

MODUS-COVID Bericht vom 23.10.2020

Sebastian Alexander Müller¹, William Charlton¹, Natasa Djurdjevac Conrad², Ricardo Ewert¹, Christian Rakow¹, Hanna Wulkow², Tim Conrad², Kai Nagel¹, Christof Schütte²

¹Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik (“VSP”), TU Berlin,
nagel@vsp.tu-berlin.de

²Zuse-Institut Berlin (“ZIB”)

Available via TU Berlin repository: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10662.2>

Date of this version: 23-october-2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Website: <https://covid-sim.info>

Bericht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) vom 23.10.2020:

1 Zusammenfassung

1. Falls das politische Ziel sein sollte, R wieder unter 1 zu drücken, so ist zu beachten, dass dies mit immer höheren Infektionszahlen immer schwieriger wird, da der Anteil der Kontaktnachverfolgung mit deren Überlastung immer kleiner wird, und somit durch immer mehr weitere Maßnahmen ergänzt werden muss.
2. Im folgenden listen wir mögliche Maßnahmen auf, die wir durchgerechnet haben. Für die quantitativen Wirkungen der Maßnahmen siehe den Abschnitt 3 “Maßnahmenrechner”.
 - a. Unsere Rechnungen zeigen, dass nur deutliche Einschränkungen im Freizeitbereich genügend Wirkung hätten, um R unter den kritischen Wert von 1 zu drücken.
 - b. Dies wäre optimalerweise verbunden mit einer sehr deutlichen Aufstockung der Kapazitäten bei der Kontaktnachverfolgung. Diese Aufstockung müsste der exponentiellen Kurve der Neuinfektionen folgen, d.h. die notwendigen Kapazitäten verdoppeln(!) sich jede Woche erneut. Lt. unseren Rechnungen wäre heute (23.10) eine Verdreifachung nötig, in einer Woche wäre es eine Versechsfachung.
 - c. Sperrstunden oder Ausgangssperren im Freizeitbereich wirken, zeigen eine deutliche Wirkung aber nur bei Sperrzeiten deutlich vor 23 Uhr. Grund ist, dass außer freitags und samstags abends die meisten Freizeitaktivitäten ohnehin vor 23 Uhr enden.
 - d. Im Bereich “Arbeit” empfehlen wir weiterhin Homeoffice, Einzelzimmer oder durchgehende Maskenpflicht auch am Arbeitsplatz. Dies würde lt. unseren Rechnungen einen deutlichen Beitrag zur Reduktion von R leisten, aber nicht ausreichen, um R wieder unter 1 zu drücken.
 - e. Im Bereich “Schule” empfehlen wir Masken auch am Sitzplatz und/oder halbierte Klassenstärken mit alternierenden Schultagen. Insgesamt sind die Schulen lt. unseren Simulationen keine starken Infektionstreiber.
3. Unsere Modelle erlauben die Berechnung der individuellen Ansteckungswahrscheinlichkeiten, z.B. ca. 30% bei einer typischen Dinnerparty, wenn eine infektiöse Person anwesend ist.

4. Wir konnten die Parameter unseres mathematischen Modells auf der Basis von Simulationsergebnissen des agentenbasierten Modells mit einer hohen Qualität schätzen. Dies ermöglicht, die Wirkungen verschiedener Maßnahmenkombinationen mit dem mathematischen Modell schnell zu schätzen, ohne das agentenbasierte Modell mit seinen langen Rechenzeiten zu bemühen.

2 Unsere Interpretation der gegenwärtigen Situation

Unsere Simulationen legen folgende Interpretation der gegenwärtigen Situation in Berlin nahe; wir schätzen die Resultate als übertragbar in viele deutsche Großstädte ein:

1. Im Juni 2020 lag die Reinfektionsrate R unterhalb von 1. In den realen Zahlen von Berlin gab es einen singulären Ausbruch, der die Infektionszahlen ansteigen ließ; dieser ist in unseren Simulationen nicht enthalten.
2. Im Juni wurden die Kindergärten stufenweise wieder geöffnet; Anfang August die Schulen. Beides reicht, in Verbindung mit der funktionierenden Kontaktnachverfolgung, lt. unseren Simulationen *nicht* aus, um R nach über 1 zu schieben.
3. Weiterhin kam Ende Juli/Anfang August ein erheblicher Infektionsimport durch Reiserückkehrer hinzu. Dies allein sollte lt. unseren Simulationen das "strukturelle" R gar nicht verändern, also unter 1 belassen. *Allerdings* führt(e) es zu vielen weiteren Infektionsketten, die durch die Gesundheitsämter verfolgt werden mussten. Lt. unseren Annahmen kam es dabei ab ca. Anfang September zu einer zunehmenden Überlastung der Kontaktnachverfolgung, und damit dann doch zu einem Anwachsen von R über 1.
4. Resultat ist, dass *jetzt* (Ende Oktober) die Infektionszahlen so hoch sind, dass eine vollständige Kontaktnachverfolgung nicht mehr möglich ist. Der dämpfende Effekt der Kontaktnachverfolgung fällt also teilweise weg; die dann noch verbleibende Infektionsdynamik ist überkritisch (also R größer als 1), die Infektionszahlen steigen an.
5. Sobald R größer als eins ist, ist der Anstieg *immer* exponentiell. Solange R über eins bleibt, werden die Infektionszahlen also immer schneller ansteigen. Dieser Effekt wird noch zusätzlich dadurch verstärkt, dass die dämpfende Wirkung der Kontaktnachverfolgung mit zunehmender Überlastung immer geringer wird. Zusätzlich unterstützt die andauernde Verlagerung von Aktivitäten von außen nach innen den Anstieg der Infektionszahlen.

Falls eine Rückkehr zu $R < 1$ politisch gewünscht sein sollte, so gilt zweierlei:

- Die dafür nötigen Maßnahmen müssten sehr deutlich sein (s.u.).
- Je länger gewartet wird, desto nochmals gravierender müssten sie ausfallen, weil der dämpfende Anteil der Kontaktnachverfolgung bei weiterem Abwarten immer kleiner wird.

Falls das politische Ziel, R unter 1 zu drücken, aufgegeben worden ist oder werden soll, so wäre unsere Vorhersage, dass sich die Infektionsdynamik zunächst noch weiter beschleunigen wird, also noch stärker als exponentiell, mit weiter anwachsendem R und immer kürzeren Verdopplungszeiten, wegen des abnehmenden Anteils der Kontaktnachverfolgung sowie der Verlagerung von Aktivitäten in Innenräume (vgl. Punkt 5 oben). Dämpfend wirken würde vermutlich eine Verhaltensreaktion der Bevölkerung; wir sehen im persönlichen Umfeld, dass es neben den Personen, die bereits die jetzigen Maßnahmen für übertrieben halten, zunehmend viele gibt, die sehr vorsichtig/ängstlich reagieren. Unserer Analyse aus den Mobilfunkdaten zeigt auch bereits einen Rückgang der aushäusigen Aktivitäten.

Relevant ist vielleicht auch noch folgendes: Selbst wenn es nicht gelingen sollte, R unter 1 zu drücken, so hängt doch die Anzahl der gleichzeitig Erkrankten und somit die Höhe der benötigten

Krankenhauskapazitäten am konkreten Wert von R: Je weniger groß R, desto niedriger diese Zahlen. Insofern wären auch "späte" und "nicht vollständig durchgreifende" Maßnahmen (z.B. sukzessiv frühere Sperrstunden; Masken am Arbeitsplatz/während des Unterrichtes) immer noch sinnvoll.

3 Maßnahmenrechner

Wir haben, basierend auf den Ergebnissen aus unserem Simulationsmodell, einen Maßnahmenrechner entwickelt, mit dem abgeschätzt werden kann, durch welche Maßnahmen das derzeit gültige R reduziert werden kann. Ausgehend von dem derzeit gültigen R (Base R value) zeigt der Rechner, dass insbesondere im Freizeitbereich sehr deutliche Maßnahmen notwendig sind, um das resultierende R (Calculated R value) auf einen Wert unter 1 zu drücken (und damit das exponentielle Wachstum zu stoppen). Maßnahmen im Kindergarten- und Bildungsbereich haben in unserem Modell eine nicht so starke Wirkung, weil wir davon ausgehen, dass seit den Sommerferien regelmäßig (mindestens nach jeder Schulstunde) gelüftet wird.

Der Rechner ist hier zu finden: <https://covid-sim.info/r-calcs/2020-10-23> .

Die dazugehörigen Simulationsergebnisse sind hier zu finden: <https://covid-sim.info/2020-10-23/interventions>.

R-Value Calculator
2020-10-23

The following measures could each impact the ability of the disease to spread. Try changing some parameters to see how they contribute to the R-Value of the disease.

Base R value: **1.44 – 1.76**
23 Oct 30 Oct

Calculated R value: **0.79 – 0.96**

Setting	Current R Value	Intervention Options
Schools : 0.97x	current attendance (100%) 90% masks	50% attendance 90% cloth masks & 50% attendance 0% attendance
Day care	current attendance (100%)	50% attendance 0% attendance
Universities	current attendance (20%) 0% attendance	
Other education : 0.99x	current attendance (100%)	90% attendance 0% attendance
Leisure : 0.63x	current attendance (93%) & no curfew	current attendance (93%) & curfew23-6 current attendance (93%) & curfew21-6 current attendance (93%) & curfew19-6 50% attendance & curfew23-6 50% attendance & curfew21-6 50% attendance & curfew19-6 50% attendance 0% attendance
Shop	current attendance (93%) & masks	masks & 50% attendance masks & 0% attendance
Errands	current attendance (93%)	50% attendance 0% attendance
Work : 0.90x	current attendance (93%)	75% attendance 50% attendance 25% attendance 0% attendance FFP2 masks or max 1 person/room
Tracing	current (50% of contacts & 2-5d delay & capacity 200 cases/day)	75% of contacts & 1d delay & capacity 200 cases/day 50% of contacts & 2d delay & capacity infinity 50% of contacts & 5d delay & capacity infinity 75% of contacts & 1d delay & capacity infinity

Remarks:

- The situation gets considerably worse by waiting just one week (see date button on top).
- Even setting the leisure curfew to 7pm and all other activities to 0% is no longer enough to stop the dynamics unless contact tracing capacities are also approx. tripled.
- Capacity infinity for contact tracing means that current new infection numbers can be handled without additional delay.
- Many of the changes (schools, other education, day care, shop, errands) have some effect, but it is not large. One would shut down many important activities in order to spare the leisure activities and still not reach R less than one.
- "Leisure" refers to private and public spaces; if only public spaces are included in the measures, the effects are roughly halved.
- We give a range for R since point predictions are impossible. We would recommend to have both ends of the range below 1.0 if one wanted to stop the exponential growth.

Abbildung 1: Beispiel für den Maßnahmenrechner; Auswirkung der Kombination verschiedener Maßnahmen auf den aktuellen R Wert; siehe: <https://covid-sim.info/r-calcs/2020-10-23>

4 Kontaktnachverfolgung

U.E. sollten "heroische" Anstrengungen unternommen werden, um die Kontaktnachverfolgung unter Kontrolle zu behalten oder wieder unter Kontrolle zu bringen: Eine Erhöhung der Kapazität der Kontaktnachverfolgung auf "unendlich" (= immer jeweils ausreichend für gerade herrschenden Fallzahlen) zeigt in unseren Simulationen eine sehr deutliche dämpfende Wirkung.

Notwendig wäre u.E. ein **Monitoring der Performanz der Kontaktnachverfolgung**. Da die Gesundheitsämter unter Druck sinnvollerweise nur noch die am Tag neu hereinkommenden Fälle abarbeiten, wären am Ende jeden Tages einfach zu erhebende Indikatoren:

- Anzahl der am Tag neu in die häusliche Quarantäne zu verweisenden Kontakte
- Anzahl der am Tag in die häusliche Quarantäne verwiesenen Kontakte

Daraus ließe sich durch einfache Division der *Anteil* der in die Quarantäne verwiesenen Kontakte ermitteln, woraus sich wiederum die Belastung der Gesundheitsämter ergeben würde. Weiterhin könnte man verfolgen, ob sich während der Epidemie die Anzahl der neu nachzuverfolgenden Kontakte ändert (z.B. durch Kontaktbeschränkungen).

Weiterhin nochmal der Hinweis, dass laut unseren Rechnungen die Kontaktnachverfolgung einen hohen Anteil an der Reduktion der Reinfektionsrate R hat. Dies alleine reicht laut unseren Rechnungen allerdings nicht aus, sondern muss durch weitere Maßnahmen unterstützt werden. Die im Zuge des Herbstes zunehmende Verlagerung von Veranstaltungen von außen nach Innen vergrößert den Problemdruck.

5 Sperrstunde und Ausgangssperre

Ausgangssperre im Freizeitbereich	Reduktion von R
23 - 6 Uhr	Ca. 3%
21 - 6 Uhr	Ca. 11%
19 - 6 Uhr	Ca. 19%

Tabelle 1: Reduktion von R für verschiedene Zeitspannen der Ausgangssperre im Freizeitbereich.

Wir finden, für Berlin, eine Reduktion von R um ca. 3% für eine Ausgangssperre im Freizeitbereich von 23 bis 6 Uhr. Pro weitere Stunde nach vorne verstärkt sich dieser Effekt um ca. 4%. Die Ausgangssperre bezieht sich dabei auf alle aushäusigen Freizeitaktivitäten, was also bedeutet, dass alle anderen aushäusigen Aktivitäten (wie bspw. Arbeit) weiterhin stattfinden.

Wenn sich die Ausgangssperre/Sperrstunde nur auf Veranstaltungen in öffentlichen Räumen (Restaurants etc.) bezieht, würden sich die Werte ungefähr halbieren.

Simulationsresultate und Erläuterungen sind unter <https://covid-sim.info/2020-10-22/curfew> zu finden.

6 Weitere Maßnahmen

Wir haben den Eindruck, dass die Problematik der Aerosol-Infektion immer noch nicht vollständig im politischen Entscheidungsprozess berücksichtigt wird. Nach jetzigem Wissensstand geschehen Infektionen eher nicht "im Vorbeigehen", sondern bei längerem gleichzeitigen Aufenthalt in eher kleinen, unbelüfteten Räumen. Dies bedeutet insbesondere auch Masken am Sitzplatz und nicht nur auf den Gängen.

Wir waren in unseren letzten Berichten davon ausgegangen, dass die Beiträge von Schulen, Arbeit, öffentlicher Verkehr etc. "im Prinzip" angemessen gelöst seien. Unseren Beobachtungen nach kann davon vieles immer noch zusätzlich zum bisherigen umgesetzt werden, z.B.:

- Arbeitsplätze: **Maskenpflicht auch am Arbeitsplatz außer in Einzelzimmern oder im Außenbereich.** Erwartete Reduktion von R ca. 10%; vgl. Maßnahmenrechner in Abschnitt 3.
- Schulen: **Masken in Schulen auch während des Unterrichtes; nochmals häufigeres Lüften** (alle 15 min); Umstellung auf **alternierenden Unterricht** (jede*r Schüler*in nur noch jeden zweiten Tag). Erwartete weitere Reduktion von R ca. 3%; vgl. Maßnahmenrechner in Abschnitt 3.¹

Die Maskenpflicht im öffentlichen Verkehr wird laut den uns bekannten Daten recht gut eingehalten; dennoch ist es sinnvoll, diese vor allem in Fahrzeugen (weniger an außen liegenden Haltestellen) durchzusetzen.

Bzgl. Veranstaltungen in öffentlichen Räumen empfehlen wir

- deutliche "**Ausdünnung**" der Kapazitäten. Unserem Verständnis nach müssten Veranstaltungsräume eine feuerpolizeiliche Zulassung haben; eine Viertelung dieser Kapazitäten erscheint uns in der jetzigen Situation angemessen.
- Sperrstunden wirken, müssten lt. unseren Rechnungen aber früher beginnen (siehe Abschnitt 5). Grund ist, dass späte Sperrstunden weitgehend nur freitags und samstags abends eine Wirkung entfalten, während frühere Sperrstunden jeden Tag wirken.

Bzgl. Veranstaltungen in privaten Räumen sind wir unsicher, was durchsetzbar ist. Prinzipiell sollten auch hier

- die Personendichten deutlich reduziert werden. Der derzeit diskutierte Ansatz "maximal 5 Gäste oder maximal 2 Hausstände" erscheint uns im Prinzip plausibel, kommt jetzt aber vermutlich zu spät.
- Die Restriktionen in privaten Räumen könnten kombiniert werden mit einer Ausgangssperre für private Freizeitaktivitäten (siehe Abschnitt 5).

Natürlich wäre es schön, wenn man die Maßnahmen genauer kalibrieren könnte. Allerdings fehlt in der jetzigen Situation dafür die Zeit: Unseren Informationen nach ist die Kontaktnachverfolgung bereits überlastet; die Reinfektionsrate wird also alleine deshalb nach oben schnellen; nur die o.g.

¹ Dies ist wie folgt zu interpretieren: (a) Wir gehen davon aus, dass bereits 1x pro Schulstunde gelüftet wird. Masken während des Unterrichtes hätten einen stärkeren Effekt, wenn man davon ausgeht, dass das stündliche Lüften nicht überall umgesetzt wird. (b) Wie in anderen Berichten diskutiert, betrachten wir die rein mechanische Wirkung von alternierendem Unterricht. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass dies Eltern zu Hause bindet, was einen deutlichen weiteren Effekt haben dürfte.

“heroischen” Anstrengungen in der Kontaktnachverfolgung, verbunden mit wirklich allem, was uns an “weichen” Maßnahmen einfällt, wird die Situation bereinigen können.

Falls das nicht gelingt, bleiben anschließend nur folgende beiden Möglichkeiten:

- “Harte” Kontaktsperre, die vermutlich härter als im Frühjahr ausfallen müsste, weil weniger Freiwilligkeit zu erwarten ist.
- Alternativ “Abwettern” der Infektionswelle. Konkret meinen wir hiermit, dass ein R größer als eins hingenommen wird, aber dennoch Maßnahmen z.B. zum Schutz besonders gefährdeter Personengruppen oder zur Abflachung der Welle getroffen werden.

7 Berechnung individueller Ansteckungswahrscheinlichkeiten

Unsere Modelle enthalten eine Formel, die es erlaubt, Infektionswahrscheinlichkeiten in Innenräumen auszurechnen. Natürlich ist das eine grobe Abschätzung, aber im jetzigen Stadium vielleicht doch von Nutzen. Nach derzeitigem Stand lautet diese Formel

$$\text{Ansteckungswahrscheinlichkeit} = 0,075 \cdot \frac{\text{loudness} \times \text{mask1} \times \text{mask2}}{\text{roomSize}[qm] \times \text{airExchange}} \cdot \tau[h]$$

Für die Bedeutung der Variablen siehe Tabelle 2 am Ende dieses Abschnitts.

Z.B. hätte man für eine 4-stündige Dinnerparty in einem 20qm großen Raum, bei der eine andere Person ansteckend ist, laut diskutiert wird, und bei der die Lüftung der normalen Wohnungslüftung entspricht, für sich selber eine Ansteckungswahrscheinlichkeit von

$$0,075 \cdot \frac{10 \times 1 \times 1}{20[qm] \times 0.5} \cdot 4[h] = 30\% .$$

Dies erscheint uns eine erschreckend hohe Wahrscheinlichkeit.

Aus der Formel ergeben sich auch Reaktionsmöglichkeiten und ihre Wirkungen:

- Halbstündliche Komplettlüftung erhöht die stündliche Luftaustauschrate auf 2 und reduziert somit die Ansteckungswahrscheinlichkeit auf 7.5%.
- Ein doppelt so großer Raum halbiert die Ansteckungswahrscheinlichkeit.

Etwas kontraintuitiv hängt die oben berechnete spezifische Wahrscheinlichkeit nicht von der Anzahl der Gäste ab. Diese spielen allerdings dennoch gleich zwei Rollen (vgl. Müller et al. 2020a):

- Wenn man die Anzahl der Personen im Raum verdoppelt, dann verdoppelt sich das Risiko, dass überhaupt eine ansteckende Person im Raum ist.
- Gleichzeitig verdoppelt man die Anzahl der Personen, die obigem 30%igen Risiko ausgesetzt werden.

Folgende Maßnahmen sind bei einer Dinnerparty vermutlich nicht möglich, aber bei anderen Aktivitäten in Innenräumen sehr wohl:

- Wenn die ansteckende Person nicht spricht, so reduziert dies die eigene Ansteckungswahrscheinlichkeit um einen Faktor 10.

- Wenn entweder die ansteckende Person oder ich selber eine Maske trage, so reduziert dies die eigene Ansteckungswahrscheinlichkeit um einen Faktor 2; wenn beide eine Maske tragen, um einen Faktor 4. Eine gut sitzende eigene FFP2/N95-Maske reduziert das Risiko noch weiter.
- Wenn ich nur halb so lange bleibe, reduziere ich die eigene Ansteckungswahrscheinlichkeit um einen Faktor 2.

Die Formel plausibilisiert auch recht gut, warum die Ansteckungswahrscheinlichkeit im selben Haushalt nur ca. 30% beträgt: Hier hätte man, in einer Wohnung mit 50qm und mit der Annahme, dass eine Person nur 4 Tage lang hochansteckend ist

$$0,075 \times \frac{1 \times 1 \times 1}{50[\text{qm}] \times 0.5} \cdot 96[h] = 29\% .$$

Der wesentliche Gewinn ergibt sich vor allem aus dem Verzicht auf lautes Sprechen.

Variable	Bedeutung
loudness	1 = atmen 10 = laut sprechen 30 = singen
mask1	1 = Ohne Maske 0,5 = Mit Maske
mask2	1 = Ohne Maske 0,5 = Mit Maske (ggf. < 0,5 bei besserem Maskentyp)
roomSize	Größe des Raumes in dem die Veranstaltung stattfindet
airExchange	Luftaustauschrate 1 = Lüften 1x pro Stunde 2 = Lüften 2x pro Stunde Kann alternativ durch mechanische Lüftungssysteme geleistet werden.
τ	Dauer der Veranstaltung in Stunden
0,075	Kalibrierungsparameter

Tabelle 2: Variablen der Gleichung zur Berechnung der Ansteckungswahrscheinlichkeit in Innenräumen (für Quellenangaben für die Werte siehe Müller et al. 2020b).

8 Mathematische Modellierung

8.1 Hintergrund

Die obigen Ergebnisse werden hauptsächlich durch Simulationen unseres sog. ABM (agentenbasierte Modellierung)-Modells erzeugt. Der große Vorteil dieses Ansatzes ist die hohe Nähe des Modells bzw. dessen Simulation zur "echten" Situation, die dadurch modelliert wird.

Dadurch ist allerdings auch der Rechenaufwand sehr hoch. Wie in den letzten Berichten bereits beschrieben, arbeiten wir zusätzlich zu diesem ABM-Modell an einem sog. ODE-Modell (Ordinary differential equation; dt.: gewöhnliche Differentialgleichung). Mit diesem ODE-Modell können interessante Größen des (komplexeren) ABM-Modells ebenfalls berechnet werden, dies benötigt aber einen wesentlich geringeren Rechenaufwand. In den vergangenen Wochen haben wir hauptsächlich an der mathematischen Verbindung dieser beiden Modellierungsansätze gearbeitet. Das Ziel ist es hier, mit Hilfe des ODE-Modells sehr schnell den Effekt verschiedener Maßnahmenkombinationen z.B. auf das Infektionsniveau oder auf die Anzahl mit Covid-19-Patienten belegten Krankenhausbetten berechnen zu können. Wenn dies gelingt, könnten z.B. die optimalen Maßnahmenkombinationen berechnet werden, um einen bestimmten maximalen Wert bei den Infektionen oder der belegten Betten nicht zu überschreiten. Dabei darf nicht vergessen werden, dass es sich hier immer um die Ergebnisse von Modellen handelt, die die Wirklichkeit niemals perfekt widerspiegeln können. Die erzielten Ergebnisse beziehen sich also immer nur auf das zugrundeliegende Modell, und sollten immer als **Teil der Lösung** betrachtet werden.

8.2 Vorgehen

Wie in den vorherigen Berichten beschrieben, wurde ein ODE-Modell erstellt und mittels der Simulationsdaten des ABM-Modells parametrisiert, also angepasst. Dazu wurden verschiedene Kombinationen der drei Maßnahmen für (1) Stärke der Schulschließungen, (2) Anteil der maskentragenden Bevölkerung und (3) Aufwand beim Contact Tracing benutzt, die aus den ABM-Simulationen stammen. Mittels dieser Eingaben wurden die beiden Parameter kE (Infektionsrate) und nCT (Anzahl an Personen, die pro symptomatischen Infizierten in Quarantäne gehen) mittels des ODE-Modells berechnet. Auf dieser Basis wurde - pro Parameter - eine sog. polynomielle Regressionsfunktion gelernt (Stichwort: maschinelles Lernen). Diese beiden Regressionsfunktionen erlauben die Schätzung der beiden Parameter (kE und nCT) auf Basis von beliebigen (auch bisher unbekannt) Kombinationen der drei Maßnahmen. Wenn die Parameter kE und nCT bekannt sind, kann das ODE-Modell benutzt werden, um sehr schnell die gewünschten Kennzahlen, z.B. die Infektionszahl, zu berechnen.

8.3 Validierung

Eine kurze Validierungsstudie zeigte, dass die Regression die für das ODE-Modell benutzten Kennzahlen (kE und nCT) auch für unbekannte Maßnahmenkombinationen gut vorhersagen kann. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse: hier sind auf der X-Achse die "richtigen" Parameterwerte (welche auf Grundlage der ABM-Daten mit dem ODE-Modell berechnet wurden) gegen die von den Regressionsfunktionen berechneten Parameterwerte (auf der Y-Achse) aufgetragen. Abweichungen von der durchgezogenen Linie stellen die jeweiligen Fehler dar.

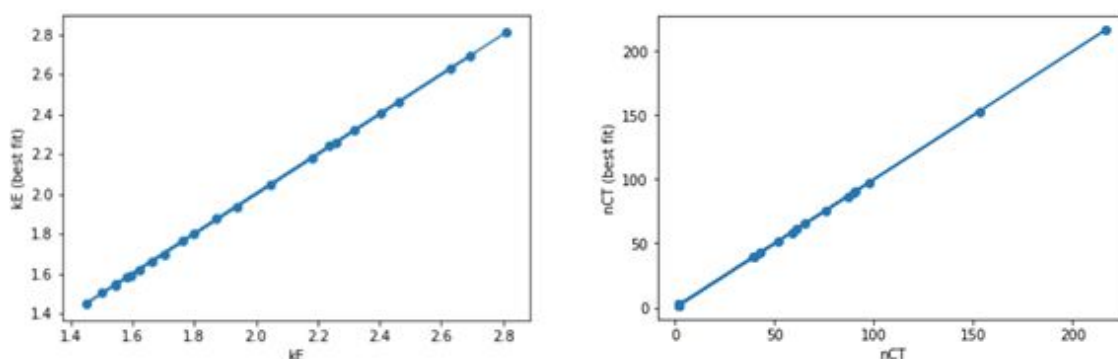


Abbildung 2: Entgegenstellung der Parameterwerte für k_E und n_{CT} aus dem ODE-Modell (X-Achse) und aus der Regression (Y-Achse). Wenn die Regression die "richtigen" Werte aus dem ODE-Modell genau trifft, liegt der entsprechende Punkt genau auf der blauen Linie. Man sieht, dass fast alle Werte genau getroffen wurden.

8.4 (Mathematische) Unsicherheit im ODE-Modell

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, können die Parameter k_E (Infektionsrate) und n_{CT} (Anzahl an Personen, die pro symptomatischen Infizierten in Quarantäne gehen) durch die Regressionsfunktion nahezu perfekt geschätzt werden. Mit diesen beiden Parametern können dann mit dem ODE-Modell die gewünschten Kennzahlen berechnet werden. Um die Regressionsfunktion zu erstellen, werden allerdings Daten aus den ABM-Simulationen benutzt. Diese Simulationen weisen - technisch bedingt - eine gewisse Variabilität auf (z.B. durch verschiedene Zufallssequenzen). Die Konsequenz ist, dass die geschätzten Parameterwerte (k_E und n_{CT}) des ODE-Systems ebenfalls eine gewisse Variabilität aufweisen - da sie abhängig von den Simulationsdaten sind. In diesem Kontext spricht man von einer *Unsicherheit*, die der Wert eines geschätzten Parameters aufweist. Die Unsicherheit eines Parameters bzgl. seines Wertes kann mathematisch berechnet werden. Ist diese Unsicherheit klein, ist ein guter Fit an die Daten möglich und der Wert liegt in einem relativ kleinen Intervall bzw. hat eine kleine Bandbreite. Ist die Unsicherheit groß, dann kann der Wert in einem relativ großen Intervall liegen (hat eine große Bandbreite) - der tatsächliche Wert ist aber nicht bestimmbar.

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse von einem exemplarischen Experiment, das diesen Sachverhalt genauer zeigt. Zu sehen ist die Anzahl der durch Covid-19-Patienten belegten Krankenhausbetten in Berlin im zeitlichen Verlauf (Tage seit März), wenn zwei bestimmte Maßnahmenkombinationen vorliegen.

- In rot: 50% der Schulen sind geschlossen, 100% der Bevölkerung tragen eine Maske und 50% der Kontakte eines Covid-19 Patienten können nachverfolgt werden
- In grün: 50% der Schulen sind geschlossen, 50% der Bevölkerung tragen eine Maske und 50% der Kontakte eines Covid-19 Patienten können nachverfolgt werden

Die jeweils dickere Kurve zeigt die Berechnungen des (komplexen) ABM-Modells, während die dünnere Kurve die Ergebnisse der Anpassung vom ODE-Modells an die ABM-Daten zeigt. Die Kurven ähneln sich sehr, das heißt, das ODE-Modell findet Parameter, sodass die Daten aus dem ABM fast genau repliziert werden können.

Der zweite Aspekt in der Darstellung bezieht sich auf die schattierten Bereiche um die dünnere Kurve des ODE-Modells. Dies stellt die sog. Bandbreite der Unsicherheit im ODE-Modell (bezogen auf die Parameterwerte) dar. Je breiter dieser Bereich, desto unsicherer die aus der Modellrechnung resultierenden Ergebnisse.

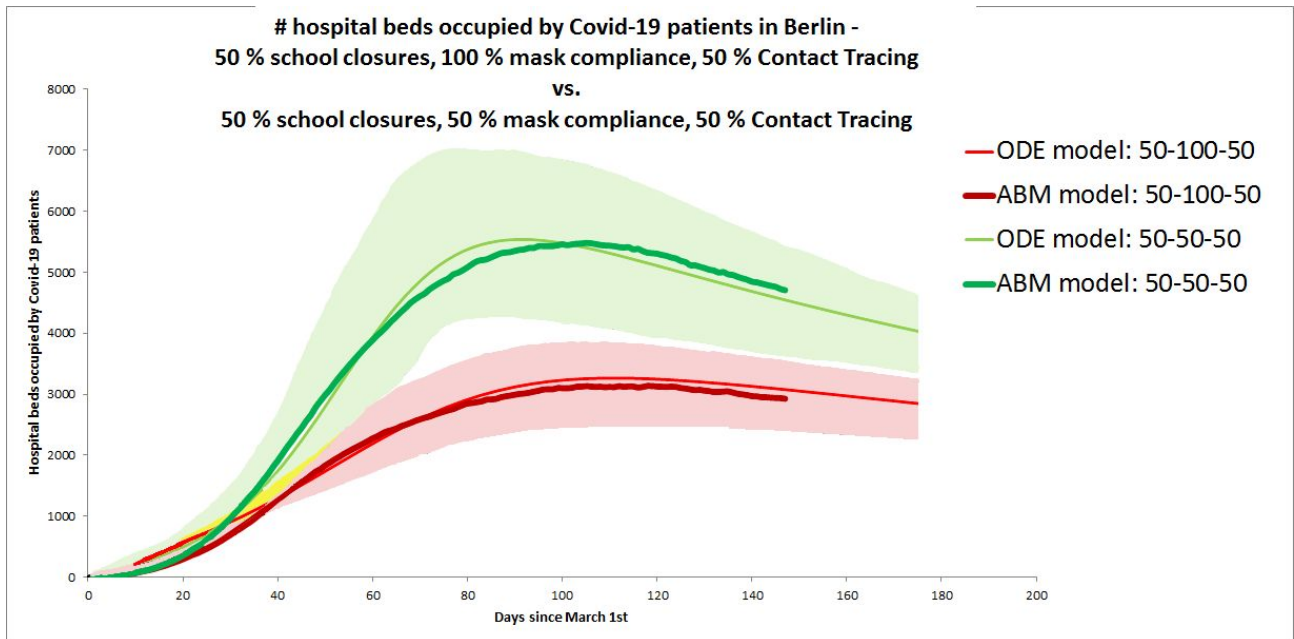


Abbildung 3: Die Berechnungen des ABM-Modells versus die Ergebnisse des ODE-Modells für die Maßnahmenkombinationen “50 % Schulschließungen, 100 % Maskenträger, 50 % Contact Tracing” versus “50 %, 50 %, 50 %”. Die hellgrünen bzw. pinken Bereiche zeigen die Bandbreite der Unsicherheiten.

Zusammengefasst zeigt sich, dass zum einen die berechneten Bandbreiten für die strengeren Maßnahmen (größere Bevölkerungsanteile tragen eine Maske) schmaler sind als für schwächere. Dieser Sachverhalt ist - im Sinne der Parameterschätzung - auch logisch, denn durch die strengeren Maßnahmen werden weniger Menschen infiziert und durch die geringere Anzahl an daraus resultierenden weiteren Infektionen sind weniger Optionen möglich. Zum anderen wächst die Unsicherheit mit der Anzahl der belegten Betten (was proportional zur Anzahl der infizierten Personen ist) aus dem gleichen Argument: durch mehr infizierte Personen gibt es mehr Optionen im System, das wiederum zu verschiedenen Ausgängen der Simulation führt, was wiederum die Unsicherheit erhöht. Andersrum wäre die Unsicherheit minimal, wenn alle Simulationen (d.h die Seeds) immer das gleiche Ergebnis zeigen würden.

Durch die Möglichkeit der mathematischen Quantifizierung der Modellunsicherheit sind wir (a) in der Lage darzustellen, wie sehr man den berechneten Ergebnisse “vertrauen” kann und können (b) Maßnahmenkombinationen daraufhin bewerten, wie viel Unsicherheit sie im Verlauf der Simulationen erzeugen.

8.5 Ausblick: ODE-Modelle auf Basis von realen Daten

Die bisherigen Arbeiten haben gezeigt, dass wir unser ODE-Modell an Daten aus den ABM-Simulationen mit einer hohen Qualität anpassen können.

In den folgenden (ersten) Versuchen haben wir unsere ODE-Modelle an die vorhandenen realen Berliner Daten angepasst. Dazu wurden die kumulative Infektionszahlen, die tägliche Belegung der (nicht-ITS-)Krankenhausbetten durch Corona-Patienten, die tägliche Belegung der Intensivbetten durch Corona-Patienten und die kumulativen Todesfälle zur Parameterschätzung benutzt und k_I (Rate von infiziert zu ansteckend), k_R (Erholungsrate) und k_D (Mortalitätsrate) fixiert. Die folgenden vier Grafiken zeigen exemplarische Ergebnisse. Es ist zu erkennen, dass das

parametrisierte ODE-Modell die realen Daten durchaus - wenn auch geglättet - gut wiedergeben kann.

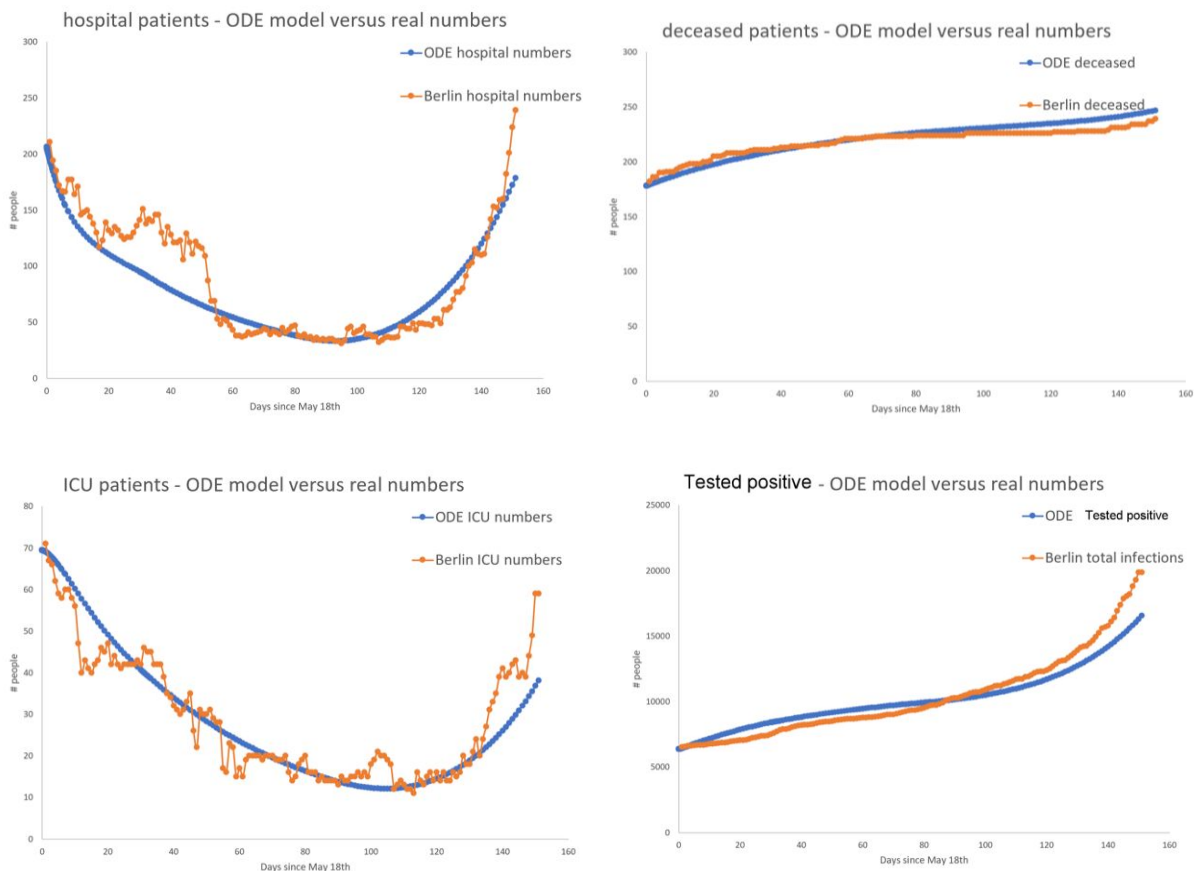


Abbildung 4: Anpassung des ODE-Modells an die realen Berliner Covid-19-Daten: Geplottet sind (1) die Covid-19-Krankenhauspatienten, (2) die nach einer Covid-19-Infektion verstorbenen Patienten, (3) die Covid-19-ITS-Patienten und (4) die kumulative Gesamtzahl positiver Tests. Das Modell reproduziert die Zahlen gut.

Quellen

- Müller, Sebastian Alexander, William Charlton, Natasa Djurdjevac Conrad, Ricardo Ewert, Christian Rakow, Tilmann Schlenther, Frank Schlosser, et al. 2020a. "MODUS-COVID Bericht Vom 02.10.2020." <https://doi.org/10.14279/depositonce-10624.2>.
- . 2020b. "MODUS-COVID Bericht Vom 11.09.2020." <https://doi.org/10.14279/depositonce-10553>.