

# MODUS-COVID Bericht vom 19.03.2021

Arbeitsgruppe Prof. Dr. Kai Nagel, Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik ("VSP"),  
TU Berlin, [nagel@vsp.tu-berlin.de](mailto:nagel@vsp.tu-berlin.de)  
Arbeitsgruppen Prof. Dr. Christof Schütte, PD Dr. Tim Conrad, Zuse-Inst. Berlin ("ZIB")

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



## Zusammenfassung

Unser Bericht geht von folgenden Grundüberlegungen aus:

- Trotz "Notbremse" wird die dritte Welle im Maximum zu höheren Inzidenzen führen als die zweite Welle, da die Mutation B.1.1.7 deutlich ansteckender ist als die bisherigen Virusvarianten. Die positiven Wirkungen von Impfungen und wärmerem Wetter sind bei dieser Aussage bereits berücksichtigt (S. 2).
- Nahezu alle Infektionen in unserem Modell beruhen auf ungeschützten Kontakten in Innenräumen. Wenn der R-Wert unter 1 gehalten werden soll, müssen zusätzliche Anstrengungen unternommen werden, um solche ungeschützten Kontakte zu reduzieren (S. 2).

Laut Modell gibt es Infektionen praktisch nur in folgenden Bereichen: eigener Haushalts; private Besuchen; Arbeit; Schulen. Infektionen finden vor allem statt, wenn diese Kontakte *ungeschützt* sind. Wir diskutieren für die unterschiedlichen Bereiche mögliche Maßnahmen (S. 3). Eine quantitative Übersicht über die Resultate findet sich in Tabelle 1 im Anhang.

Wir untersuchen die Wirkungen von Schnelltests. Die Simulationen enthalten viele mögliche Kombinationen; im vorliegenden Bericht konzentrieren wir uns auf "1x/Woche im Bildungsbereich" plus "1x/Woche im Bereich Arbeit" plus Tests vor 20% der gegenseitigen Besuche. Dies führt zu ca. 3,4 Millionen Tests pro Woche für Berlin, und ist damit konsistent mit derzeit kommunizierten Zielzahlen (S. 6).

In unserem mathematischen Modell untersuchen wir die Interaktionen zwischen Steuerstrategien in unterschiedlichen Regionen. Das Modell zeigt, dass Steuerstrategien nur dann erfolgreich sein können, wenn durch Personenaustausch verbundene Regionen koordiniert vorgehen (S. 9).

# Generelle Überlegungen

## Die "Notbremse" wird nicht ausreichen, um die dritte Welle kleiner als die zweite zu halten

Voraussichtlich in wenigen Tagen wird in Deutschland die 7-Tages-Inzidenz von 100 überschritten werden, ab der die sog. "Notbremse" in Kraft treten soll. Wir möchten in diesem Zusammenhang vor einem möglichen Missverständnis warnen: Unsere Simulationen zeigen, dass **selbst mit den Restriktionen vom Januar die dritte Welle höhere Inzidenzen aufweisen wird als die zweite** (vgl. Abb. 1). Dies liegt an der deutlich höheren Übertragbarkeit der Mutation B.1.1.7 im Vergleich zum Wildtyp.

**Wenn vermieden werden soll, dass die dritte Welle höher als die zweite wird, dann muss eine Gesamtstrategie gefunden werden, die *besser wirkt als die vom Januar*.**

## Impfungen und wärmeres Wetter haben nicht genug Wirkung, um die dritte Welle zu verhindern

Die dämpfende Wirkung, die wir durch die wärmere Jahreszeit ab April erwarten, ist bei uns im Modell bereits berücksichtigt; ohne diese wäre die zu erwartende dritte Welle nochmals doppelt so hoch.<sup>1</sup>

Bei Fortsetzung des derzeitigen Impftempos werden Mitte April knapp 15% der Bevölkerung mindestens eine Erstimpfung haben. Das senkt überschlägig den R-Wert um 15%, und ist damit deutlich zu wenig, um die durch B.1.1.7 verursachte Erhöhung des R-Wertes um 35-70% auszugleichen. Selbst eine 50%ige Erhöhung des Impftempos ab 1. April würde daran nichts mehr ändern. **Wir gehen also mit schlechteren Voraussetzungen als 2020 in die wärmere Jahreszeit.**

**Impfungen und wärmeres Wetter haben aufgrund der Coronavirus-Mutation B.1.1.7 nicht genug Wirkung, um die dritte Welle zu verhindern.**

## Keine ungeschützten Kontakte in Innenräumen

Es ist in der Wissenschaft inzwischen grundsätzlich akzeptiert, dass vor allem **ungeschützte Kontakte in Innenräumen vermieden werden müssen**. Die Details davon untersuchen Aerosolforschende wie z.B. Kollege Kriegel an der TU Berlin<sup>2</sup>. Der Beitrag unseres Modells besteht darin, dass wir deren Resultate als Input nehmen, und auf die Aktivitäten der Bevölkerung hochrechnen.

Als wirksame/sinnvolle Schutzmaßnahmen, um diese ungeschützten Kontakte zu vermeiden oder zu reduzieren, gibt es derzeit:

- Masken,
- Impfungen,
- Schnelltests,
- Verlagerung von Aktivitäten nach draußen,
- deutliche Reduzierung der Personendichte in Innenräumen,
- Einbau besserer Lüftungssysteme.

<sup>1</sup> Vgl. <https://covid-sim.info/2021-02-23/testing?extrapolateRestrictions=yesUntil80> und dort den Schalter "outdoor model 2021".

<sup>2</sup> Vgl. [www.tu.berlin/forschen/themenportal-forschen/2020/august/faq-zu-aersolen-in-bezug-auf-sars-cov-2/](http://www.tu.berlin/forschen/themenportal-forschen/2020/august/faq-zu-aersolen-in-bezug-auf-sars-cov-2/)

Unsere Simulationen ergeben konsistent, dass es effektiver ist, alle Bereiche zu beteiligen, als in einem einzelnen Bereich weitere Schutzmaßnahmen hinzuzufügen. Zum Beispiel hat nach der Einführung der Maskenpflicht im Einzelhandel die vollständige Schließung nicht-essenzieller Geschäfte kaum zusätzliche Wirkung.

Andererseits ist es so, dass **Bereiche, in denen ungeschützte Kontakte in Innenräumen weiterhin möglich sind, dramatisch zum Infektionsgeschehen beitragen**. Diese Bereiche sind derzeit (die Summe der Beiträge zum R-Wert muss unter 1 bleiben):

1. Kontakte im eigenen Haushalt (unvermeidbar; Beitrag zum R-Wert **0,5**),
2. gegenseitige private Besuche (Beitrag zum R-Wert **0,6**, wenn ohne Masken/Schnelltests)
3. Kontakte bei der Arbeit (Beitrag zum R-Wert **0,2**, wenn nicht in Einzelbüros/ohne Masken/ohne Schnelltests)
4. Kontakte in Schulen (Beitrag zum R-Wert **0,2**, wenn ohne Masken/Wechselunterricht/Schnelltests).

**Die o.g. Bereiche (gegenseitige private Besuche, ungeschützte Kontakte bei der Arbeit, ungeschützte Kontakte in Schulen) müssen stärker als bisher einbezogen werden, wenn die Kontrolle der Coronavirus-Mutation B.1.1.7 gelingen soll.**

## Mögliche Maßnahmen zur Eindämmung der dritten Welle

Bekanntlich muss der **R-Wert unter 1 bleiben**, um die Epidemie zu kontrollieren. Im Folgenden diskutieren wir erneut die o.g. problematischsten Ansteckungskontexte und ihre Beiträge zum Infektionsgeschehen, basierend auf der ansteckenderen Mutation B.1.1.7 sowie dem derzeitigen Niveau der aushäusigen Aktivitäten (76%; vgl. Anhang für die neuesten Mobilitätsdaten):

### Ansteckungen bei Mitgliedern des eigenen Haushalts

Beitrag zum R-Wert: **0,5**. Diese sind nach dem bisherigen politischen Vorgehen (d.h. wenn man die Isolierung von Erkrankten in Quarantänehotels nicht als Regelfall definiert) weitgehend unvermeidbar.

### Ansteckungen bei gegenseitigen Besuchen ohne Schutzmaßnahmen

Beitrag zum R-Wert: **0,6**. Da dies alleine in Verbindung mit den o.g. unvermeidbaren Ansteckungen bei Mitgliedern des eigenen Haushalts zu einem R-Wert größer als 1 führt, ist es unumgänglich, dass diese ungeschützten Kontakte reduziert werden müssen. Die derzeitigen Regeln, und auch diejenigen vom Januar, sind/waren hier zu schwach, weil die Bevölkerung daraus mitnimmt, dass die noch erlaubten Kontakte epidemiologisch unbedenklich sind. Dies ist nicht der Fall; es muss dringend kommuniziert werden, dass im Hinblick auf B.1.1.7 **jeglicher ungeschützter Kontakt außerhalb des eigenen Haushaltes in Innenräumen nicht mehr akzeptabel** ist. Wir können nicht beurteilen, was politisch durchsetzbar ist; hier sind ein paar Ideen:

1. In Großbritannien sind private Kontakte in Innenräumen außerhalb des eigenen Haushaltes derzeit (und seit 5. Januar 2021) **vollständig verboten**. Die Durchsetzung geschieht über die Hin- und Rückwege: Ein Aufenthalt im öffentlichen Raum zum Zweck eines privaten Besuchs ist verboten. (“You must not leave or be outside of your home except where you have a ‘reasonable excuse’. This is the law. The police can take action against you if you leave home without a ‘reasonable excuse’ ...”) Für zu “kleine” Haushalte gibt es die Ausnahme der “support bubble”, innerhalb derer zwei Haushalte wie einer zählen. Ein Haushalt kann daher auch nur maximal einer “support bubble” angehören. – Seit der

Einführung dieser Maßnahmen gehen die Infektionszahlen in UK trotz B.1.1.7 kontinuierlich zurück; dieser Rückgang setzt sofort mit Beginn der Maßnahmen ein, und damit zu früh, als dass er auf den Impfungen beruhen könnte.

2. Im Prinzip wären **private Kontakte möglich, wenn sie geschützt durchgeführt würden**. Hierzu fallen uns zwei Varianten ein, die sich allerdings gegenseitig ausschließen:
  - a. **Durchsetzung durch staatliche Kontrolle:** Schutz ist möglich durch vorherige *Selbsttests, Impfungen, oder Verlagerung nach draußen*. Dies wäre ähnlich wie bei Punkt 1 auf den Hin- und Rückwegen durchsetzbar.
  - b. **Umsetzung als freiwillige soziale Norm:** Alternativ könnte Schutz zusätzlich auch durch Masken erreicht werden, also durch *Selbsttests, Impfungen, Verlagerung nach draußen, oder eben Masken*. Da eine Maskenpflicht bei privaten Besuchen vermutlich eher nicht staatlicherseits durchsetzbar ist, müsste es als soziale Norm etabliert werden, dass mindestens eine dieser vier Schutzmaßnahmen getroffen wird. Wir sind allerdings skeptisch, ob wir genügend Zeit haben, diese soziale Norm zu etablieren. – In diesem Fall noch mehr als bei den anderen Fällen wäre eine massive Werbekampagne zur Etablierung dieser sozialen Norm unerlässlich.
  
3. Eine **abendliche und nächtliche Ausgangssperre** reduziert laut unseren Modellen vor allem private Kontakte.<sup>3</sup> Es ist allerdings anzunehmen, dass die Bevölkerung mittelfristig auf frühere Besuchszeiten ausweicht, insofern ist dies ein Werkzeug, welches relativ schnell stumpf werden dürfte.

Unser Eindruck ist derzeit, dass Regeln, die nicht sehr klar sind (“wenn es nicht verboten ist, dann wird es epidemiologisch schon vertretbar sein”), nicht gut befolgt werden. Dies schließt 2b aus. Plausibel wäre dann z.B. folgendes:

- Bis auf Weiteres bei beliebiger Inzidenz: private Kontakte nur mit Schutzmaßnahme.<sup>4</sup>
- Falls die Schutzmaßnahmen nicht ausreichend eingehalten werden: Ausgangssperre nach 21 Uhr für private Kontakte, oder vollständiges Verbot privater Kontakte wie in Großbritannien.<sup>5</sup>

## Ansteckungen bei der **Arbeit**

Beitrag zum R-Wert: **0,2**. Unserem Verständnis nach herrscht derzeit keine Maskenpflicht in Mehrpersonenbüros, wenn entweder mindestens 10 m<sup>3</sup> pro Person zur Verfügung stehen, oder z.B. Plexiglasabtrennungen eingebaut sind. Die Aerosolforschung sagt, dass dies eindeutig unzureichend ist; ausgeatmete Aerosole steigen zunächst zur Decke und sind innerhalb von Minuten im ganzen Raum verteilt. Eine Maskenpflicht in Mehrpersonenbüros und bei Besprechungen würde den R-Wert-Beitrag des Bereichs “Arbeit” auf 0,025 absenken. Es liegt nahe, dass Unternehmen statt der Maskenpflicht auch durch Homeoffice oder Schichtbetrieb die Belegung soweit ausdünnen, dass Büros nur durch jeweils eine Person genutzt werden.<sup>6</sup>

---

3

<https://covid-sim.info/2021-01-17/curfew?extrapolateRestrictions=yesUntil80&curfew=no&newVariantDate=2020-11-15> beruht noch auf Simulationen mit einer zu schwachen Übertragbarkeit von B.1.1.7, zeigt aber eine Halbierung der Ansteckungen im Freizeitbereich durch eine Ausgangssperre von 20 bis 6 Uhr.

<sup>4</sup> Es ist tatsächlich nicht möglich, bei niedrigen Inzidenzen auf die Schutzmaßnahmen zu verzichten, weil B.1.1.7 so viel stärker ansteckend ist, dass das Infektionsgeschehen sofort wieder aufflammen würde. Es muss aber immer wieder daran erinnert werden, dass es ja die Möglichkeiten “Schnelltests”, “Impfung” oder “Verlagerung nach draußen” gibt.

<sup>5</sup> Man könnte sich an <https://www.gov.uk/coronavirus> orientieren zur Ausgestaltung von Ausnahmen.

<sup>6</sup> In diesem Zusammenhang hat eine Analyse unserer Mobilitätsdaten gezeigt, dass die neue SARS-CoV-2-Arbeitsschutzverordnung, welche am 27.01.2021 in Kraft getreten ist, nicht zu einer deutlichen Reduktion der aushäusigen Arbeitsaktivitäten geführt hat (vgl. Müller, Ewert, and Nagel 2021).

## Ansteckungen in Schulen

Beitrag zum R-Wert (wenn vollständig geöffnet): **0,2**. Hier gilt analog zu den Büros: Maskenpflicht, Schnelltests, Ausdünnen (= Wechselunterricht). Da im schulischen Bereich nicht erwartet werden kann, dass eine der Maßnahmen vollständig umgesetzt werden kann (z.B. wird die Maskenpflicht durch körperliche Nähe außerhalb des Unterrichts unterlaufen), ist es notwendig, von den drei Maßnahmen jeweils zwei auszuwählen, um den Beitrag zum R-Wert auf 0,02 abzusenken.

Insgesamt

**Wenn kein Maßnahmenbündel gewählt wird, welches die Summe dieser Beiträge unter 1 bringt, dann ist die dritte Welle unvermeidlich**, und führt nach unseren Simulationen in fast allen Szenarien zu höheren Inzidenzen und einer höheren Krankenhausbelastung als im Dezember 2020 (vgl. Abb. 1). Eine Übersicht über die Wirkung in den verschiedenen Ansteckungskontexten befindet sich im Anhang in Tabelle 1.

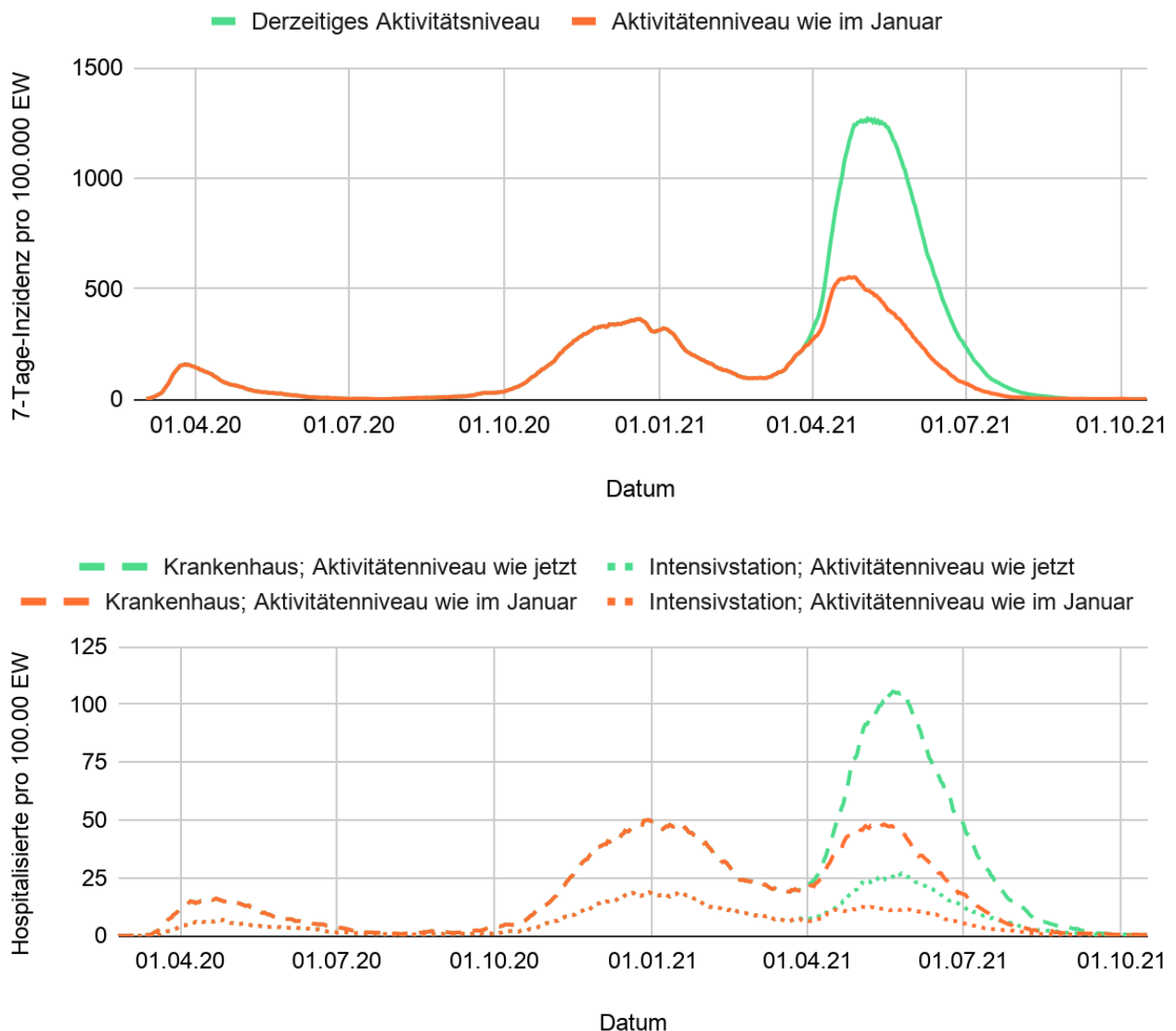


Abbildung 1: Einfluss der Aktivitätenniveaus auf die Entwicklung der Inzidenzen und der Belegung der Krankenhäuser in der Simulation für Berlin; Oben: Entwicklung der Inzidenzen; Unten: Entwicklung der Krankenhauszahlen; wenn eine vollständige Rückkehr zum Regime vom Januar gelingt, dann bleiben die Intensivstationzahlen unterhalb derjenigen vom Januar.

Vgl.: <https://covid-sim.info/2021-03-19/testing>

# Teststrategien

Wir haben in unserem letzten Bericht gezeigt, dass der verbreitete Einsatz von Schnelltests einen starken Beitrag zur Reduzierung der Fallzahlen leisten kann. Für Berlin wurde nun angekündigt, dass pro Woche ca. 3,7 Millionen Schnelltests<sup>7</sup> durchgeführt werden sollen (600.000 davon im Bildungsbereich). Bei diesem Kontingent könnte sich also jede in Berlin lebende Person einmal pro Woche testen lassen.

Vor diesem Hintergrund haben wir die Wirkung differenzierter Teststrategien mit unserem Modell untersucht.

**Basisszenario:** Im Basisszenario (mit vollständig geöffneten Schulen nach den Osterferien) prognostiziert das Modell eine starke 3. Welle, mit exponentiellem Wachstum bereits zum jetzigen Zeitpunkt und Inzidenzen von über 2.000. Dieses Szenario wird so wohl nicht eintreten, da von politischer Seite vorher die Reißleine gezogen würde. Dennoch wurde dieses Szenario als Basis gewählt, um zu zeigen, welchen Einfluss der breite und disziplinierte Einsatz von Tests in diesem relativ lockeren Regime haben könnte.

**Modellierung von Schnelltests (einschl. Selbsttests):** Wir gehen davon aus, dass die Schnelltests 70% der tatsächlich ansteckenden Personen als positiv identifizieren. Personen, die nur infiziert, aber noch nicht ansteckend sind, findet der Schnelltest nicht. Dies impliziert gegenüber einem fachgerecht durchgeführten PCR-Test eine erhebliche Fehlerquote. Weiterhin gehen wir davon aus, dass Personen, welche der Schnelltest als positiv ausweist, sofort PCR nachgetestet werden und dann in häusliche Quarantäne gehen. Das Resultat des PCR-Tests liegt nach 2 Tagen vor; wenn dieser positiv ist, verbleiben sie in häuslicher Quarantäne, ansonsten wird die Quarantäne aufgehoben. Siehe weiter unten "Allgemeine Überlegungen zu Schnelltests" für etwas Diskussion.

**Tests im Bildungsbereich (vgl. Abb. 2a):** Unsere Simulationsergebnisse zeigen, dass wöchentliches Testen aller Schülerinnen und Schüler einen starken infektionsreduzierenden Effekt hat, aber alleine nicht das exponentielle Wachstum stoppen kann. Dennoch wird die Inzidenz dadurch deutlich reduziert. Eine Erhöhung der Testfrequenz auf zweimal pro Woche würde die Wirkung nahezu verdoppeln.

Laut Modell wären für wöchentliches Testen ca. 500.000 Tests pro Woche notwendig, was bald möglich sein sollte. An dieser Stelle muss jedoch betont werden, dass die deutliche Wirkung der Schnelltests nur eintritt, wenn erstens jede Schülerin / jeder Schüler das Angebot wahrnimmt und zweitens bei einem positiven Testergebnis sofort in Quarantäne geht. Hier ist also eine hohe Beteiligungsrate und Disziplin notwendig. Insbesondere weil die Tests nicht in den Bildungseinrichtungen, sondern als Selbsttest zu Hause durchgeführt werden sollen, ist unklar, wie diese Disziplin durchgesetzt werden soll.

**Tests im Arbeitsbereich (vgl. Abb. 2b):** Werden nun zusätzlich zu wöchentlichen Tests im Bildungsbereich Tests im Arbeitsbereich durchgeführt, führt das nach unserem Modell zu einer deutlichen Reduktion der Fallzahlen, reicht aber nicht aus, um das exponentielle Wachstum zu stoppen. Die Wirkung auf die Gesamtdynamik ist dennoch stark, weil viele Personen arbeiten und damit ein erheblicher Teil der Bevölkerung in dieser Teststrategie beteiligt ist. Im Ergebnis prognostiziert das Modell Fallzahlen, welche deutlich über denen in der 2. Welle liegen, selbst wenn alle Personen mit Bildungs- oder Arbeitsaktivitäten wöchentlich getestet werden.

---

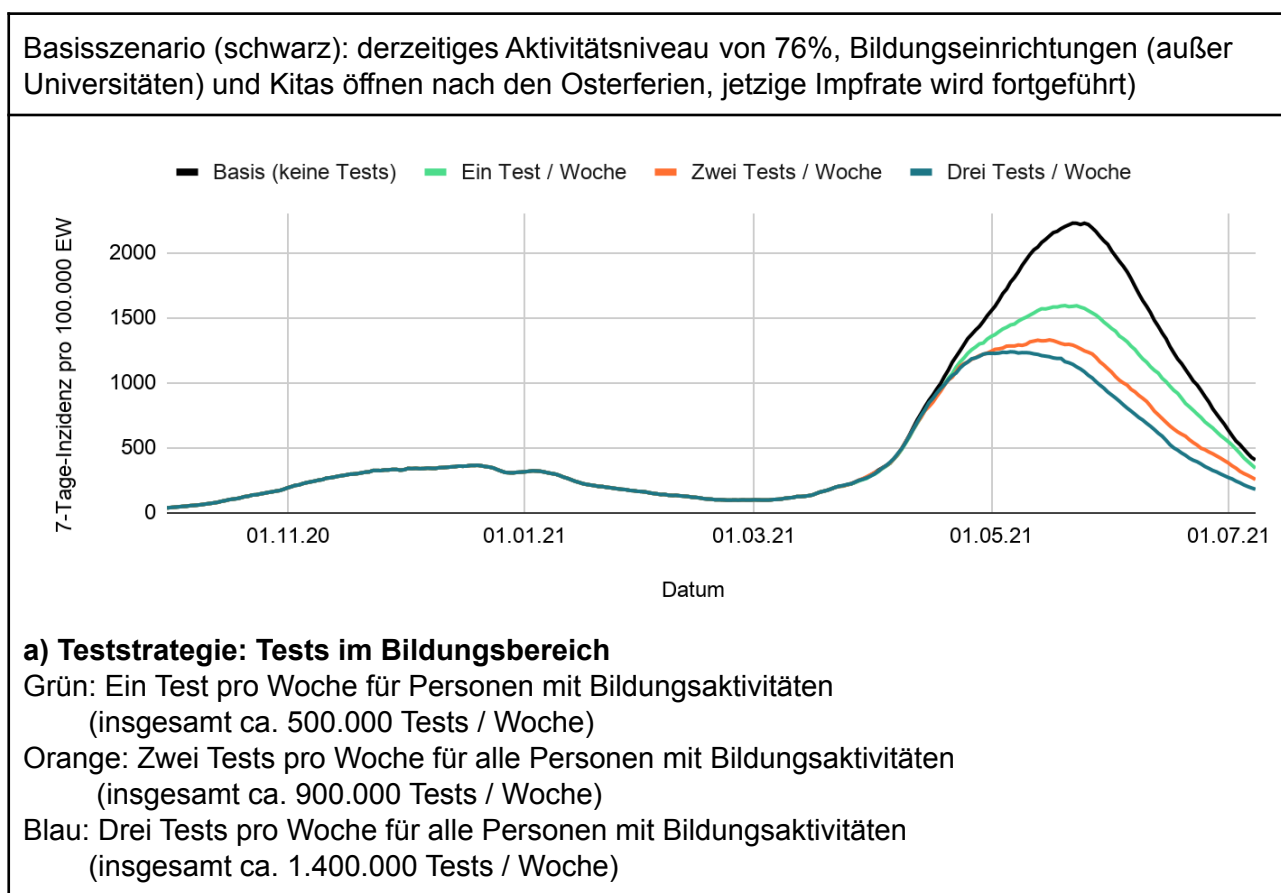
7

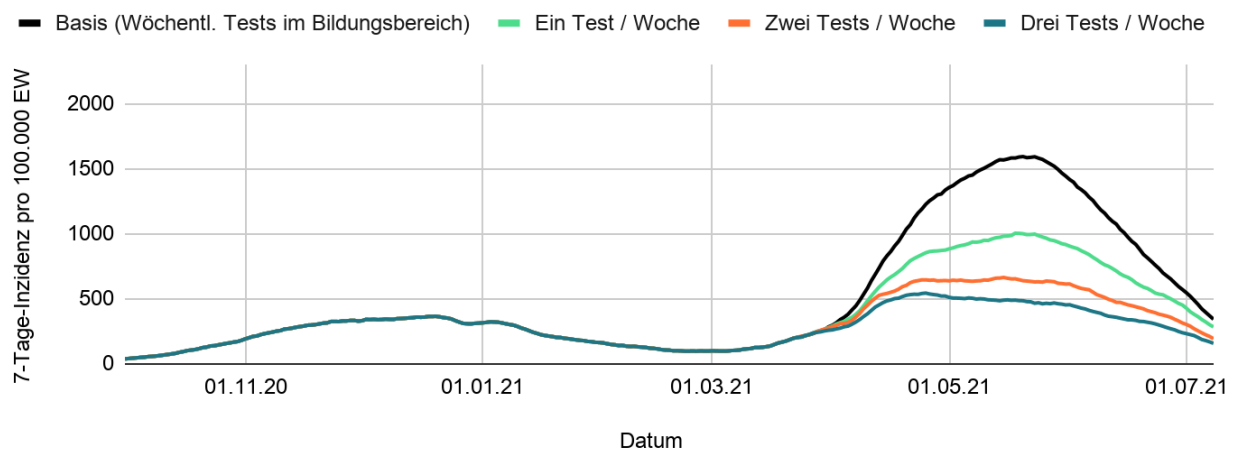
<https://www.rbb24.de/panorama/thema/corona/beitraege/2021/03/selbstteststellen-berlin-zahl-stark-gestiegen.html>

**Tests im Freizeitbereich (vgl. Abb. 2c):** Wenn nun zusätzlich zu wöchentlichen Tests im Bildungs- und Arbeitsbereich auch der Freizeitbereich in die Teststrategie integriert wird, reduziert dies die Fallzahlen in der dritten Welle nochmals deutlich. Für einen merklichen Effekt sind jedoch auch hier Tests im großen Umfang notwendig. Wenn täglich lediglich 2% der Personen mit Freizeitaktivitäten getestet (was der derzeit in Berlin angebotenen Größenordnung von ca. 25.000 Tests pro Tag entspricht), ist kaum eine Wirkung zu erkennen. Insgesamt zeigt das Modell, dass zusätzlich zu den Tests im Arbeits- und Bildungsbereich täglich ca. 20% der Personen mit Freizeitaktivitäten getestet werden müssten, um die Maximum der 3. Welle auf das Niveau der zweiten Welle zu reduzieren. Hierzu wären insgesamt 3,4 Millionen Tests pro Woche notwendig.

### Zusammengefasst ergibt sich:

- Nach unserem Modell ist eine Teststrategie, die die Bereiche Bildung, Arbeit und Freizeit im großen Umfang abdeckt, sehr effektiv.
- Die Teststrategie kann nur dann einen wirksamen Beitrag leisten, wenn in genügender Menge getestet wird und die Personen bei einem positiven Ergebnis sofort in Quarantäne gehen und das Ergebnis des notwendigen PCR-Tests abwarten.
- Im betrachteten Regime reduziert die Teststrategie das Niveau der 3. Welle im besten Fall auf das Niveau der zweiten Welle. Da unklar ist, ob die benötigte hohe Testfrequenz und Befolgsrate kurzfristig zur Verfügung stehen, muss die Gesamtstrategie von weiteren Maßnahmen flankiert werden. (Die obigen Resultate starten mit einem Basisfall, bei dem das Aktivitätsniveau auf 76% ist. Eine Reduktion auf 67% ist zwar schwierig zu erreichen (es entspräche dem Niveau im Januar 2021), würde aber R um 0,15 absenken.)



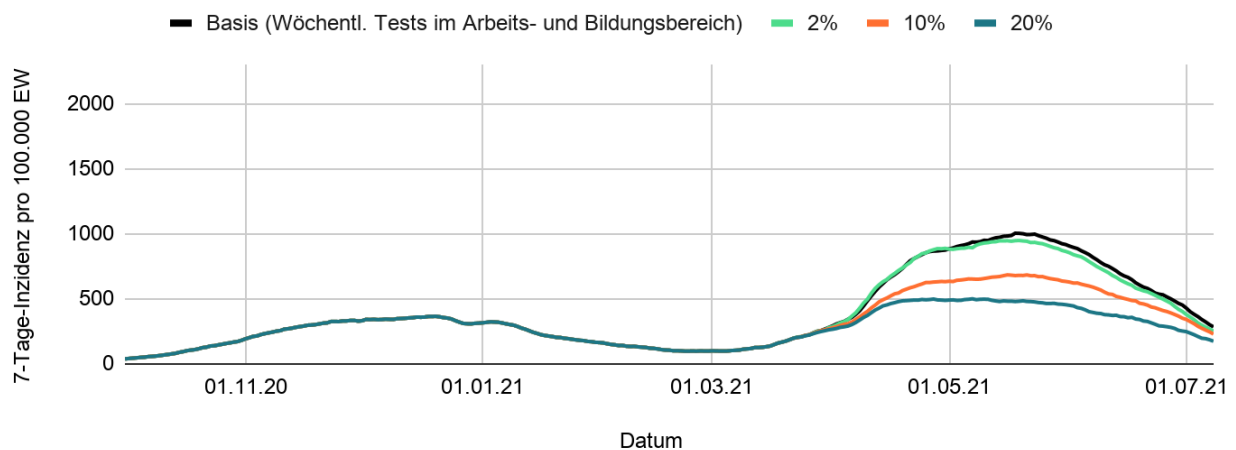


**b) Teststrategie: Tests im Arbeitsbereich (zusätzlich zu wöchentlichen Tests im Bildungsbereich)**

Grün: Ein Test pro Woche für alle Personen mit Arbeitsaktivitäten  
(insgesamt ca. 1.800.000 Tests / Woche)

Orange: Zwei Tests pro Woche für alle Personen mit Arbeitsaktivitäten  
(insgesamt ca. 3.100.000 Tests / Woche)

Blau: Drei Tests pro Woche für alle Personen mit Arbeitsaktivitäten  
(insgesamt ca. 4.400.000 Tests / Woche)



**c) Teststrategie: Tests im Freizeitbereich (zusätzlich zu wöchentlichen Tests im Bildungs- und Arbeitsbereich)**

Grün: Täglich werden 2% der Personen mit Freizeitaktivitäten getestet  
(insgesamt ca. 1.900.000 Tests / Woche)

Orange: Täglich werden 10% der Personen mit Freizeitaktivitäten getestet  
(insgesamt ca. 2.600.000 Tests / Woche)

Blau: Täglich werden 20% der Personen mit Freizeitaktivitäten getestet  
(insgesamt ca. 3.400.000 Tests / Woche)

Abbildung 2: Simulationsergebnisse für verschiedene Teststrategien inkl. der Anzahl der benötigten Testkapazitäten. Alle Simulationen mit weiteren Strategien sind hier abrufbar: <https://covid-sim.info/2021-03-19/testing>. Die Werte, also auch die benötigten Tests pro Woche, beziehen sich auf Berlin.



# Erweiterung des mathematischen Modells: Interaktionen zwischen verschiedenen Regionen

Der grundsätzliche Fokus dieses Projektes ist die Modellierung und Simulation des Infektionsgeschehens in Berlin. Natürlich ist Berlin keine von der Umgebung isolierte Stadt, sondern es findet Austausch zwischen der Berliner Bevölkerung und dem Rest der Welt statt. Bisher haben wir diesen Austausch nur in die Berliner Richtung betrachtet und die von außen "importierten" Fälle in das Berliner Infektionsgeschehen mit einberechnet. Im Folgenden stellen wir eine Erweiterung unseres mathematischen Modells vor, das den "Import" und - neu - auch den "Export" beinhaltet. Konkret betrachten wir dazu die drei Städte Berlin, Hamburg und München und zeigen, wie sich das Infektionsgeschehen in diesen drei Städten gegenseitig beeinflusst, wenn die Bewohner hin und her pendeln (oder reisen). Die Modellierung basiert auf dem aktuellen tatsächlichen Infektionsgeschehen der Städte.

Unter "Import" verstehen wir entweder: (1) eine bisher nicht-infizierte Person infiziert sich in einer anderen Stadt und kehrt dann zurück oder (2) eine infizierte Person reist aus einer anderen Stadt ein. In beiden Fällen infiziert diese Person dann weitere Personen. Ein "Export" findet dann statt, wenn eine infizierte Person in eine andere Stadt reist und dort weitere Personen infiziert.

Mit diesem Modell wollen wir zeigen, wie die Infektionsdynamik in einer Stadt durch jene in den anderen beiden Städten beeinflusst wird. Beispielsweise könnte man annehmen, dass in Berlin eine Strategie gefahren wird, die eine möglichst geringe Zahl von Infektionen zum Ziel hat. Auch wenn dieses Ziel prinzipiell erreicht wird, wird es offensichtlich durch "Infektions-Importe" aus anderen Städten wieder zunichte gemacht.

## Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, wie sich das Infektionsgeschehen in verschiedenen Regionen (hier: Städten) gegenseitig beeinflusst, wenn Reisen zwischen den Gebieten unkontrolliert stattfinden können. Selbst wenn es Gebiete mit sehr niedrigen Fallzahlen gibt, werden diese durch den Import von Infektionen aus anderen Gebieten mit hohen Fallzahlen ebenfalls relativ schnell wieder zu Gebieten mit hohen Fallzahlen.

Mechanismen wie die sog. "Notbremse", die bei einer hohen Inzidenz greift, werden - ausgehend von unserem Modell - einen Jo-Jo-Effekt nach sich ziehen.

## Modellannahmen

Für unsere Modellierung haben wir die folgende Skalierung gewählt: wenn 100 Personen von Berlin nach Hamburg reisen, ist der Anteil der infizierten Personen dabei genauso hoch, wie der Anteil in der Gesamtbevölkerung Berlins zu diesem Zeitpunkt.

Wir nehmen weiterhin an, dass die Städte zwischen zwei Strategien wählen können: "starke Einschränkung" und "normale Einschränkung". Wählt eine Stadt die "normalen Einschränkungen", nehmen wir im Modell an - ausgehend von den realen Infektionszahlen - dass ein R-Wert von unter 1 erreicht wurde und beibehalten wird. Wählt eine Stadt die "starke Einschränkung", passiert folgendes:

- Das öffentliche Leben wird ab März stark eingeschränkt. Im Modell setzen wir die Neu-Infektionsrate auf knapp über Null. Dies führt dazu, dass die Anzahl der Infizierten sehr schnell sehr stark sinkt und in kürzester Zeit keine Infizierten mehr zu finden sind.
- Ab Juni werden dann alle Maßnahmen aufgehoben (die Infektionsrate wird im Modell auf einen sehr hohen Wert gesetzt). Dadurch steigen die Infektionszahlen aber nicht, da es in der Stadt keine Infizierten mehr gibt.

- Bei steigenden Infektionszahlen (bzw. ab 5 Infizierten) wird das öffentliche Leben erneut wieder so stark eingeschränkt wie am Anfang. Dieser Zustand wird dann aufgehoben, wenn die Zahl der Infizierten wieder unter einem Schwellenwert von 5 liegt. Dieses wird alle 10 Tage getestet.
- Wenn die starken Einschränkungen gelten, finden keine Ein- oder Ausreisen in dieser Stadt statt.

## Szenarien

Im folgenden zeigen wir drei verschiedene Szenarien, mit denen wir die “gegenseitige Beeinflussung” exemplarisch darstellen.

Szenario 1: Alle drei Städte wählen die “starke Einschränkungs” Strategie.

Ab Juni reisen jeweils 100 Personen von einer Stadt in jede andere. Abbildung 3 zeigt die Anzahl der infizierten Personen über die Zeit in den drei Modellstädten Berlin, Hamburg und München. Man sieht, dass nach kürzester Zeit die Zahl der Infektionen bei Null liegt. Im Juni werden die Beschränkungen komplett aufgehoben, das hat aber keine Konsequenzen für das Infektionsgeschehen, da in den Städten keine Infektionen mehr vorliegen.

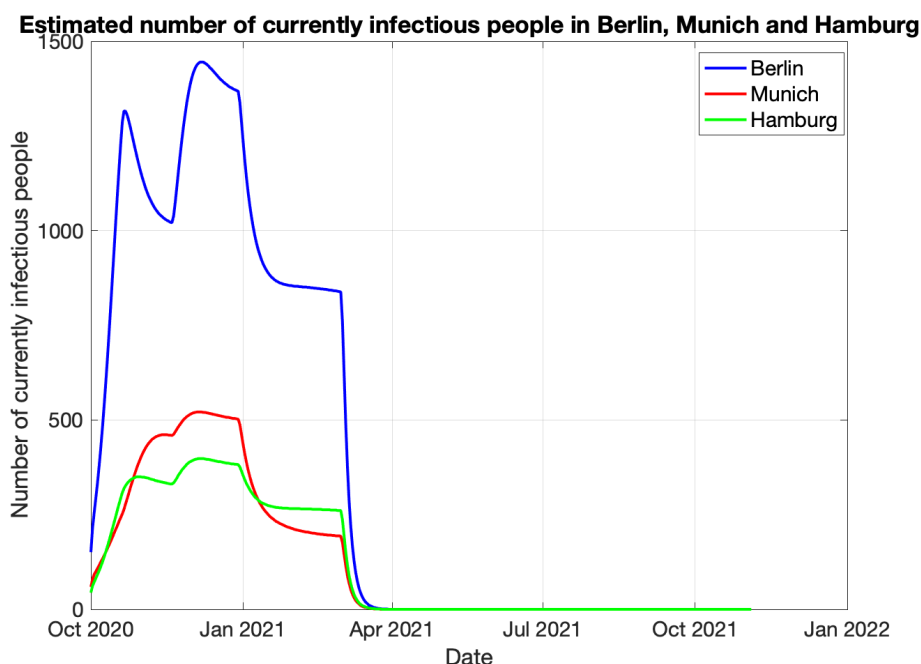


Abbildung 3: Die Anzahl der infizierten Personen in den drei Modellstädten über die Zeit. Alle drei Städte haben eine Strategie mit sehr starken Einschränkungen gewählt. Dadurch sinken die Fallzahlen sehr schnell auf Null.

Szenario 2: Alle drei Städte wählen die Strategie der “normalen Einschränkungen”.

Abbildung 4 zeigt wieder die Anzahl der infizierten Personen über die Zeit. Wir betrachten zwei Fälle: im ersten Fall ist die Pendelei ab Juni erlaubt (wieder 100 Pendler pro Tag von jeder Stadt in jede Stadt). Im zweiten Fall darf niemand pendeln. Man sieht, dass sich die Infektionszahlen zwischen den beiden Fällen nicht unterscheiden. Dies bedeutet, dass Reisen zwischen Regionen, die ähnliches Infektionsgeschehen haben (man bedenke, dass Berlin zwar höhere Infektionszahlen, aber auch deutlich mehr Einwohner hat als München und Hamburg), zu keinerlei negativer Auswirkung auf die Inzidenz führt.

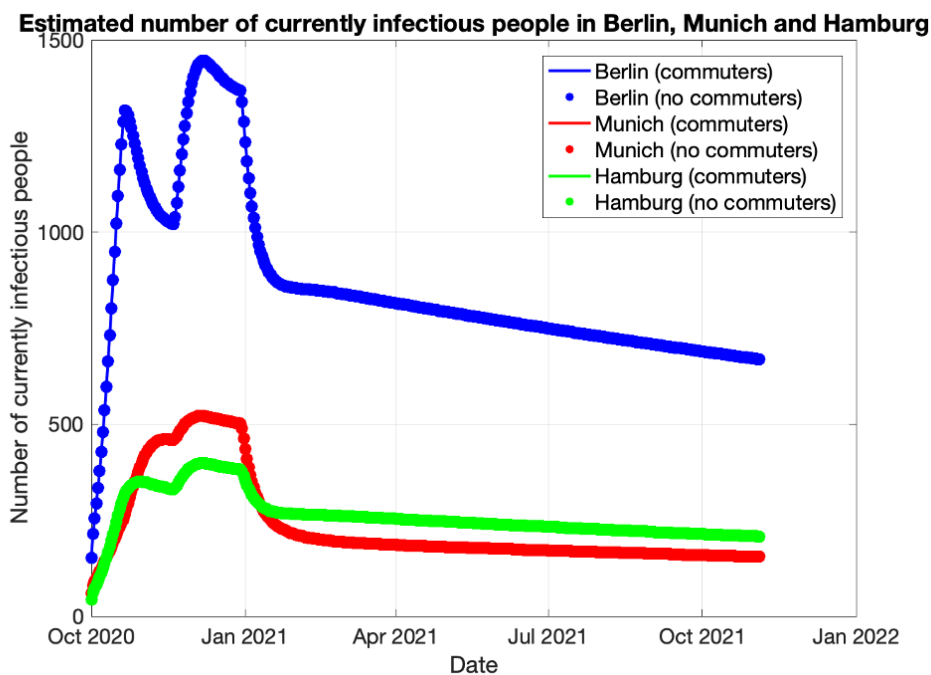


Abbildung 4: Die Anzahl der infizierten Personen in den drei Modellstädten über die Zeit. Alle drei Städte haben eine Strategie mit normalen Einschränkungen gewählt. Dadurch sinken die Fallzahlen leicht. Die Linie zeigt den Fall, dass 100 Menschen am Tag von jeder in jede Stadt pendeln. Die Punkte zeigen dagegen den Fall, wenn Pendelei unterbunden ist.

Szenario 3: Zwei Städte wählen die Strategie der “starken Einschränkungen”, eine Stadt wählt “normale Einschränkung”.

Hier nehmen wir an, dass Hamburg und München die Strategie der “starken Einschränkungen” wählen, Berlin allerdings nicht. Reisen zwischen den Städten sind weiterhin möglich.

In diesem Szenario haben wir folgende Frage gestellt: wie lange dauert es, bis das (auf Null gesunkene) Infektionsgeschehen in Hamburg und München von dem vergleichsweise hohen Infektionsgeschehen in Berlin beeinflusst wird? Konkret verstehen wir unter “beeinflusst”, dass die Infektionszahlen von 0 auf mindestens 5 steigen.

Abbildung 6 zeigt die Antwort auf diese Frage in Abhängigkeit von der Anzahl der Pendler (hin und her) pro Tag. Man sieht, dass dieser Zeitraum bei nur einem Pendler pro Tag ca. 70 Tage beträgt (rote Kurve). Das Infektionsgeschehen, das danach in München und Hamburg herrscht, ist in Abbildung 5 dargestellt. Bei 100 Pendlern pro Tag sind es nur 30 Tage, bis in Hamburg und München das Infektionsgeschehen wieder aufflammt. Wenn die Pendler nur nach Berlin (und wieder zurück) fahren, aber keine Berliner nach Hamburg und München hereingelassen werden, verlängert sich der Zeitraum um ca. 10 Tage (blaue Kurve).

**Estimated number of currently infectious people in Berlin, Munich and Hamburg**

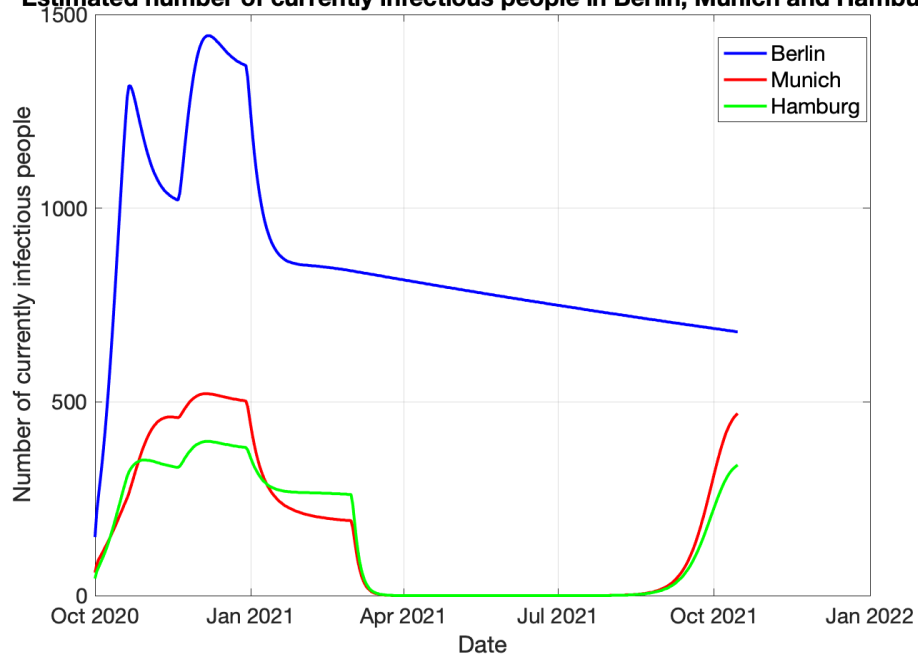


Abbildung 5: Die Anzahl Infektiöser in Berlin, München und Hamburg, wenn ab Juni die folgenden Pendeleien pro Tag erlaubt sind: 1 Pendler jeweils von München und Hamburg nach Berlin, 100 Pendler zwischen Hamburg und München. Man erkennt, wie die Pendler aus Berlin das Infektionsgeschehen in München und Hamburg nach einer gewissen Zeit stark beeinflusst.

**Number of days until lockdown has to be imposed in Hamburg and Munich**

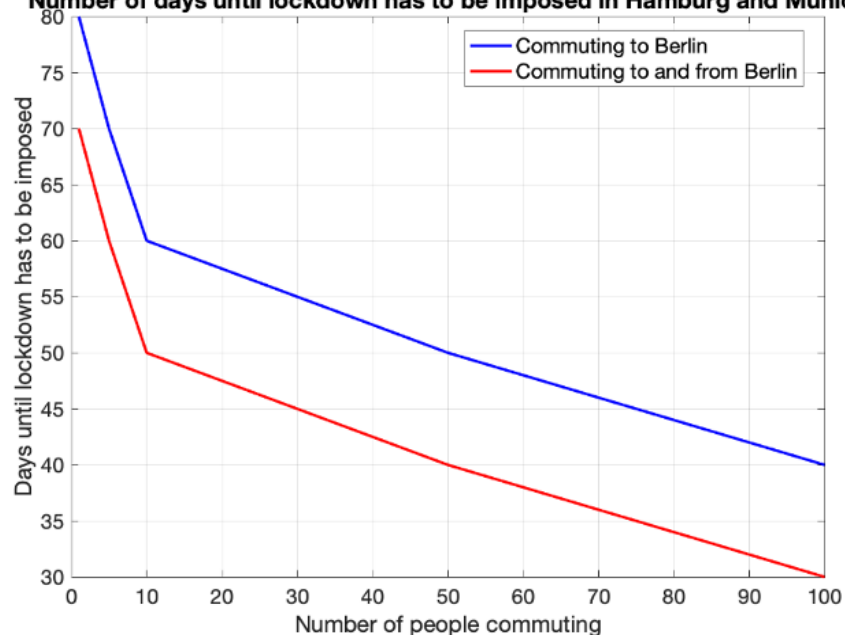


Abbildung 6: Die Anzahl an Tagen, bis (im Durchschnitt) ein Lockdown in den Städten mit "starken Einschränkungen" verhängt werden muss, gemessen an der Anzahl Pendler (1) nach und (2) nach und von Berlin. Wenn Pendelei in beide Richtungen möglich ist, verringert sich der Zeitraum bis zum ersten Lockdown seit Beginn der Pendelei um 10 Tage.

Durch gekoppelte Infektionsdynamiken und die “Notbremse” entsteht ein “Jo-Jo Effekt”

Abschließend haben wir uns die Frage gestellt, was in dem 3. Szenario auf längere Sicht passiert, wenn die Städte mit den “starken Einschränkungen” bei steigenden Infektionsfällen das öffentliche Leben erneut sehr stark einschränken und dadurch die Infektionszahlen wieder stark sinken. Wenn die Zahl der Infizierten dann wieder niedrig genug ist, kann wieder stark gelockert werden. Und so weiter. Dieses Vorgehen ist der im Moment geplanten sog. “Notbremse” nachempfunden, die regional bei einer bestimmten Inzidenz gilt und zu starken Einschränkungen führen soll - bis die Fallzahlen wieder niedrig genug sind.

Das Szenario lautet also wie vorher: Hamburg und München wählen die Strategie der “starken Einschränkungen”, Berlin nicht. Reisen zwischen den Städten sind ab Juni möglich. Wenn in Hamburg oder München 5 oder mehr Personen infiziert sind, wird das öffentliche Leben so stark heruntergefahren, dass die die Infektionsrate nahe 0 liegt. Wenn die Anzahl der Infizierten Personen wieder unter 5 sinkt, werden diese Einschränkungen wieder aufgehoben.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis: mit Beginn der Pendelei im Juni steigen die Infektionszahlen in München und Hamburg von vorher 0 wieder langsam. Alle zehn Tage wird überprüft, ob in München oder Hamburg mehr als 5 Personen infiziert sind. Wenn dies der Fall ist, werden die “starken Einschränkungen” wieder in Kraft gesetzt und die Zahlen fallen wieder.

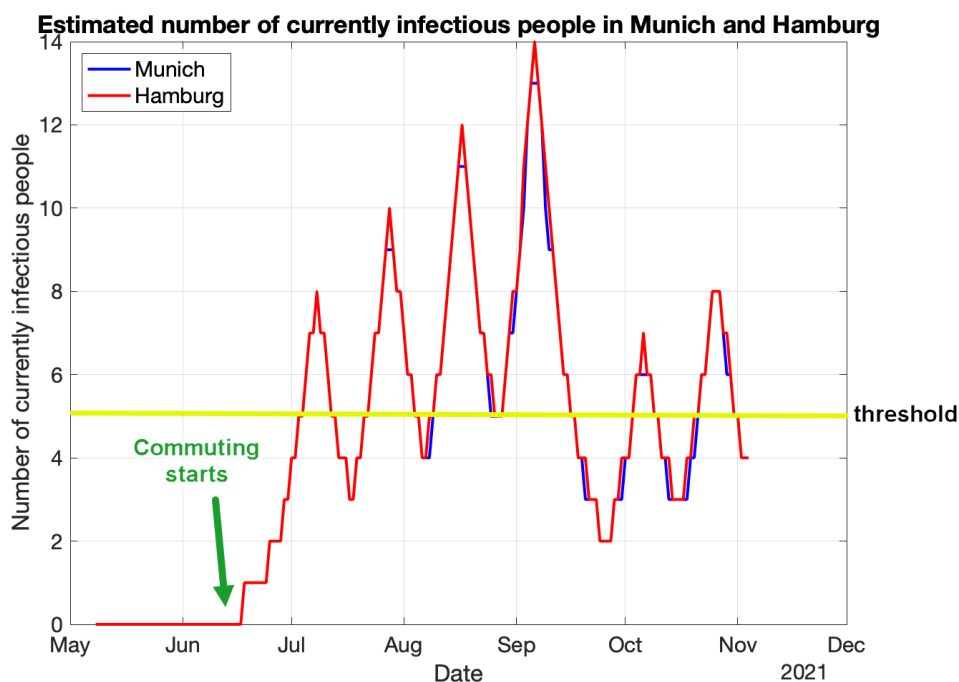


Abbildung 7: Die Anzahl der infizierten Personen in München und Hamburg über die Zeit.

Hier ist gut zu sehen, dass es zu einem “Auf-und-Zu” der Maßnahmen kommt. Außerdem sieht man, dass die Infektionszahlen mit dem zweiten Lockdown des August zwar sinken, aber nur knapp unter den Schwellenwert von 5. Dadurch kommt es kurz darauf zu einer so hohen Anzahl an Infektiösen in beiden Städten, dass der darauffolgende Lockdown doppelt so lang wie die vorherigen sein muss, um die Zahlen wieder unterhalb des Schwellenwertes zu bringen. Dann beginnt das Spiel von neuem.

Im Modell erreichen wir das dadurch, dass wir die stadt-spezifischen Infektionsraten verändern (siehe Abbildung 8). Hier bedeutet eine Infektionsrate (kE) von 0.5 eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Person infiziert. Diese wird in der Realität etwa dadurch erreicht, dass Kontakte zwischen Personen drastisch eingeschränkt werden. Eine Infektionsrate von 1.5 bedeutet hingegen eine hohe Wahrscheinlichkeit sich zu infizieren, da z.B. alle Kontaktbeschränkungen aufgehoben sind. Der sägezahn-ähnliche Verlauf der resultierenden

Kurve in Abbildung 9 lässt sich also so interpretieren, dass sich "harte Einschränkungen" (Kurve ist auf dem 0.5 Niveau) mit einem Zustand mit keinen Einschränkungen (Kurve ist auf dem 1.5 Niveau) wie bei einem Jo-Jo abwechseln. Hier lässt sich auch die Dauer der "harten Einschränkungen" gut erkennen: im September dauern diese etwa doppelt so lange wie vorher.

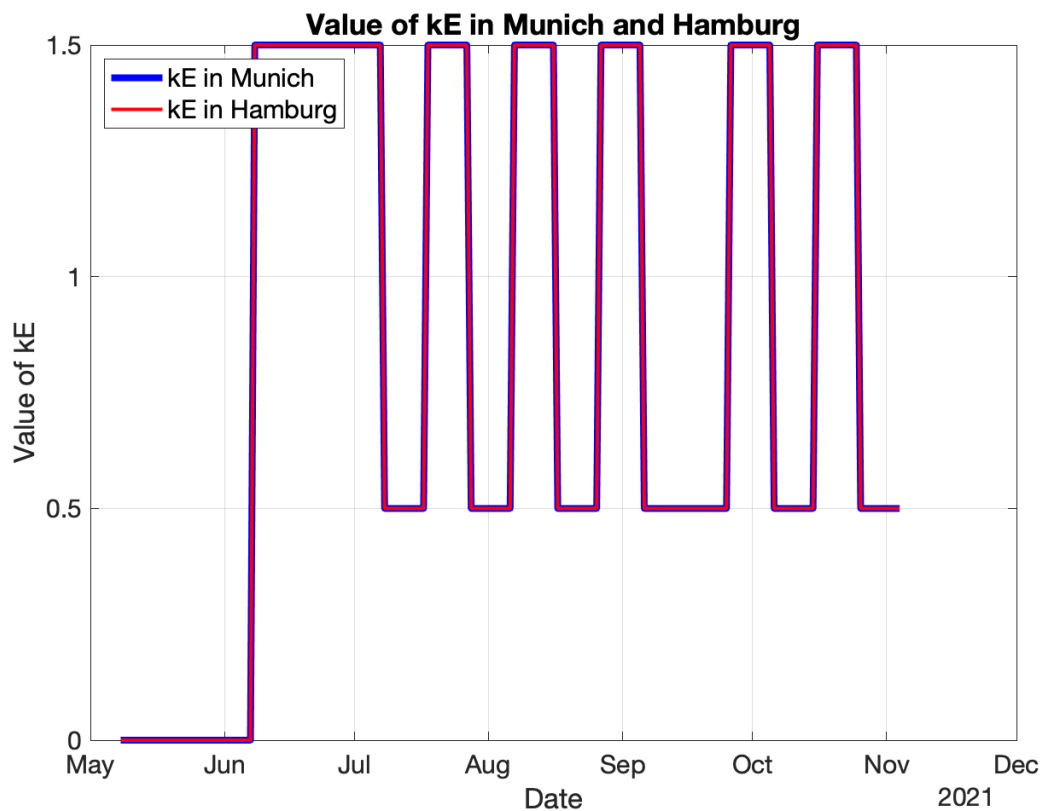


Abbildung 8: Änderung der Infektionsraten in München und Hamburg bei einer Strategie mit sehr harten Einschränkungen. Alle 10 Tage wird sie entweder hoch- oder herabgesetzt. Dieser Jo-Jo-Effekt entsteht durch Pendelei bzw. den Import von infizierten Personen.

# Anhang

## Mobilitätsdaten

Laut unseren Mobilitätsdaten (vgl. Abb. 9), die wir für Berlin auswerten, sind folgende Entwicklungen erkennbar:

- An den *Wochentagen* ist die aushäusig verbrachte Zeit Mitte Februar angestiegen, von ca. 5¼ h auf knapp 6h pro Tag und Person. Dies führt in der Simulation zu einer Erhöhung des R-Wertes um 0,2 Punkte. – Allerdings hat sich dieser Trend nicht verstetigt, eher ist ein leichter Rückgang auf 5¾ h pro Tag und Person festzustellen. Es lässt sich spekulieren, dass der Bevölkerung der Ernst der Situation inzwischen deutlich geworden ist.
- Auch an den *Wochenenden* sieht man Schwankungen von Wochenende zu Wochenende, die mit dem Wetter korrelieren: An Wochenenden mit gutem Wetter gibt es mehr Aktivität. Mitte Februar sieht man zusätzlich eine generelle Bewegung nach oben; hier würden wir zunehmende Besuchsaktivität vermuten.

### Durchschnittliche Dauer aushäusiger Aktivitäten Berlin

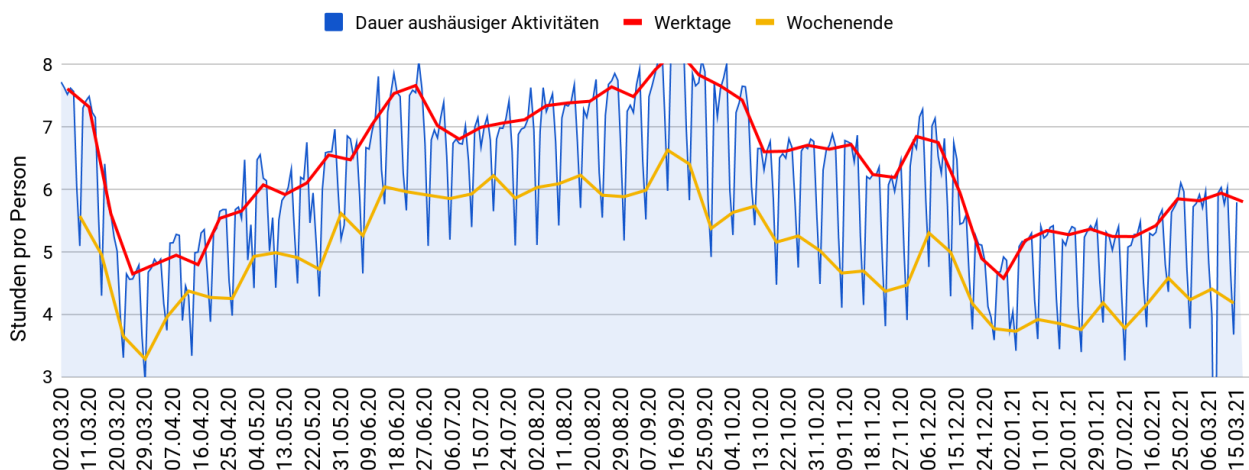


Abbildung 9: Durchschnittliche Dauer der aushäusigen Aktivitäten in Berlin; ermittelt aus anonymisierten Mobilfunkdaten. Quelle: (Senozon 2021)

## Tabelle der Beiträge zum R-Wert

Mit unseren Modellierungen können wir abschätzen, in welchem Ausmaß einzelne Aktivitäten in den unterschiedlichen Bereichen des alltäglichen Lebens (wie Schule, Arbeit und Freizeit) zur Reproduktionszahl (R-Wert) beitragen und in welchem Ausmaß bestimmte Gegenmaßnahmen das Infektionsgeschehen eindämmen. Der Beitrag einzelner Aktivitäten zum R-Wert sowie der Effekt von bestimmten Infektionsschutzmaßnahmen sind für die vorherrschende Virus-Mutation B.1.1.7 in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt. Dabei wird die Wirkung von Schnelltests vor bestimmten Aktivitäten nicht ausgewiesen, da deren Durchführung auch Einfluss auf den Beitrag anderer Aktivitäten hat. Lesebeispiel: Eine vollständige Schulöffnung ohne Masken und Wechselunterricht würde R um 0,3 erhöhen.

Zu beachten ist dabei, dass bereits ein erheblicher Anteil am R-Wert durch weitgehend unvermeidliche Ansteckungen in den Haushalten entsteht. Bei der Virus-Mutation B.1.1.7 trägt dieser Anteil 0,5 zum R-Wert bei. Das bedeutet, dass nur 0,5 für die weiteren Bereiche "übrig bleiben", um den R-Wert unter 1 zu halten.

	Beitrag zu R (B117)
<b>(Unvermeidbare) Übertragungen im eigenen Haushalt</b>	<b>0,50</b>
<b>Arbeit</b>	
... <b>ohne Schutzmaßnahmen</b> (also ohne Homeoffice, Maskenpflicht und Einzelbüros) <sup>†</sup>	<b>0,30</b>
... mit Pflicht zu FFP2-Masken oder Einzelbüros oder Homeoffice <sup>‡</sup>	0,03
<b>Schulen<sup>††</sup></b>	
... <b>ohne Schutzmaßnahmen</b> (also ohne Maskenpflicht im Unterricht und ohne Wechselunterricht)	<b>0,30</b>
... mit FFP2-Maskenpflicht während des Unterrichts und mit Wechselunterricht <sup>*</sup>	< 0,01
<b>Einzelhandel</b>	
... <b>ohne Schutzmaßnahmen</b> (also insbes. ohne Maskenpflicht)	<b>0,10</b>
... mit FFP2-Maskenpflicht	< 0,01
<b>Gastronomie</b>	
... <b>innen ohne Schutzmaßnahmen</b>	<b>0,50</b>
... innen mit halber Gästezahl (Maskenpflicht nicht sinnvoll möglich)	0,13
... <b>im Außenbereich</b>	0,05
<b>Private Besuche / Treffen / Feiern</b>	
<b>Besuche / Treffen innen (Winter) ohne Schutzmaßnahmen</b>	<b>0,25</b>
<b>Besuche / Treffen innen mit FFP2-Masken<sup>††</sup></b>	0,03
<b>Besuche / Treffen im Außenbereich (Sommer)</b>	0,03
<b>Feiern innen ohne Schutzmaßnahmen</b>	<b>0,25</b>
<b>Besuche / Treffen innen (Winter) ohne Schutzmaßnahmen, wenn Restaurants geschlossen und Feiern verboten <sup>**</sup></b>	<b>0,60</b>
<b>Veranstaltungen</b>	
... Museen und Streichkonzerte mit durchgehender FFP2-Maskenpflicht	< 0,01
... in großen Räumlichkeiten mit „ausgedünnter“ Teilnehmerzahl	unklar
... <b>im Außenbereich</b>	< 0,01
<b>Öffentlicher Verkehr</b>	
... <b>ohne Schutzmaßnahmen</b> (also ohne Maskenpflicht) / normale Auslastung	<b>0,20</b>
... mit FFP2-Maskenpflicht bei derzeitiger Auslastung	0,02

Tabelle 1: Beiträge verschiedener aushäusiger Aktivitäten zur Reproduktionszahl R ohne und mit Mutation B.1.1.7.; **rot: ohne Infektionsschutzmaßnahmen; blau: mit FFP2-Masken; orange: draußen.** Schnelltests sind in dieser Tabelle nicht ausgewiesen, da Schnelltests vor einem bestimmten Aktivitätentyp auch Reduktionen der Ansteckungen in anderen Aktivitätentypen zur Folge hat, und dies nicht auf einfache Weise darstellbar ist.



† Wir gehen in unserem Modell davon aus, dass pro Arbeitnehmer\*in 10 Quadratmeter Bürofläche vorhanden sind. Je kleiner diese Fläche pro Person ist, desto wahrscheinlicher ist eine Ansteckung am Arbeitsplatz.

‡ Wichtig ist hier, dass bei mehr als einer Person pro Raum die FFP2-Maske zwingend auch am Arbeitsplatz getragen werden muss. Nur so sinkt der Beitrag zu R im Arbeitsumfeld auf nahezu 0. In der Simulation gehen wir davon aus, dass dies 90% der Arbeitnehmer\*innen tun.

‡‡ Bei Schulschließungen kommt laut Diskussionen in der Wissenschaft (Brauner et al. 2020) hinzu, dass Schulschließungen Signalwirkung haben sowie Eltern zu Hause binden, und somit über die hier ausgewiesene Zahl hinaus weitere Wirkung haben.

\* In dieser Simulation gehen wir davon aus, dass 90% der Kinder eine FFP2-Maske tragen und jedes Kind nur an jedem zweiten Tag kommt. Es befindet sich also jeweils nur die Hälfte der Klasse in einem Klassenraum.

\*\* Wenn Restaurants geschlossen und private Feiern verboten sind, dann erhöht sich der Beitrag der privaten Besuche.

†† Die FFP2-Maske müsste in diesem Fall über die gesamte Besuchszeit von allen anwesenden Personen getragen werden (also auch von den besuchten Personen).

---

Unsere Resultate lassen sich mit der RKI "Toolbox zum Stufenkonzept" vergleichen (vgl. RKI 2021). Über das RKI-Konzept hinausgehend weisen wir Zahlen bzgl. der Wirkung von Maßnahmen aus, sowie die Wirkung von Schutzmaßnahmen. Generell gibt es eine große Übereinstimmung. Unterschiede ergeben sich in folgenden Bereichen:

- Bei vielen der Einstufungen kommen wir nur dann zu ähnlichen Einschätzungen wie das RKI, wenn durchgehende Maskenpflicht in Innenräumen vermutet wird. Dies gilt in der RKI-Kategorie "niedrig" für Fernverkehr, Einzelhandel, Friseur etc., Theater etc., religiöse Zusammenkünfte etc., sowie in der RKI-Kategorie "moderat" für religiöse Zusammenkünfte, Schulen, und ÖPNV.
- Aus dem gleichen Grund wären wir bei "(Innen-)Gastronomie" skeptischer als das RKI: Da während des Essens natürlich keine Masken getragen werden können, halten wir diese für kritischer als das RKI. **Wir halten es für zielführender, die Gastronomie für die warme Jahreszeit gleich auf den Außenbereich zu orientieren.**

## Quellen

- Brauner, Jan Markus, Sören Mindermann, Mrinank Sharma, Anna B. Stephenson, Tomáš Gavenčiak, David Johnston, John Salvatier, et al. 2020. "The Effectiveness and Perceived Burden of Nonpharmaceutical Interventions against COVID-19 Transmission: A Modelling Study with 41 Countries." *Epidemiology*. medRxiv.  
<https://doi.org/10.1101/2020.05.28.20116129>.
- Müller, Sebastian Alexander, Ricardo Ewert, and Kai Nagel. 2021. "Auswirkungen der SARS-CoV-2- Arbeitsschutzverordnung auf Arbeitsaktivitäten." Technische Universität Berlin.  
<https://doi.org/10.14279/depositonce-11673>.
- RKI. 2021. "ControlCOVID: Strategie Und Handreichung Zur Entwicklung von Stufenkonzepten Bis Frühjahr 2021."  
[https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges\\_Coronavirus/Downloads/Stufenplan.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Downloads/Stufenplan.pdf?__blob=publicationFile).
- Senozon. 2021. "The Senozon Mobility Model." The Senozon Mobility Model. 2021.  
<https://senozon.com/en/model/>.