

Simulation der Intensivkapazitäten in Krankenhäusern für Covid-19-Patienten

HARTMUT STADTLER, HAMBURG, SVEN SPIECKERMANN, HANAU 
 JONAS SCHREYÖGG, HAMBURG

Einleitung

Zur Bewältigung der möglichen Auswirkungen der Covid-19-Pandemie wurden ab Mitte März 2020 bis zu 50% der etwa 28000 Intensivbetten in deutschen Krankenhäusern für Covid-19-Patienten freigehalten (BMG, 2020). Die damit verbundene Verschiebung vieler planbarer Operationen hatte erhebliche gesellschaftliche »Kosten« zur Folge. Zudem hat der Bund den Krankenhausbetreibern für jedes freigehaltene Bett 560,- pro Tag erstattet (Baltzer, 2020).

Mit der Verbesserung der (Kurzzeit-) Prognosen der zu erwartenden Neuinfizierten und der Kenntnis des Behandlungsverlaufs vieler Covid-19-Patienten ist es nunmehr möglich geworden, den Bedarf an Intensivkapazitäten (wie Betten und Beatmungsgeräte) in den einzelnen Krankenhäusern besser abzuschätzen und zielgenauere Reservierungen für Covid-19-Patienten vorzunehmen. Hierzu bietet sich ein stochastisch-dynamisches Simulationsmodell an, das im Folgenden in den Grundzügen beschrieben wird.

Aufgabenstellung

Das vorgeschlagene Simulationsmodell hat die Aufgabe, die in einem gegebenen Zeitraum möglichen Einweisungen von Covid-19-Patienten in ein Krankenhaus tagesgenau zu simulieren und die Patienten entsprechend ihres Behandlungsbedarfs den vorhandenen potentiellen Engpasskapazitäten (z.B. den Betten und Beatmungsgeräten) zuzuordnen.

Das Simulationsmodell soll in ein interaktives Softwaresystem eingebettet werden und auf die bereits im Gesundheitswesen vorhandenen Daten zurückgreifen. Die Ergebnisse der Simulation können z.B. als Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Auslastungen der Engpasskapazitäten eines Krankenhauses und der zu erwartenden Anzahl der nicht angemessen behandelbarer Patienten in zeitlicher und räumlicher Sicht dargestellt werden.

Das Softwaresystem soll für strategische Fragestellungen (z.B. zur Höhe und geografischen Verteilung von zusätzlich benötigten Kapazitäten) als auch für die operative Planung in den einzelnen Krankenhäusern zum Einsatz kommen.

Das Softwaresystem

Aufbau. Das Softwaresystem besteht im Wesentlichen aus vier Modulen (Abb. 1): der Aufbereitung der Inputdaten, dem eigentlichen Simulationsmodell (Simulator), der Auswertung der Simulationsergebnisse (Output) und der Planung und Durchführung von Experimenten.

Inputdaten. Wir gehen in einem ersten Schritt davon aus, dass jedes Krankenhaus, das für die Aufnahme von Covid-19-Patienten zur Verfügung steht, einzeln betrachtet wird. Ferner unterstellen wir, dass die Einzugsbereiche für die Zuweisung von Patienten zu Krankenhäusern überschneidungsfrei sind.

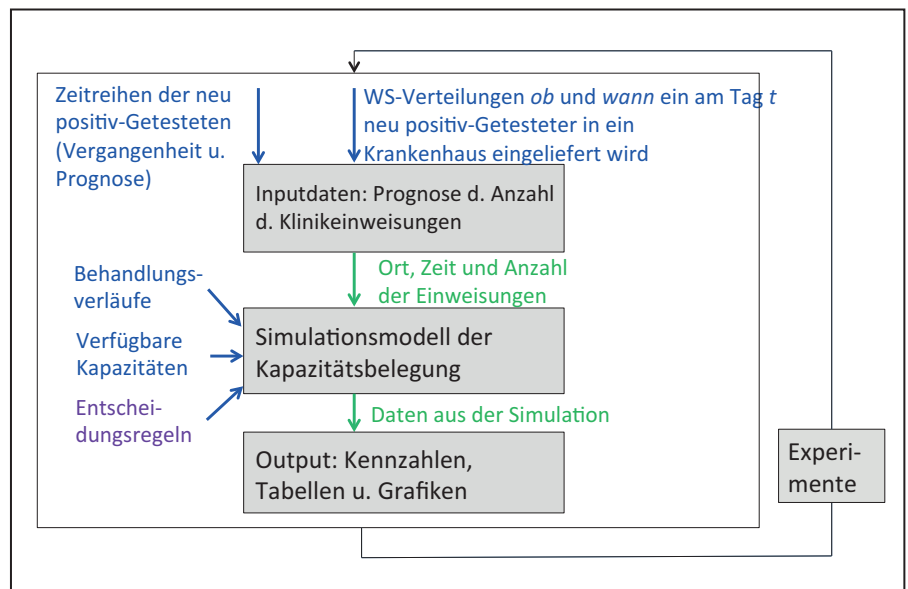


Abb. 1: Aufbau des Softwaresystems

Als Inputdaten werden benötigt

- eine tagesgenaue Zeitreihe bestehend aus der Anzahl der gemeldeten Neuinfizierten der letzten 21 Tage und der Prognose der Neuinfizierten während des Simulationszeitraums im Einzugsbereich eines Krankenhauses,
- eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die angibt, nach wie vielen Tagen eine neu-positiv-getestete Person in ein Krankenhaus eingewiesen wird (sofern überhaupt eine Krankenhausbehandlung erforderlich ist),
- eine Menge an bereits abgeschlossenen Behandlungsverläufen und
- Angaben zu den potentiellen Engpasskapazitäten in einem Krankenhaus zur Behandlung von Covid-19-Patienten.

Diese Daten werden bereits heute im DIVI Intensivregister, den Gesundheitsämtern und den Krankenhäusern erfasst. Es ist allerdings zu prüfen, ob diese in dem gewünschten Detaillierungsgrad zur Verfügung stehen.

Eine Besonderheit unseres Simulationsmodells ist die Verwendung von bereits abgeschlossenen Behandlungsverläufen von Covid-19-Patienten in Krankenhäusern. Ein Behandlungsverlauf enthält insbesondere Informationen zu den Behandlungsdauern auf einer »normalen« Covid-19-Station und auf eine Covid-19-Intensivstation und den dabei benötigten (weiteren) potentiellen Engpassressourcen (z.B. den Beatmungsgeräten).

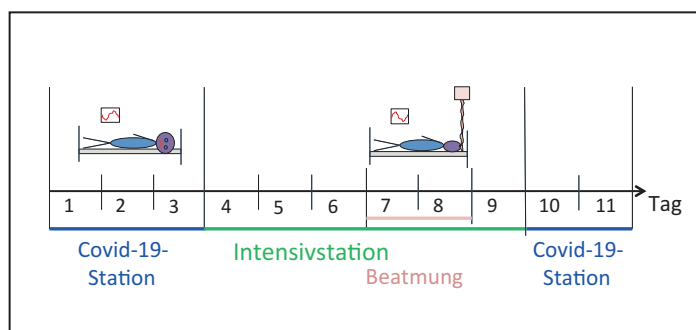


Abb. 2: Ein abgeschlossener Behandlungsverlauf eines Covid-19-Patienten

Abb. 2 visualisiert einen fiktiven Behandlungsverlauf: Ein am Tag X eingelieferter Patient wird nach drei Tagen von einer Covid-19-Station auf eine Intensivstation verlegt und dort am siebten und achten Tag beatmet. Am zehnten Tag kehrt der Patient auf eine Covid-19-Station zurück und wird am elften Tag entlassen.

Weitere Informationen ergänzen den Behandlungsverlauf, wie die eingesetzten Therapien/Medikamente und die Eigenschaften des Patienten, wie Alters- und Blutgruppe sowie Vorer-

krankungen. Diese Informationen sind anonymisiert zu speichern. Diese »weiteren Informationen« erlauben u.a. eine nachfolgende (Neu-)Zuordnung eines Behandlungsverlaufs zu einer Risikogruppe und eine spätere Prüfung, ob ein Behandlungsverlauf aufgrund des medizinischen Fortschritts noch verwendet werden sollte.

Mit den Inputdaten lässt sich eine *stochastisch dynamische Simulation* für die in den nächsten Tagen wahrscheinlichen Einweisungen von Covid-19-Patienten und der Belegung der potentiellen Engpassressourcen durchführen.

Simulationsmodell. Als bewegliche Objekte werden die einem Krankenhaus zugewiesenen Covid-19-Patienten mit ihren Eigenschaften betrachtet. Eine Eigenschaft ist der bei Aufnahme eines Patienten *zufällig* zugeordnete Behandlungsverlauf. Weitere bewegliche Elemente sind die vorhandenen Beatmungsgeräte.

Zu den ortsfesten Objekten zählen die für »normale« Covid-19-Patienten vorgesehenen Betten sowie die reservierten Betten auf einer oder mehreren Intensivstationen in einem Krankenhaus. Zu beachten ist, dass Kapazitätsanpassungen nur in Betteneinheiten einer ganzen Station möglich sind.

Kommt es zu einer Engpasssituation, d.h. steht ein freies Bett/Gerät für die notwendige Behandlung eines Covid-19-Patienten nicht am selben Tag zur Verfügung, werden Entscheidungsregeln benötigt. Zu beachten ist, dass ein Covid-19-Patient i.d.R. nur wenige Stunden auf ein für die Behandlung erforderliches Bett/Gerät warten kann.

Geht man von einer harten Kapazitätsgrenze aus, bietet sich die Umsetzung der Empfehlungen des Deutschen Ethikrates zur Lösung von Konflikten bei einem Kapazitätsengpass an. Weitere Möglichkeiten der Konfliktlösung sind die kurzfristige Beschaffung fehlender Geräte (z.B. mobiler, zentral verwalteter Geräte) oder die Verlegung von Patienten in andere Krankenhäuser. In einem ersten Schritt schlagen wir allerdings die Belegung von fiktiven Zusatzkapazitäten innerhalb des Simulationsmodells vor. Werden diese in Anspruch genommen, lassen sich Wahrscheinlichkeiten für Engpassituationen an den einzelnen Tagen des Simulationszeitraums berechnen. Die Lösung einer Konfliktsituation obliegt dann den Entscheidungsträgern ex-post und wird nicht simulationsintern vorgenommen.

Da eine tagesgenaue Abbildung des »Systems« angemessen ist, bietet sich eine zeitorientierte Ablaufsteuerung an. Dabei ist zu beachten, dass eine Freigabe potentieller Engpasskapazitäten so erfolgt, dass eine erneute Belegung am selben Tag möglich ist. Selbstverständlich ist auch eine ereignisorientierte Ablaufsteuerung möglich.

Output. Grundsätzlich erlaubt eine stochastisch, dynamische Simulation vielfältige Auswertungen zur Auslastung und (Behandlungs-) Belegungsdauer der modellierten Objekte.

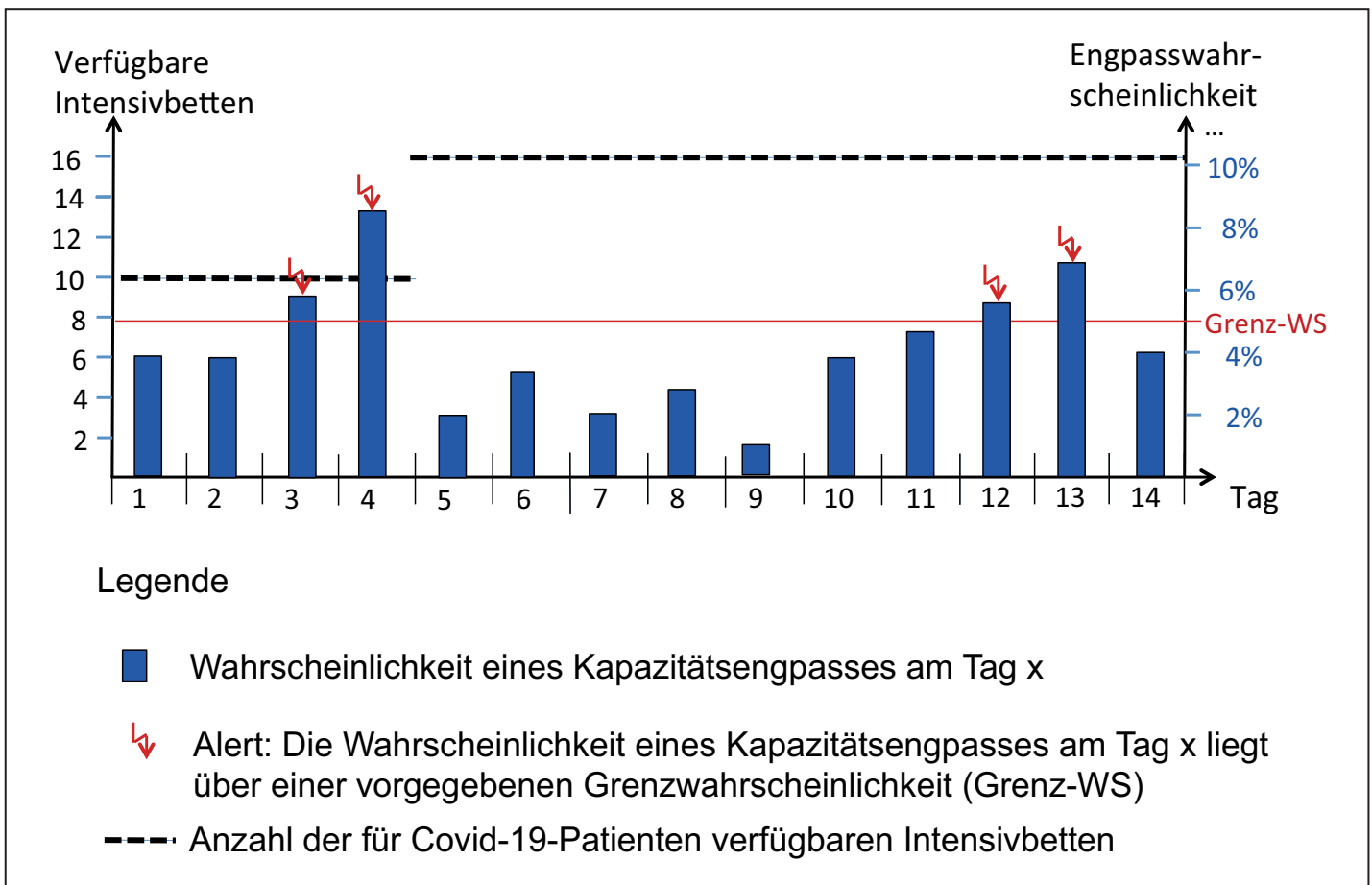


Abb. 3: Wahrscheinlichkeit der Überschreitung der verfügbaren Kapazität und Alerts

Abb. 3 zeigt exemplarisch eine Gegenüberstellung der verfügbaren Anzahl an Intensivbetten eines Krankenhauses (linke Ordinate) in einem Simulationszeitraum von 14 Tagen. Zusätzlich wird für jeden Tag die Wahrscheinlichkeit angegeben, dass die verfügbare Bettenanzahl nicht ausreicht (rechte Ordinate). Liegt diese über einer vorgegebenen Grenzwahrscheinlichkeit, wird ein »Alert« erzeugt und damit auf einen möglichen Handlungsbedarf aufmerksam gemacht. Ergänzend kann die an einem Tag erwartete benötigte Zusatzkapazität berechnet und eingeblendet werden.

Experimente. Zur Durchführung von Experimenten mit dem Simulator ist auch das Anlegen und Verwalten von Szenarien und deren Ergebnisse vorgesehen. So soll es möglich sein, Teilmengen der gespeicherten Behandlungsverläufe nach bestimmten Kriterien zu selektieren oder auch gänzlich neue Behandlungsverläufe »künstlich« zu generieren und zu simulieren. Hiermit lassen sich die Auswirkungen neuer Behandlungsmethoden und Medikamente auf die Kapazitätsbedarfe abschätzen. Schließlich können auch alternative Prognosen zur Anzahl der Neuinfizierten Anlass zum Anlegen von Szenarien sein.

Einsatzmöglichkeiten

Das vorgeschlagene Softwaresystem eignet sich grundsätzlich sowohl für die operative als auch die strategische Planung der potentiellen Engpasskapazitäten in Krankenhäusern. Für die strategische Planung können Auswertungen unmittelbar nach Ablauf einer Warm-up-Periode vorgenommen werden.

Für die operative Planung ist der Ausgangszustand der Belegung der potentiellen Engpasskapazitäten von großer Bedeutung: Neben der Freigabe von Kapazitäten zu Simulationsbeginn ist auch für jeden Covid-19-Patienten der voraussichtlich verbleibende Behandlungsverlauf zu überprüfen und ggf. anzupassen. Noch besser wären alternative verbleibende Behandlungsverläufe mit Angabe der Eintrittswahrscheinlichkeiten. Derartige Eingaben können nur von einem Stationsarzt einer Covid-19- oder Intensivstation vorgenommen werden.

Beurteilung und Ausblick

Das Softwaresystem wird nur dann erfolgreich sein, wenn die Logik des Simulationsmodells den Beteiligten im Gesundheitswesen einfach zu vermitteln und der Aufwand, insbesondere in den Krankenhäusern, möglichst gering ist. Entsprechend basiert unser Vorschlag ausschließlich auf bereits im Gesundheitswesen vorhandenen Daten. Zudem sollte die operative Planung dezentral in den einzelnen Krankenhäusern erfolgen. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass der Einsatz des Softwaresystems die Einrichtung einer zentralen Betreuungsstelle (mit OR- und Statistik-Expertise) erfordert. Aber auch die Politik ist gefordert, z.B. bei der Vorgabe von Grenzwerten (Wahrscheinlichkeiten), die eine Überlast der potentiellen Engpassressourcen anzeigen.

Sind mögliche Engpasssituationen krankenhausintern nicht mehr behebbar, muss eine zentrale Koordinierungsstelle (z.B. auf Landesebene) über Ausgleichsmaßnahmen beschließen. Diese könnten darin bestehen, neue Patienten auf weniger ausgelastete Krankenhäuser umzuverteilen. Diese und weitere Entscheidungsprobleme, die zur Bewältigung der Covid-19-Pandemie zu lösen sind und für die sich eine diskrete, ereignisgesteuerte Simulation anbietet, haben Currie et al. (2020) zusammengestellt.

Weitere Verbesserungen der Prognosegüte des Softwaresystems sind zu erwarten, wenn die Inputdaten (z.B. die Prognosen der Neuinfizierten) nach Risikogruppen differenziert werden.

Nachtrag

Am 4. April 2020 haben wir eine erste Projektskizze an den Krisenstab des BMG gesandt. Am 27. April teilte das Bundesgesundheitsministerium in einem Faktenpapier (BMG, 2020) öffentlich mit, dass das DIVI-Intensivregister zu einem Tool weiterentwickelt werden soll, das » ... den COVID-19-bedingten Bedarf an Intensivbetten bundesweit und regional für die nächsten zwei Wochen vorhersagt«.

Danksagungen

Wir danken Herrn Wolfgang Brüggemann für den Anstoß zu diesem Projekt und Herrn Jan Grimminger für Beiträge aus fachärztlicher Sicht.

Quellen

- Baltzer, S., »Das Aktiengesetz gilt auch für Bad Neustadt«, Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 17. Mai 2020, S. 31
- Bundesministerium für Gesundheit (BMG), *Ein neuer Alltag auch für den Klinikbetrieb in Deutschland*, 24.04.2020, abrufbar unter https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3_Downloads/C/Coronavirus/Faktenpapier_Neuer_Klinikalltag.pdf
- Currie, C.S.M., J.W. Fowler, K. Kotiadis, T. Monks, B.S. Onggo, D.A. Robertson, A.A. Tako, *How simulation modelling can help reduce the impact of COVID-19*, Journal of Simulation, 14:2, 83-97, (2020), DOI:10.1080/17477778.2020.1751570
- Deutscher Ethikrat, *Solidarität und Verantwortung in der Corona-Krise*, Ad-hoc-Empfehlung, Berlin, 27. März 2020



GOR – Vorstand

Gesellschaft für Operations Research e. V.

Vorstandsbereich
»Vorsitz«

Prof. Dr. Anita Schöbel
Technische Universität Kaiserslautern
Professur für Angewandte Mathematik
Fachbereich Mathematik
Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 48
67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631 205 5048
Fax: 0631 205 2748
E-Mail: vorstand_vorsitz@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Arbeitsgruppen«

Prof. Dr. Alexander Martin
Universität Erlangen-Nürnberg
Department Mathematik
Lehrstuhl für Wirtschaftsmathematik
Cauerstraße 11
91058 Erlangen
Tel.: 09131 85-67163
E-Mail: vorstand_arbeitsgruppen@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Finanzen«

Dr. Ulrich Dorndorf
INFORM GmbH
Pascalstr. 23
52076 Aachen
Tel.: 02408 9456-1160
Fax: 02408 6090
E-Mail: vorstand_finanzen@gor-ev.de

Vorstandsbereich
»Tagungen«

Prof. Dr. Peter Letmathe
RWTH Aachen
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
Lehrstuhl für Controlling
Templergraben 64. 52062 Aachen
Tel.: 0241 80-96164
Fax: 0241 80-92167
E-Mail: vorstand_tagungen@gor-ev.de

Vorstandsassistent: Dr. Philine Schiewe, Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Mathematik, Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 14
67663 Kaiserslautern, Tel.: 0631 205 4590, E-Mail: vorstand_assistent@gor-ev.de