

MODUS-COVID Bericht vom 16.07.2021

Arbeitsgruppe Prof. Dr. Kai Nagel, Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik ("VSP"),
TU Berlin, nagel@vsp.tu-berlin.de
Arbeitsgruppen Prof. Dr. Christof Schütte, PD Dr. Tim Conrad, Zuse-Inst. Berlin ("ZIB")
<https://covid-sim.info/>

1 Zusammenfassung

Aufgrund des exponentiellen Prozesses ist der aktuelle Anstieg der Inzidenzen beunruhigend. Laut unserem Modell wird dieser Anstieg beschleunigt werden, wenn die Schulen nach den Sommerferien ohne Schutzmaßnahmen öffnen und im Herbst Aktivitäten aufgrund niedriger Temperaturen nach drinnen verlagert werden. Letzteres wird auch zu einem Anstieg der Krankenhauseingangszahlen führen (vgl. Abschnitt 3 S. 2).

Für die meisten Schüler:innen wird es bis zum Ende der Sommerferien kein Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden geben. Um Schüler:innen die Möglichkeit der Immunisierung durch Impfung zu lassen, sind sowohl Schutzmaßnahmen in den Schulen als auch niedrige Inzidenzen bei Erwachsenen notwendig, bis ein solches Angebot vorliegt. Ansonsten werden Schüler:innen mit großer Wahrscheinlichkeit durch Infektion immun werden (vgl. Abschnitt 3, S. 2).

Wir zeigen mit Simulationen, dass verschiedene Untergruppen starke Abhängigkeiten voneinander haben: bei einer Öffnung der Schulen nach den Sommerferien ohne Schutzmaßnahmen ergibt sich eine Infektionswelle bei den Schüler:innen, welche auch zu einer Welle bei den Erwachsenen führt. Andersherum führt eine Infektionswelle bei den Erwachsenen auch zu einer Infektionswelle bei den Schüler:innen (vgl. Abschnitt 4, S. 6).

Unsere Simulationen zeigen, dass die Infektionsdynamik in den Schulen durch den Einsatz von mechanischen Lüftungssystemen verbunden mit dem flächendeckenden Einsatz von Schnell- und/oder PCR-Tests deutlich reduziert werden kann. Bei konsequenter Umsetzung dieser Schutzmaßnahmen sind Schulschließungen oder Wechselunterricht nicht notwendig. Allerdings sind die derzeit typischen "2 Schnelltests pro Woche" ohne zusätzliche Maßnahmen bei weitem nicht ausreichend (vgl. Abschnitt 5, S. 7).

Wir zeigen mit unserem mathematischen Modell, welche Auswirkungen die Einreise aus verschiedenen Gebieten auf die hiesige Inzidenz haben. Wir sehen, dass ein Eintrag aus Virusvarianten-Gebieten hier zu einer schnellen Ausbreitung der Variante führt und dass Einreisende aus Gebieten, in denen die gleiche Variante vorherrscht wie hier, die hiesige Inzidenz (vorerst) kaum beeinflussen (vgl. Abschnitt 7, S. 11).

2 Mobilitätsdaten

Im Verlauf der letzten Wochen hat sich das Aktivitätsniveau in Berlin bis zum Beginn der Sommerferien Ende Juni erhöht (vgl. Abb. 1). Das höchste Niveau der Wochentage liegt dabei unter dem Maximum des vergleichbaren Vorjahreszeitraums. Mit Beginn der Sommerferien ist das Niveau wieder leicht gesunken, was sich auch in den Daten des Vorjahres erkennen lässt.

Durchschnittliche Dauer aushäusiger Aktivitäten Berlin

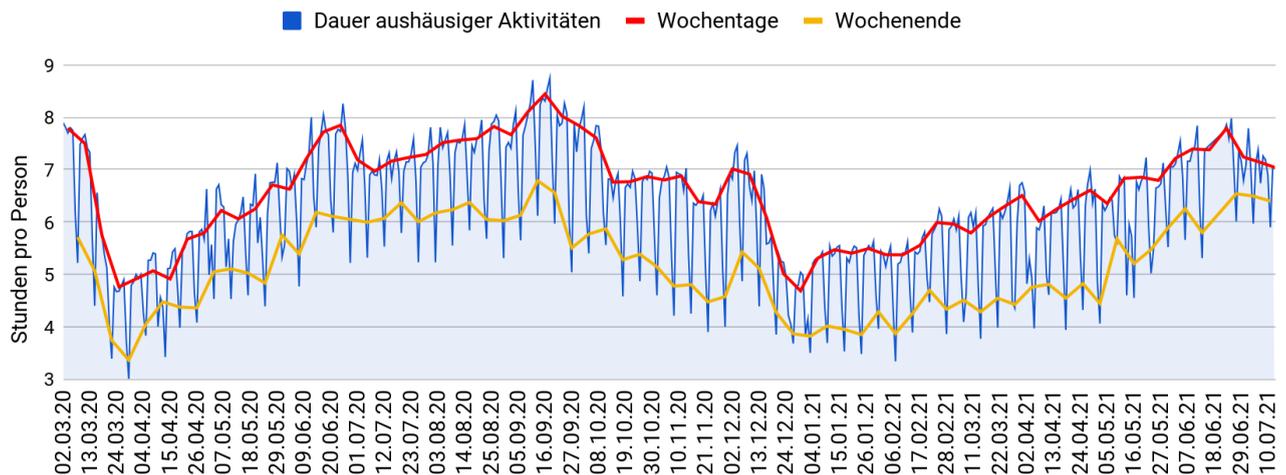


Abbildung 1: Im Mittel aushäusig verbrachte Zeit pro Person in Berlin; ermittelt aus anonymisierten Mobilfunkdaten. Rot: Mittelwerte über die Wochentage der jeweiligen Woche. Gelb: Mittelwerte über die Wochenend- und Feiertage (einschl. Samstag) der jeweiligen Woche. Eigene Darstellung; Datenquelle: (Senozon 2021).

3 Derzeitige Situation aus der Sicht unserer Modelle

Die Inzidenzdaten zeigen inzwischen bereits wieder einen Anstieg. Da es sich um einen multiplikativen Prozess handelt, sind die relativen Anstiege entscheidend. Die hier auftretenden Werte von mehr als 50% Anstieg pro Woche sind sehr beunruhigend; die oft gehörte Einschätzung "leichter Anstieg" teilen wir dezidiert nicht. Wenn sich dieser Trend fortsetzt, dann ist es möglich, dass noch vor Ende August Inzidenzen um 100 erreicht werden, die Anfang September bereits auf 200 steigen könnten.

Laut unserem Modell werden die folgenden beiden Prozesse den Anstieg beschleunigen:

1. **Öffnung der Schulen nach den Sommerferien.** Auch wenn die Schulen, insbesondere wenn mit Masken und/oder Wechselunterricht betrieben, laut unserem Modell im bisherigen Infektionsgeschehen eine untergeordnete (wenn auch nicht irrelevante) Rolle gespielt haben, so ist doch zu erwarten, dass sich dies nach dem Sommer ändert: In unserem Modell ist die Delta-Variante in den Schulen bei Vollöffnung und ohne Gegenmaßnahmen "selbsttragend", d.h. selbst wenn man die Erwachsenen im Modell alle auf "immun" setzt, ergibt sich alleine durch die ungeimpften Schüler:innen ein R-Wert von über 1 nach den Sommerferien, also in vielen Bundesländern bereits ab Anfang August. Laut Modell würde dies nicht zu hohen Belastungen der Krankenhäuser führen.

2. Verlagerung von Freizeitaktivitäten in Innenräume bei niedrigeren Temperaturen.

Dieser Prozess startet in unserem Modell im September, wird aber abhängig sein von den tatsächlich auftretenden Temperaturen. Anders als bei den Infektionen in den Schulen ergibt sich hieraus, wenn keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, eine zunehmend erhöhte Belastung der Krankenhäuser; potentiell höher als alles, was wir bisher gesehen haben. Grund dafür ist, dass im Modell **ohne Gegenmaßnahmen** der gesamte nicht-immune Teil der Bevölkerung (ca. 20%)¹ in relativ kurzer Zeit infiziert wird. **Es ist aber unwahrscheinlich, dass diese Situation eintritt**, da neben Maßnahmen der Politik typischerweise auch ein Anstieg der Krankenhauszahlen zu größerer Vorsicht bei der Bevölkerung führt.

Laut der Vorsitzenden des Ethikrats, Prof. Dr. A. Buyx, sind – bei den jetzigen Virusvarianten und Impfparametern – Einschränkungen für Geimpfte dann nicht mehr zu rechtfertigen, wenn allen Personen ein “Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden” gemacht wurde (Buyx 2021). Bei den Erwachsenen könnte dieser Zustand Anfang Oktober erreicht sein, so dass sich dann die Frage stellt, ob man an dieser Stelle auf eine Steuerung entlang der Krankenhausbelastung umstellt. Der Anstieg in den Krankenhäusern ist laut unseren Simulationen lange vor dem Eintreten einer Überlastungssituation deutlich zu sehen, so dass dies möglich sein müsste. Wichtig dafür wäre die Einführung entsprechender Meldepflichten, wobei einer der Indikatoren die Covid-bezogenen Neuzugänge sein müsste, weil nur dieser Indikator schnell genug anschlägt. Eine Steuerung entlang der Belegung der Intensivbetten ist allerdings nicht möglich, weil dieser Indikator zu spät anschlägt, und die Anzahl der Intensivbetten auch an vielen Orten zu klein ist, so dass die resultierenden Zahlen von zufälligen Fluktuationen dominiert und somit nicht aussagekräftig wären.

Eine Herausforderung dürfte bei einem solchen Vorgehen die relativ große Gruppe von Personen sein, die nicht immunisiert werden können, entweder weil sie nicht geimpft werden können, oder bei denen die Impfung nicht anschlägt, z.B. wegen Immunsuppression.² Hier müssen besondere Schutzanstrengungen unternommen werden, bis bei der überwiegenden Mehrheit der übrigen Bevölkerung eine Immunität eingetreten ist – durch Impfung oder durchgemachte Erkrankung. Dies trägt dadurch perspektivisch auch zum Schutz derjenigen bei, die nicht immunisiert werden können.

Völlig anders stellt sich die Situation für die Schulen dar. Es ist anzunehmen, dass bis zur Öffnung der Schulen nach den Sommerferien ein vollständiges “Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden” für Schüler:innen noch nicht möglich gewesen sein wird. Für 12-16-jährige gibt es zwar einen zugelassenen Impfstoff, aber ohne Empfehlung der Ständigen Impfkommission ist der Zugang zur Impfung sehr uneinheitlich (Die ZEIT 2021). Für Kinder unter 12 Jahren gibt es bisher keinen zugelassenen Impfstoff; ein solcher ist zu Beginn des nächsten Jahres zu erwarten. Die Frage ist hier nicht, ob diese Altersgruppen geimpft werden sollten, sondern ob Voraussetzungen geschaffen werden, dass sie und/oder die Erziehungsberechtigten eine informierte eigene Impfentscheidung treffen können. Diese eigene Entscheidung ist nur dann möglich, wenn in den Schulen nach den Sommerferien erhebliche Anstrengungen zur Infektionsunterdrückung unternommen werden. Laut unseren Simulationen reicht eine Kombination von manueller Lüftung, maschineller Lüftung und Testen aus, um die Weitergabe von Infektionen in den Schulen weitgehend zu vermeiden (vgl. Tab. 1 im Abschnitt 5 “Schulöffnungen”).

¹ Überschlüssig müssen davon 2% ins Krankenhaus; das macht $20\% \times 2\% = 0,4\%$ der Bevölkerung, knapp ein Faktor 10 mehr als das bisherige Maximum der Krankenhausbelegung in Berlin (im Dezember 2020).

² <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/272482/umfrage/arzneimittelverbrauch-von-immunsuppressiva/> ergibt, dass ca. 0,55 Millionen Personen Immunsuppressiva nehmen.

Falls Kindern/Jugendlichen bzw. deren Eltern eine faktische Wahlmöglichkeit zwischen Impfung und wahrscheinlicher Infektion gegeben werden soll, müssen in Schulen (und Kitas) Infektionen so effektiv wie möglich unterdrückt werden, bis allen Kindern und Jugendlichen ein "Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden" gemacht wurde.

Bzgl. Interaktion zwischen der Dynamik in den Schulen und der Dynamik bei den Erwachsenen sehen wir, dass die jeweils andere Untergruppe "mitgeschleppt" wird. Eine Welle in den Schulen infiziert somit auch die nicht-immunen Erwachsenen, selbst wenn diese für sich genommen unterkritisch sind. Und eine Welle bei den Erwachsenen infiziert auch die Schüler:innen, selbst wenn diese für sich genommen unterkritisch sind. Daraus folgt:

Falls Kindern/Jugendlichen bzw. deren Eltern eine faktische Wahlmöglichkeit zwischen Impfung und wahrscheinlicher Infektion gegeben werden soll, so müssen auch bei den Erwachsenen Infektionen so effektiv wie möglich unterdrückt werden, bis allen Kindern und Jugendlichen ein "Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden" gemacht wurde.

Wenn also ein "Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden" als tatsächliche Wahlmöglichkeit für *alle* Altersgruppen umgesetzt werden soll, so bleibt somit aus unserer Sicht nur die Möglichkeit, zum Herbst hin sowohl in den Kitas/Schulen wie auch bei den Erwachsenen genügend Schutzmaßnahmen beizubehalten bzw. wieder hochzufahren, so dass der R-Wert auf unter 1 gehalten werden kann, bis auch den Kindern/Jugendlichen ein "Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden" gemacht werden konnte. Da bereits die derzeitigen Zahlen einen R-Wert oberhalb von 1 aufzeigen, bedeutet dies sofortige zusätzliche Schutzmaßnahmen.³

Da allerdings fraglich erscheint, ob die der R-Wert bei den Erwachsenen unterhalb von 1 gehalten werden wird, empfiehlt sich außerdem folgendes:

Bei Jugendlichen, für die es bereits einen zugelassenen Impfstoff gibt, wäre eine alternative oder ergänzende Maßnahme, Impfangebote direkt an oder in der Nähe von Schulen direkt nach den Sommerferien anzubieten.

Da für Kinder unter 12 Jahren nicht mit einer Zulassung eines Impfstoffes in diesem Jahr zu rechnen ist, muss hier eine Entscheidung getroffen werden, ob eine Wahlmöglichkeit bzgl. Impfung geschaffen werden soll oder nicht:

Falls eine Wahlmöglichkeit bzgl. Impfung auch bei Kindern unter 12 Jahren geschaffen werden soll, so müssen auch für Erwachsene die Inzidenzen niedrig gehalten werden, bis diese Wahlmöglichkeit in Anspruch genommen werden konnte.

³ Die in NRW eingeführte Steuerung entlang von Inzidenzen halten wir zwar nicht für optimal, weil aus unserer Sicht jeglicher Anstieg der Inzidenzen außerhalb klar identifizierter Ausbrüche zu eigentlich vermeidbaren schweren Verläufen führt. Sie ist aber möglicherweise ein vertretbarer Kompromiss zwischen wissenschaftlicher Sicht und politischer Machbarkeit. Wichtig ist dann, dass die genannten Maßnahmen bei steigenden Inzidenzen tatsächlich wieder eingeführt werden, und nicht aus politischer Opportunität dann doch ausgesetzt werden.

Bzgl. **Reiseaktivitäten** ergibt sich ein differenziertes Bild:

- Zunächst ergibt sich im Modell kein Antrieb der Infektionen durch Reisen in Gebiete mit ähnlichen Inzidenzen und gleichen Virusvarianten wie am Ausgangsort. Das liegt daran, dass die potenziellen Infektionen im Reiseland mit gleicher Wahrscheinlichkeit auch zu Hause hätten stattfinden können. Generell sind Infektionswahrscheinlichkeiten an Sonn- und Ferientagen sogar reduziert gegenüber normalen Wochentagen. Es mag Personen geben, die sich im Urlaub vor allem in Innenräumen mit hohen Personendichten aufhalten während sie dieses zu Hause durch Homeoffice etc. nicht tun, aber im Normalfall - und damit im Mittel - dürfte es es eher andersherum sein.
- Der Eintrag von hier bereits vorhandenen Virusvarianten hat kaum einen zusätzlichen Einfluss: Wenn eine hier bereits vorhandene Variante sich leichter ausbreitet, dann ist die intrinsische Dynamik, die ja exponentiell verläuft, auf jeden Fall stärker als der zusätzliche Effekt durch Eintrag von außen.
- Damit geht die wesentliche Gefahr von Reisen vom Eintrag bisher hier nicht vorhandener Varianten aus. Insofern ist die Ausweisung von Virusvariantengebieten vom Ansatz her nachvollziehbar. Allerdings dürfte die Feststellung eines solchen Gebietes im Hinblick auf den Eintrag der Varianten regelmäßig zu spät erfolgen, da die Variante ja erstmal detektiert werden muss.
- Es verbleibt, dass der Eintrag vollständig *neuer* Varianten durch Abschirmungsmaßnahmen *hinausgezögert* werden kann. Dies verhält sich genau so wie der Eintrag vollständig neuer Viren, also z.B. zu Beginn der Epidemie. Dabei gilt, dass sich *multiplikative* Abschirmungsmaßnahmen in *additive* Verzögerungen übersetzen. Z.B. bezogen auf die Delta-Variante führt in unseren Modellen eine Reduktion des Eintrags um einen *Faktor* 10 zu einer (additiven) Verzögerung der Ausbreitung um 20 Tage.
- Mögliche Abschirmungsmaßnahmen bei Einreise sind: gültige Tests, Quarantäne, Vermeidung von Hochinzidenzgebieten, oder Kombinationen davon. Die wichtigste Wirkung der Vermeidung von Hochinzidenzgebieten ist also laut unseren Modellen nicht der Eintrag überhaupt, sondern das damit verbundene Risiko, dass eine eingetragene Infektion eine neue Variante enthält.

Da sich der Eintrag schlussendlich praktisch nicht vermeiden lässt, ist die Vermeidung einer Ausbreitung bei uns nur dann möglich, wenn neue Viren/neue Varianten auch im Inland entsprechend bekämpft werden können. Dies lässt sich z.B. erreichen, indem auf neue Viren/neue Varianten mit entsprechend deutlichen Maßnahmen reagiert wird, z.B. sehr gut funktionierende Kontaktnachverfolgung, und/oder vollständiger Lockdown aller Gebiete, in denen bereits Ausbreitung vermutet wird. Beides scheint unter den derzeitigen Bedingungen unrealistisch.

Unter den derzeitigen Bedingungen erscheint die vollständige Vermeidung des Eintrags neuer Varianten unrealistisch. Es verbleibt also nur die Verzögerung des Eintrags, und die Nutzung der dadurch gewonnenen Zeit z.B. zum Abbau von Krankenhausbelegungen und/oder für vorübergehende Lockerungen.

4 Abhängigkeiten zwischen Untergruppen

In der Vergangenheit wurde kontrovers diskutiert, ob die Schulen die Pandemie “treiben” würden oder nicht. Wir finden diese Formulierung mindestens “unglücklich”, denn wenn z.B. der R-Wert ohne Schulen bei 0,9 liegt, und die Schulen tragen weitere 0,2 bei, dann wird die Situation damit überkritisch, selbst wenn der Beitrag der Schulen nur ein kleiner ist.

In der derzeitigen Situation konstruieren wir denkbare Szenarien, anhand derer man dieser Frage nachgehen kann:

1. Infektionsdynamik bei den Erwachsenen weitgehend eliminiert⁴; Schulen überkritisch (bei Delta und Vollöffnung ohne Schutzmaßnahmen). In dieser Situation ergibt sich eine exponentielle “Welle” bei den Schüler:innen. Daran angekoppelt ergibt sich eine Welle bei den Erwachsenen, bei welcher die Inzidenzen um einen konstanten Faktor kleiner bleiben (Abb. 2).
2. Infektionsdynamik an den Schulen weitgehend eliminiert (z.B. durch Lüftung und häufige Tests); Erwachsene überkritisch (80% Impfquote; Impfstoffe bei Delta nur 70% Wirkung gegen Übertragung). In dieser Situation ergibt sich eine exponentielle “Welle” bei den Erwachsenen. Daran angekoppelt ergibt sich eine Welle bei den Schüler:innen, bei welcher die Inzidenzen um einen konstanten Faktor kleiner bleiben (Abb. 3).

In beiden Fällen ergibt sich, dass selbst wenn in einer Untergruppe der Beitrag zum R-Wert in der Nähe von Null liegt, die Infektionen in dieser Untergruppe dem exponentiellen Verlauf der Infektion in der anderen Untergruppe folgen (Abb. 2+3). (Nur) hier hätten wir die Situation, dass eine der beiden Untergruppen nahezu keinen Beitrag zur Infektionsdynamik leistet, und die Schließung z.B. der Schulen somit die Infektionsdynamik auch nicht reduzieren würde.

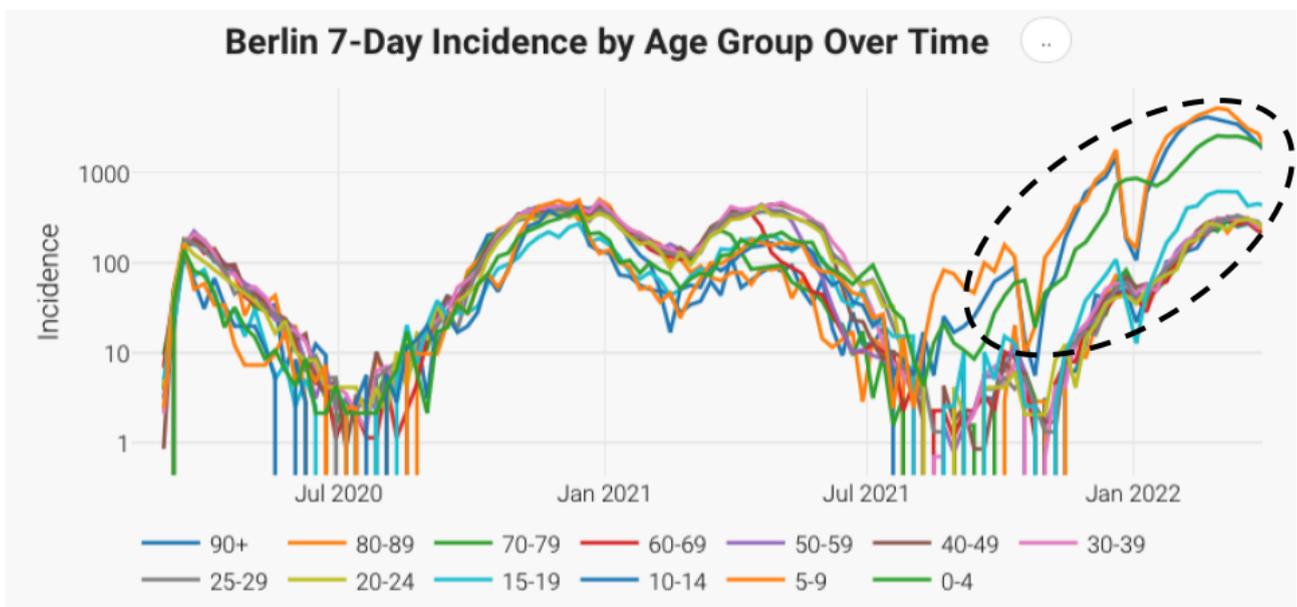


Abbildung 2: Darstellung der 7-Tage-Inzidenzen im Modell für alle Altersgruppen für das Szenario, dass die Erwachsenen (16+J) aufgrund hoher Impfquote und hoher Wirksamkeit der Impfung weitgehend von der Infektionsdynamik eliminiert werden. Zu beachten ist die logarithmische Darstellung, und dass die Inzidenzen im Modell alle Fälle enthalten; also auch die nicht erkannten Fälle. Vgl. [URL Simulationsergebnisse](#)

⁴ Z.B. kann man im Modell (unrealistischerweise) 95% der Erwachsenen (16+J) impfen sowie annehmen, dass die Impfstoffe gegen die Delta-Variante genauso gut schützen wie gegen die früheren Varianten.

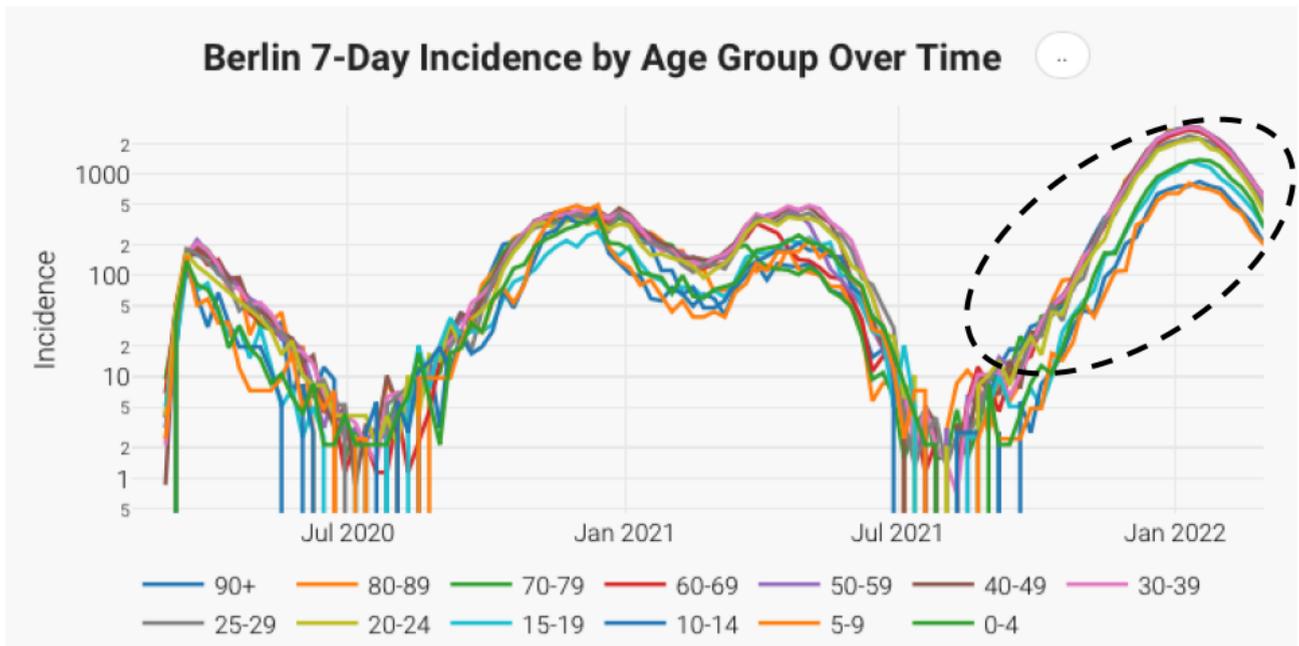


Abbildung 3: Darstellung der 7-Tage-Inzidenzen im Modell für alle Altersgruppen für das Szenario, dass durch effektive Maßnahmen in den Schulen die Schüler weitgehend geschützt werden. Zu beachten ist die logarithmische Darstellung und dass die Inzidenzen im Modell alle Fälle enthalten; also auch die nicht erkannten Fälle. Vgl. [URL Simulationsergebnisse](#)

5 Schulöffnungen nach den Sommerferien

Wie oben bereits ausgeführt, ergibt unser Modell, dass die Delta-Variante in Verbindung mit vollständigen Schulöffnungen (keine Maskenpflicht im Unterricht, kein Wechselunterricht, kein verbessertes Lüften) zu einer überkritischen Situation an den Schulen führt. Selbst wenn wir unrealistischerweise annehmen, dass 95% der Erwachsenen (16J+) geimpft sind, und der Impfstoff gegen die Delta-Variante genauso gut wirkt wie gegen die früheren Varianten, ergeben sich bei uns im Modell aktivitätsbezogene Beiträge zum R-Wert ungefähr wie folgt: Schule 0,6; Kita 0,2; Haushalt 0,2; Freizeit 0,2; Summe 1,2 und damit deutlich überkritisch.

5.1 Lüftung in Schulen

Die Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung in unserem Modell ist u.a. proportional zu $1/ae$, wobei ae = air exchange = Luftwechselrate. Eine Luftwechselrate von 1/h bedeutet z.B., dass die gesamte Luft eines Raumes innerhalb von einer Stunde ausgetauscht wird. In Schulen gehen wir im Normalfall von einer Luftwechselrate von 0,5/h aus; ab den Sommerferien 2020 haben wir mit 1/h gerechnet. Im vorliegenden Bericht betrachten wir auch Luftwechselraten von 2/h und 4/h.

Derzeit werden Geräte diskutiert, welche $1000\text{m}^3/\text{h}$ Luftreinigungsleistung haben, oder auch "das Vierfache des Raumvolumens pro Stunde" (J. Curtius, Granzin, and Schrod 2021; Joachim Curtius 2021). Deren Leistung ist bei einem Klassenzimmer von 80m^2 vergleichbar mit manueller Lüftung $4\text{x}/\text{h}$.⁵ Dabei ist allerdings wichtig, dass die Geräte **durchgehend eingeschaltet bleiben, und z.B. nicht nur in den Pausen**. Um dies zu ermöglichen, muss die Lärmentwicklung niedrig genug sein. Die entsprechenden Richtlinien schreiben 35dB vor (Joachim Curtius 2021). Allerdings liegt,

⁵ $80\text{m}^2 \times 3\text{m}$ Deckenhöhe = 240m^3 ; $1000\text{m}^3/\text{h}$ bewirken also eine Luftaustauschrate von $4\text{x}/\text{h}$.

bei offenen Fenstern, bereits das Lärmniveau an einer schwach befahrenen Straße bei 45dB; an stark befahrenen Straßen liegen nochmals deutlich höher. Insofern wäre in Pandemiezeiten u.E. auch ein Niveau von 45dB zu rechtfertigen.

Offensichtlich ergänzen sich Luftreiniger und manuelles Lüften. Daher sollte auf manuelles Lüften auch dann nicht verzichtet werden, wenn ein Luftreinigungsgerät zur Verfügung steht.

5.2 Testverfahren

Wir haben zwei verschiedene Arten von Tests mit folgenden Annahmen modelliert:

- Zum einen Schnelltests, die am Morgen vor allen Aktivitäten durchgeführt werden. Schnelltests erkennen in der Simulation 70% der ansteckenden Personen, die Falsch-Positiv-Rate liegt bei 3%. Positiv getestete Personen begeben sich in häusliche Quarantäne, wobei diese nach 2 Tagen wieder verlassen wird, wenn das Ergebnis falsch positiv war.⁶
- Darüber hinaus gibt es noch die genaueren PCR-Tests. Die Annahme in der Simulation ist, dass diese am Abend durchgeführt werden und das Ergebnis am nächsten Morgen vorliegt. In der Praxis sollte also zwischen Test und Ergebnis nicht mehr als 1 Tag vergehen. PCR-Tests können in der Simulation Personen bereits 1 Tag nachdem sie infiziert wurden erkennen (und somit bevor sie ansteckend sind). Die Erkennungsrate bei PCR-Tests liegt in der Simulation bei 90%⁷ und die Falsch-Positiv-Rate bei 1%. Eine mögliche Testform sind sogenannte gepoolte PCR-Tests, und das sogenannte Lolli-Verfahren zur Probenentnahme.

5.3 Simulationsresultate

Wir haben verschiedene Kombinationen von Lüftung, PCR-Tests und Schnelltests simuliert. Ausgangspunkt ist die simulierte Situation an den Berliner Schulen nach den Sommerferien im August (vgl. Tabelle 1). Wir ziehen folgende Schlüsse:

- Wenn nichts unternommen wird, ergibt sich laut unseren Simulationen an den Schulen ein hoher Beitrag zum R-Wert von 0,6.
- Es gibt viele Kombinationen aus den o.g. drei Bausteinen, welche diesen Beitrag zum R-Wert auf eine irrelevante Größenordnung ($<0,01$) absenken.
- Das derzeit übliche Maßnahmenpaket (ungefähr verdoppeltes manuelles Lüften verbunden mit Schnelltests 2x/Woche) reicht nicht aus.

⁶ Die Simulation geht davon aus, dass 70% der ansteckenden Personen durch den Schnelltest in Quarantäne gehen. Dabei ist es egal, wie sich die Fehler verteilen auf den Test selber oder die ausbleibende Selbstquarantäne danach. Es gibt sehr unterschiedliche Aussagen über die Genauigkeit von Schnelltests; offenbar funktionieren sie schlechter bei prä- oder symptomatischen Infizierten (die aber besonders wichtig sind), dafür aber besser bei besonders hoher Viruslast (wo die Erkennung dann auch besonders viele Ansteckungen vermeidet).

⁷ Das PCR-Verfahren selber ist genauer als diese 90%, aber es gibt in der Praxis oft Fehler im Prozess, z.B. beim Abstrich oder der Probenbehandlung.

Wir halten diese Simulationen nicht für präzise genug, um diese Zahlenwerte für vollständig belastbar zu erklären. Sinnvoll erscheint uns dennoch ein Abrücken von der Idee, dass eine Einzelmaßnahme ausreichen wird, hin zu einem Ansatz, welcher alle Möglichkeiten kombiniert, und bei Bedarf hoch- oder runtergefahren werden kann. Ein möglicher Ansatz wäre wie folgt:

1. Ausrüstung aller Klassenzimmer mit mechanischen Lüftungsgeräten. Identifikation von Lüftungsstufen, welche bzgl. Geräuschentwicklung verträglich sind. Einweisung aller Beteiligten, dass die Geräte durchgehend laufen müssen, und dass zusätzlich mindestens 1x/(Unterrichts-)Stunde eine Stoßlüftung (5min) durchgeführt werden sollte. Falls nicht genügend Geräte beschafft werden können, Konzentration auf Räume, wo dies besonders dringend erscheint.
2. Durchführung von gepoolten PCR-Tests 1x/Woche.
3. Durchführung von Schnelltests 1x/Woche.
4. Entsprechendes Hoch- oder Runterfahren der Testfrequenzen in 2. und 3. je nach Infektionsgeschehen.
5. Maskenpflicht im Unterricht als Rückfallebene.

Laut unseren Simulationen könnte auch auf die Schnelltests verzichtet werden. Dies setzt voraus, dass die PCR Pooltests bei Notwendigkeit 5x/Woche durchgeführt werden könnten.

Wichtig ist auch folgendes: Selbst wenn die Infektionen an Schulen auf diese Weise auf einem niedrigen Niveau gehalten werden, ist zu erwarten, dass eine vierte Welle bei den Erwachsenen ab ca. September einsetzt, getrieben durch die Verlagerung von Freizeitaktivitäten in Innenräume. Wie in dem Abschnitt 4 "Abhängigkeiten zwischen Untergruppen" beschrieben, werden sich die Inzidenzen bei den Schüler:innen dann aus der Multiplikation der Inzidenzen bei den Erwachsenen mit einem konstanten Faktor, welcher vermutlich deutlich kleiner als 1 sein wird, ergeben. Damit wird es in dieser Situation exponentiell ansteigende Inzidenzen bei den Schüler:innen geben.

Luftwechselrate	PCR-Tests	Schnelltests	Beitrag zum R-Wert Schulen im August
0,5x/h	0	0	0,6
0,5x/h	0	5x/Wo	0,1
0,5x/h	1x/Wo	2x/Wo	0,2
0,5x/h	1x/Wo	5x/Wo	<0,01
0,5x/h	2x/Wo	1x/Wo	0,05
0,5x/h	2x/Wo	3x/Wo	<0,01
0,5x/h	3x/Wo	0	0,05
0,5x/h	3x/Wo	2x/Wo	<0,01
0,5x/h	4x/Wo	0	<0,01

1x/h	0	0	0,2
1x/h	0	4x/Wo	<0,01
1x/h	1x/Wo	0	0,05
1x/h	1x/Wo	3x/Wo	<0,01
1x/h	2x/Wo	0	0,05
1x/h	2x/Wo	2x/Wo	<0,01
1x/h	3x/Wo	0	<0,01
2x/h	1x/Wo	2x/Wo	0,05
2x/h	1x/Wo	4x/Wo	<0,01
2x/h	2x/Wo	0	<0,01
4x/h	0	5x/Wo	0,02
4x/h	1x/Wo	4x/Wo	<0,01
4x/h	2x/Wo	0	<0,01

Tabelle 1. Beitrag der Schulen zum R-Wert im August laut Modell bei verschiedenen Maßnahmen. Die Tabelle ist absichtlich unvollständig, um übersichtlich zu bleiben. Die Tabelle soll eine Intuition bzgl. der relativen Wirkungen der unterschiedlichen Maßnahmenkombinationen vermitteln. Sie gibt keine Garantie, dass die genannten Maßnahmen in der jeweiligen Situation ausreichen werden.

6 Vierte Welle bei den Erwachsenen

Unser Modell ergibt unter allen derzeit realistisch erscheinenden Bedingungen eine vierte Welle bei den Erwachsenen, welche mit der Verlagerung von Aktivitäten in Innenräume im Herbst verstärkt werden wird. Nur wenn die Impfstoffe gegen Delta deutlich besser wirken als derzeit bekannt, oder wenn eine Impfquote von 95% erreicht wird, dann bleibt diese Welle in unseren Simulationen aus.

Nach der am Anfang entwickelten Position ist eine Einschränkung von Grundrechten Geimpfter nicht mehr geboten, wenn allen ein "Impfangebot ohne vermeidbare Zugangshürden" gemacht wurde. Für Personen ab 12 Jahren wurde dieses Angebot möglicherweise bis September/Okttober gemacht. Es stellt sich die Frage, wie mit Personen <12J umgegangen werden soll. Hier wird ein Impfstoff frühestens im nächsten Jahr zur Verfügung stehen.

Um diesem Personenkreis (bzw. deren Eltern) die Wahlmöglichkeit zwischen Impfung und (wahrscheinlicher) Infektion zu belassen, müssen die Inzidenzen bei den Erwachsenen niedrig gehalten werden, da eine vollständige Abschirmung der Kinder vor den Inzidenzen der Erwachsenen nicht möglich scheint (vgl. Abschnitt 4 "Abhängigkeiten zwischen Untergruppen").

Falls hingegen für Personen unter 12 Jahren keine Wahlmöglichkeit zwischen Impfung und (wahrscheinlicher) Infektion belassen werden soll, so kann die Steuerung entlang der Inzidenzen bei den Erwachsenen verlassen werden zugunsten einer Orientierung an der Belastung der Krankenhäuser. Die Voraussetzungen dafür, z.B. bzgl. Meldepflichten, werden derzeit entwickelt.⁸

Laut unseren Simulationen ist es dafür wichtig, sich an den Krankenhaus-Zahlen und *nicht* an den Intensiv-Zahlen zu orientieren, da letztere zu klein sind und daher zu stark zufällig fluktuieren. Weiterhin ist es wichtig, neben der Belegung auch die Covid-19-bezogenen Neuzugänge zu erhalten, da nur dieser Indikator schnell genug reagiert, wenn es gleichzeitig erhöhte Zahlen von Entlassungen einer vorherigen Welle gibt.

Laut unseren Simulationen wird im Oktober ein exponentieller Anstieg bei den Krankenhauszahlen starten. Falls die derzeitige Entwicklung anhält, wird dies sogar früher beginnen, und sich im Oktober dann nochmal verstärken. Es wird dann eine Festlegung nötig sein, bei welcher Krankenhausbelastung politische Maßnahmen ergriffen werden, um den Anstieg zu bremsen, oder ob, bis zur Wahlmöglichkeit bzgl. Impfung für die unter 12-jährigen, an einer Inzidenz-Steuerung festgehalten werden soll.

Mögliche Maßnahmen zur Reduktion der Inzidenzen bei Erwachsenen sollten sich auf Innenräume konzentrieren. Im Prinzip würde es vermutlich ausreichen, die Maßnahmen nur auf Nicht-Geimpfte zu konzentrieren, aber es ist nicht klar, ob das in jedem Fall durchsetzbar sein wird, z.B. bzgl. Maskenpflicht im öffentlichen Verkehr. Antigen-Schnelltests haben vermutlich zu wenig Reduktionswirkung (ca. Faktor 3), um alleine eine Impfung zu ersetzen. Eine gute Alternative wären PCR-Schnelltests, wobei unklar ist, wer dann für die relativ hohen Kosten aufkommen sollte.

7 Reiseaktivitäten zwischen verschiedenen Inzidenzgebieten

Durch den Beginn der Sommerferien treten zurzeit viele Menschen in Deutschland Auslandsreisen an. Gleichzeitig verbreitet sich in den meisten (Urlaubs-)Ländern die sogenannte Delta-Variante des Coronavirus. Die Sorge ist, dass Touristen nun die ansteckendere Variante nach Deutschland eintragen und diese hier zu einem erneuten Anstieg der Fallzahlen führt.

Wir wollen im Folgenden die folgende Frage beantworten: Wenn in einem Land eine ansteckendere Mutante *noch nicht* dominant ist, was sind dann die Auswirkungen auf die dortige Inzidenz, wenn Reisende aus Hochinzidenz- und Virusvariantengebieten zurückkehren?

⁸ Die Frage, ob diese Wahlmöglichkeit belassen werden soll, indem Einschränkungen aufrechterhalten werden, bis ein Impfstoff für Kinder unter 12 Jahren zur Verfügung steht, können wir nicht beantworten; dies obliegt Gremien wie der Ständigen Impfkommission oder dem Ethikrat sowie der Politik. Wir möchten allerdings mit aller Deutlichkeit darauf hinweisen, dass laut unserem Modell nur die Vermeidung von Ansteckungen an den Schulen nicht ausreichen wird, um diese Wahlmöglichkeit bestehen zu lassen, sondern bis zur Verfügbarkeit der entsprechenden Impfstoffe auch Ansteckungen bei (ungeimpften) Erwachsenen unterdrückt werden müssen.

7.1 Modellierung

Wir simulieren dies wie folgt: Land A hat eine niedrige Inzidenz (ca. 11), Tendenz fallend. Das heißt, die Corona-Lage in Land A ist entspannt und die Reproduktionsrate ist kleiner 1. Dies wird modelliert durch einen sehr kleinen Infektionsparameter.

Einreisende aus anderen Gebieten werden modelliert, indem wir, ähnlich unserem Metapopulationsmodell, welches wir bereits im **Bericht vom 19.03.** vorgestellt haben, Bewegungen zwischen verschiedenen Gebieten zulassen, die jeweils durch ein eigenes, unabhängiges ODE-Modell beschrieben werden (vgl. Müller et al. 2021). In diesen Gebieten herrschen unterschiedliche Bedingungen: alle haben eigene Infektionsraten (dies modelliert unterschiedliche Inzidenzen) und eigene Mutationsparameter, die die Ausbreitung einer ansteckenderen Mutante beschreiben. Diese Mutante (im Folgenden genannt "Mutation X") wird modelliert, indem wir einem Teil der Infizierten eine höhere Infektionsrate geben, sodass sie andere Menschen noch schneller anstecken.

Die restlichen Parameter (zum Beispiel die Hospitalisierungsrate, die beschreibt, wie oft Infizierte in ein Krankenhaus eingeliefert werden) sind in allen Teilmodellen gleich, denn sie sind unabhängig von den Maßnahmen in den verschiedenen Regionen.

7.2 Verschiedene Szenarien

Wir modellieren nun zwei Szenarien.

Szenario 1:

Im ersten Szenario hat Land A keine Fälle der Mutation X im Land. Nun reisen Touristen aus drei verschiedenen Ländern ein:

- aus Land B, wo die Inzidenz relativ niedrig ist (Inzidenz = 30), aber die Mutation X 80 % der Fälle ausmacht;
- aus Land C, wo die Inzidenz hoch ist (Inzidenz = 120) und die Mutation X 85 % der Fälle ausmacht;
- und aus Land D, wo die Inzidenz hoch ist (Inzidenz = 120), aber die Mutation X nicht auftritt.

Wie verändert sich die Inzidenz in Land A **nach 70 Tagen**?

Situation in Land A am Tag 70	Keine Einreisenden	Einreisende aus Land B	Einreisende aus Land C	Einreisende aus Land D
Inzidenz	5	18	35	8
Anteil der Mutation X an Gesamtinfektionen	0	65	80	0

Tabelle 2: Situation in Land A am Tag 70 bei Eintrag aus verschiedenen Ländern, wenn die Mutation X in Land A noch nicht aufgetreten ist

Es gibt einen deutlichen Unterschied der Prognosen (siehe Tabelle 2):

Kein Eintrag: Ohne Eintrag von außen verringert sich die Inzidenz in Land A auf 5, da die Reproduktionsrate unter 1 ist.

Eintrag aus Land B: Wenn Touristen aus Land B einreisen, führt das zu einem Anstieg der Inzidenz auf 18. Auch die Mutation X breitet sich stark aus und liegt bei einem Anteil von 65 % an den Gesamtinfectionen am Tag 70. Der Anstieg der Inzidenz in Land A ist (zunächst) verhältnismäßig schwach, was daran liegt, dass die Infektionsrate in Land A sehr niedrig ist und die Infectionen bremst.

Eintrag aus Land C: Wenn die Touristen aus einem Land mit hoher Inzidenz und vorherrschender Mutation X einreisen, steigt die Inzidenz in Land A auf 35 innerhalb von 70 Tagen. Die Mutante macht nach 70 Tagen 80 % der Fälle aus.

Eintrag aus Land D: Bei Touristen aus einem Land mit hoher Inzidenz, die aber nicht durch die Mutation X entstanden ist, erhöht sich die Inzidenz nach 70 Tagen nur von 5 (wenn kein Eintrag) auf 8.

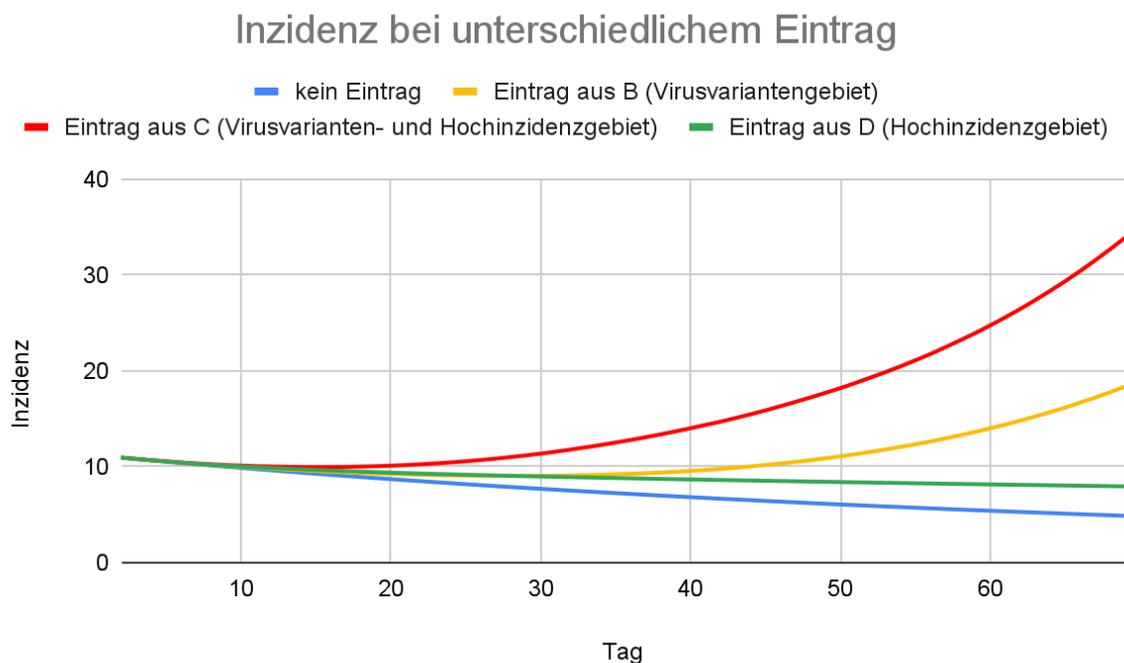


Abbildung 4: Inzidenz in Land A bei unterschiedlichem Eintrag. Die gelbe Kurve (Eintrag aus Virusvarianten- und Hochinzidenzgebiet) erhöht die Inzidenz in Land A von ca. 5, wenn kein Eintrag erfolgt, auf 35, mit stark ansteigendem Trend.

Neuinfektionen durch Mutante in Land A bei verschiedenem Eintrag

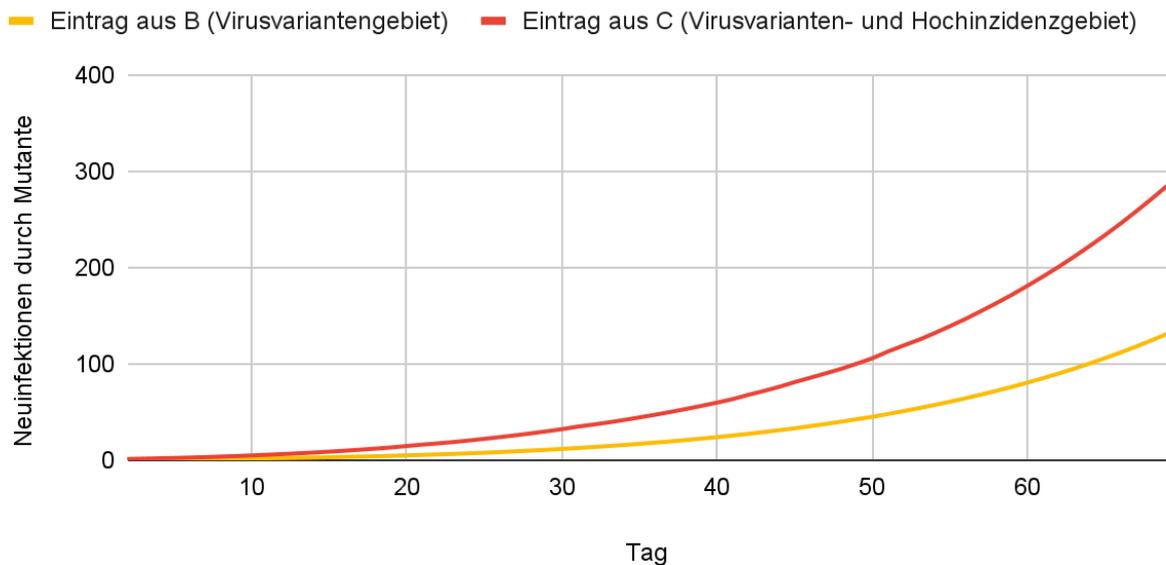


Abbildung 5: Anzahl von Neuinfektionen in Land A, die durch die Mutation X entstanden sind. Beide Kurven scheinen den Verlauf des exponentiellen Wachstums zu nehmen, wobei die rote Kurve (Eintrag aus Hochinzidenz- und Virusvariantengebiet deutlich schneller ansteigt).

Diese Trends sind in Abb. 4 dargestellt. Wenn man sich die Anzahl der Neuinfektionen pro Tag durch die Mutante in Land A anschaut (Abb. 5), sieht man außerdem, dass das exponentielle Wachstum der Mutations-Fälle an Fahrt aufnimmt.

Szenario 2:

Im zweiten Szenario nehmen wir an, dass in Land A die Mutation X des Coronavirus dominiert, d.h. dass sie mehr als 50 % der Gesamtfektionen verursacht. Die Inzidenz in Land A ist durch die kleine Infektionsrate (noch) genauso gering wie am Anfang von Szenario 1 und hat einen Wert von 11. Nun kommen die gleichen Einreisenden wie in Szenario 1 ins Land. Wie verändert sich die Inzidenz?

Situation in Land A am Tag 70	Keine Einreisenden	Einreisende aus Land B	Einreisende aus Land C	Einreisende aus Land D
Inzidenz	170	180	185	175
Anteil der Mutation X an Gesamtfektionen	100	100	100	100

Tabelle 3: Situation in Land A am Tag 70 bei Eintrag aus verschiedenen Ländern, wenn in Land A die Mutation X vorherrscht.

Wie in Tabelle 3 zu sehen ist, steigt durch den hohen Anteil der Mutation X in Land A die Inzidenz trotz strenger Maßnahmen (modelliert durch eine kleine Infektionsrate) sehr stark an, auch wenn kein zusätzlicher Eintrag von außen stattfindet. Nach 70 Tagen liegt die Inzidenz bei 180, mit einem Anteil der ansteckenderen Variante von 100 %.

Was geschieht, wenn auch Touristen dazukommen?

Bei Einreisenden (siehe Abbildung 6):

- aus Land B liegt die Inzidenz in Land A nur unwesentlich höher als ohne Tourismus (bei 180),
- aus Land C steigt die Inzidenz auf 185,
- aus Land D steigt die Inzidenz „nur“ auf 175.

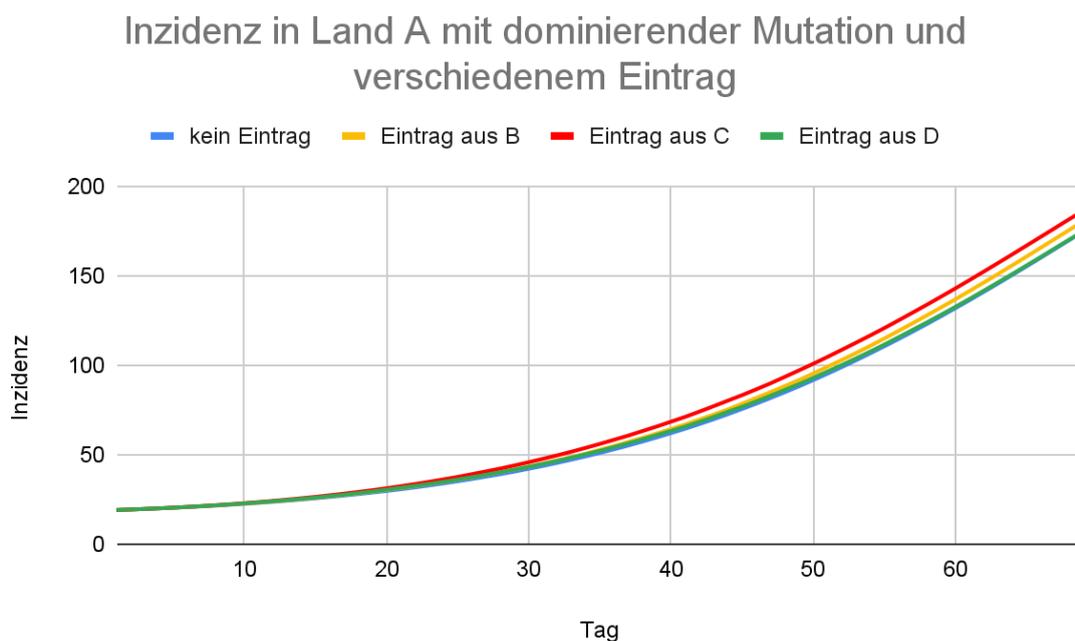


Abbildung 6: Inzidenz in Land A bei unterschiedlichem Eintrag. Die höchste Inzidenz entsteht wieder bei Eintrag aus dem Hochinzidenz- und Virusvariantengebiet (Land C), allerdings ist der Unterschied gegenüber den anderen beiden Kurven minimal.

7.3 Zusammenfassung

Bei Einreisenden aus Virusvarianten-Gebieten mit hohen Inzidenzen wird dies den Anstieg der Fallzahlen in Land A mehr beschleunigen als mit niedrigen Inzidenzen. Wenn die Variante bereits prävalent ist, wird sie auch ohne Eintrag durch Touristen zu einer drastischen Erhöhung der Fallzahlen führen.

Daraus ergibt sich, dass insgesamt der Eintrag neuer, stärker ansteckender Varianten deutlich mehr Einfluss auf die Dynamik hat als ein Eintrag von bereits vorhandenen Varianten. Hier stellt sich die Frage, ob die Identifikation von Virusvariantengebieten früh genug erfolgt, um solche Einträge signifikant zu vermeiden – wenn die Variante einmal hier ist, ist es meistens schon zu spät. Unter diesem Aspekt sind auch die Reisebeschränkungen für Hochinzidenzgebiete zu bewerten: In Hochinzidenzgebieten kursieren mit höherer Wahrscheinlichkeit Varianten und dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass eine Variante von Einreisenden mitgebracht wird.

8 Quellen

- Buyx, A. 2021. "Kurzvortrag." Fachgespräch BMG 2021-07-07.
- Curtius, J., M. Granzin, and J. Schrod. 2021. "Testing Mobile Air Purifiers in a School Classroom: Reducing the Airborne Transmission Risk for SARS-CoV-2." *Aerosol Science and Technology: The Journal of the American Association for Aerosol Research* 55 (5): 586–99.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1877257>.
- Curtius, Joachim. 2021. "Vorbereitung einer VDI-Expertenempfehlung und Ergebnisse aus der Anwendung in Schulklassen." Persönliche Kommunikation.
- Die ZEIT. 2021. "Corona-Impfung für Kinder: Wer die Kinder nicht impft, riskiert die Durchseuchung." ZEIT ONLINE. July 11, 2021.
<https://www.zeit.de/hamburg/2021-07/corona-impfung-kinder-jugendliche-hamburg-bayern/>.
- Müller, Sebastian Alexander, William Charlton, Natasa Djurdjevac Conrad, Ricardo Ewert, Dominic Jefferies, Christian Rakow, Hanna Wulkow, Tim Conrad, Christof Schütte, and Kai Nagel. 2021. "MODUS-COVID Bericht vom 19.03.2021." Technische Universität Berlin.
<https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-11678>.
- Senozon. 2021. "The Senozon Mobility Model." The Senozon Mobility Model. 2021.
<https://senozon.com/en/model/>.