25,
<https://www.medizininformatik-initiative.de/de/die-medizininformatik-ist-ein-wegbereiter-der-personalisierten-medizin>

Q35: National Library of Medicine, 09.07.25,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38753022>

Titel: Interoperability Working Group: core dataset and information systems for data integration and data exchange in the Medical Informatics Initiative

Q36: Medica Start-ups “Virtonomy”, 09.07.25,
https://www.medica.de/de/digital-health/Virtonomy_Digitaler_Zwilling_f%C3%BCr_die_Durchf%C3%BChrung_von_klinischen_Studien

7 ERKLÄRUNGEN

Die Unterzeichnung der Selbstständigkeitserklärung ist obligatorisch. Die Unterzeichnung der Ermächtigung ist optional.

7.1 SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit habe ich bisher keinem anderen Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt. Sie wurde bisher nicht veröffentlicht.

Ort, Datum

Unterschrift

7.2 ERMÄCHTIGUNG

Die Urheberin/Der Urheber der studentischen Arbeit kann (muss nicht) erklären, dass die Hochschule Kempten folgende Nutzungsrechte erhält.

☐ Hiermit ermächtige ich/wir die Hochschule Kempten zur Veröffentlichung einer Kurzzusammenfassung sowie Bilder/Screenshots und ggf. angefertigte Videos meiner studentischen Arbeit z. B. auf gedruckten Medien oder auf einer Internetseite der Hochschule Kempten zwecks Bewerbung des Bachelorstudiengangs „Game Engineering“ und des Masterstudiengangs „Game Engineering und Visual Computing“.

Dies betrifft insbesondere den Webauftritt der Hochschule Kempten inklusive der Webseite des Zentrums für Computerspiele und Simulation. Die Hochschule Kempten erhält das einfache, unentgeltliche Nutzungsrecht im Sinne der §§ 31 Abs. 2, 32 Abs. 3 Satz 3 Urheberrechtsgesetz (UrhG).

Ort, Datum

Unterschrift