

MODUS-COVID Bericht vom 26.02.2021

Sebastian Alexander Müller¹, William Charlton¹, Natasa Djurdjevac Conrad², Ricardo Ewert¹, Christian Rakow¹, Hanna Wulkow², Lukas Vorwerk³, Tim Conrad², Kai Nagel¹, Christof Schütte²

¹Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik ("VSP"), TU Berlin

nagel@vsp.tu-berlin.de

²Zuse-Inst. Berlin ("ZIB")

³Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik ("WIP"), TU Berlin

Available via TU Berlin repository: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-11486>

Date of this version: 26-february-2021

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 26.02.2021:

Zusammenfassung

Der schnelle Anstieg des Anteils der Mutation B.1.1.7 an den Infektionen lässt sich mit unserem Modell nur zur Deckung bringen, wenn wir eine deutlich höhere Übertragbarkeit als bisher annehmen (100% mehr statt der bisher angenommenen 30-70%). Im Vergleich zum letzten Bericht führt dies zu einer deutlich problematischeren Situation, mit der Vorhersage, dass ab Anfang März B.1.1.7 dominant sein wird, und selbst bei Beibehaltung der derzeitigen Maßnahmen eine 3. Welle folgen wird.

Um diese 3. Welle zu vermeiden und dennoch ohne weitere Verschärfung der Maßnahmen auszukommen, untersuchen wir den breiten Einsatz von Schnelltests. Das generelle Resultat ist, dass ein breiter Einsatz von Schnelltests sehr stark infektions-reduzierende Wirkung hat, und daher sogar bei B.1.1.7 mit leichten Lockerungen kombiniert werden kann, solange diese gezielt ausgewählt werden. Wie immer machen wir quantitative Vorhersagen für differenzierte Strategie-Bausteine. Eine zentrale Merkregel für die Anwendung dieser Bausteine wäre, dass Kontakte in Innenräumen mit Personen außerhalb des eigenen Haushaltes nur mit Schutzmaßnahmen stattfinden sollten.

Für bis auf weiteres nicht verantwortbar halten wir die Öffnung der Innengastronomie (einschl. Bars/Kneipen/etc.): Hier ist die Kombination aus räumlicher Enge, lautem Sprechen, nicht möglicher Maskenpflicht wg. Verzehr von Speisen/Getränken sowie relativ langer Aufenthaltsdauer derart ungünstig, dass ihre Öffnung eine sehr deutliche Zunahme der Infektionsdynamik zur Folge hätte. Wir empfehlen stattdessen die Orientierung auf die deutlich weniger problematische Außengastronomie. Dies würde auch die Forderung nach Planbarkeit erfüllen.

Wir simulieren Stufenpläne, die sich an Inzidenz-Schwellwerten orientieren. Wie aus theoretischer Sicht zu erwarten, führt dies zu einer Abfolge von Öffnungen und Schließungen. Eine Alternative wäre es, die Öffnungen gleich so zu gestalten, dass die Reinfektionsrate R dauerhaft unter 1 bleibt. Der breite Einsatz der o.g. Schnelltests wäre hierfür ein wesentliches Werkzeug.

Unser mathematisches Modell wurde so weiterentwickelt, dass es nun sogenannte Pareto-optimale Lösungen berechnen kann. Das sind Lösungen, bei denen sich eines der Zielkriterien (z.B. Reduktion der Infektionen) nur zu Lasten eines anderen (z.B. Reduktion der sozio-ökonomischen Schäden) verbessern lässt. Dies beschreibt somit die Abwägungen, die zwischen verschiedenen Optionen bestehen.

1 Mobilitätsdaten

Laut unseren Mobilitätsdaten (Abb. 1) ist seit Jahresbeginn kein signifikanter Anstieg der Mobilität in Berlin zu beobachten. Im Vergleich zu November 2020 hält sich eine Person durchschnittlich weiterhin deutlich weniger außerhalb der eigenen Wohnung auf. Dies ist positiv zu sehen, gerade im Vergleich zum Frühjahr 2020: damals stieg die Mobilität (im Sinne der Dauer der außerhalb der Wohnung Aktivitäten) nach dem Minimum im März schnell wieder kontinuierlich an.

Eine Ausnahme stellen die letzten beiden Wochenenden dar, an denen eine leichte Zunahme stattgefunden hat (vgl. grüne Linie). Wir vermuten die Ursache hierfür in dem außergewöhnlich guten Wetter zu dieser Zeit. Die Aktivitäten haben dabei vermutlich weitgehend draußen stattgefunden, daher halten wir dies bzgl. des Infektionsgeschehens insgesamt für unkritisch.

Durchschnittliche Dauer aushäusiger Aktivitäten Berlin

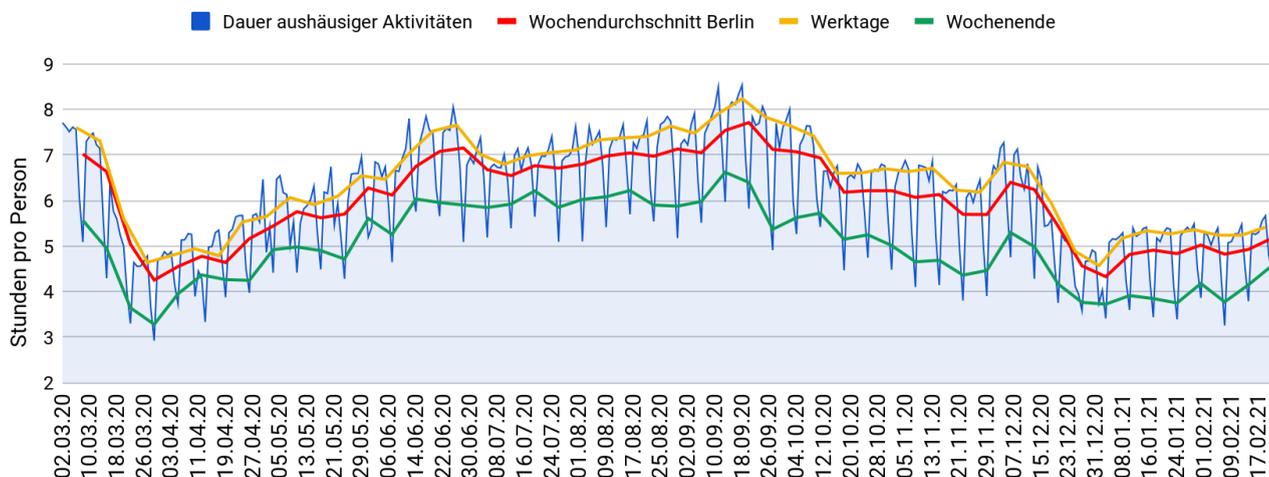


Abbildung 1: Durchschnittliche Dauer der aushäusigen Aktivitäten in Berlin; ermittelt aus anonymisierten Mobilfunkdaten. Quelle: (Senozon 2021)

2 Aktuelle Lage und Dynamik der B.1.1.7-Mutation in unserer Modellierung

Die aktuellen vorliegenden Sequenzierungsdaten zur Ausbreitung der Corona-Virus Mutation B.1.1.7 (vgl. RKI 2021a) legen nahe, dass sich diese Variante schnell in Deutschland ausbreitet. Wenn man diese Zahlen mit unserem Modell vergleicht, können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. **B.1.1.7 wird bereits Anfang März die dominierende Rolle auch bei den absoluten Fallzahlen übernehmen.** Die Dynamik der Pandemie wird bald nur noch von der B.1.1.7 Variante bestimmt werden. Dieses deutet sich bereits jetzt durch die nicht mehr weiter abnehmenden Fallzahlen an. Die bisherigen Varianten werden im weiteren Verlauf keine signifikante Rolle mehr spielen (vgl. Abb. 2).
2. In unserem Modell lässt sich die aktuelle (tatsächliche) Ausbreitungsdynamik der B.1.1.7 Mutation nur dann erreichen, wenn wir eine **deutlich höhere Übertragbarkeit der B.1.1.7 Variante (ca. 100%) annehmen, als bisher vermutet (ca. 35-70%).**¹ Diese Ergebnisse legen nahe, dass viele der bisherigen Analysen und Prognoserechner die Übertragbarkeit, die von B.1.1.7 ausgeht, deutlich unterschätzen (vgl. Zeit Online 2020; Lelieveld et al. 2020).² Die erhöhte *Übertragbarkeit* führt auch zu einer erhöhten *Ausbreitungsrate*, die jedoch aufgrund von „Sättigungseffekten“ z.B. innerhalb privater Haushalte) geringer ansteigt als die Übertragbarkeit.

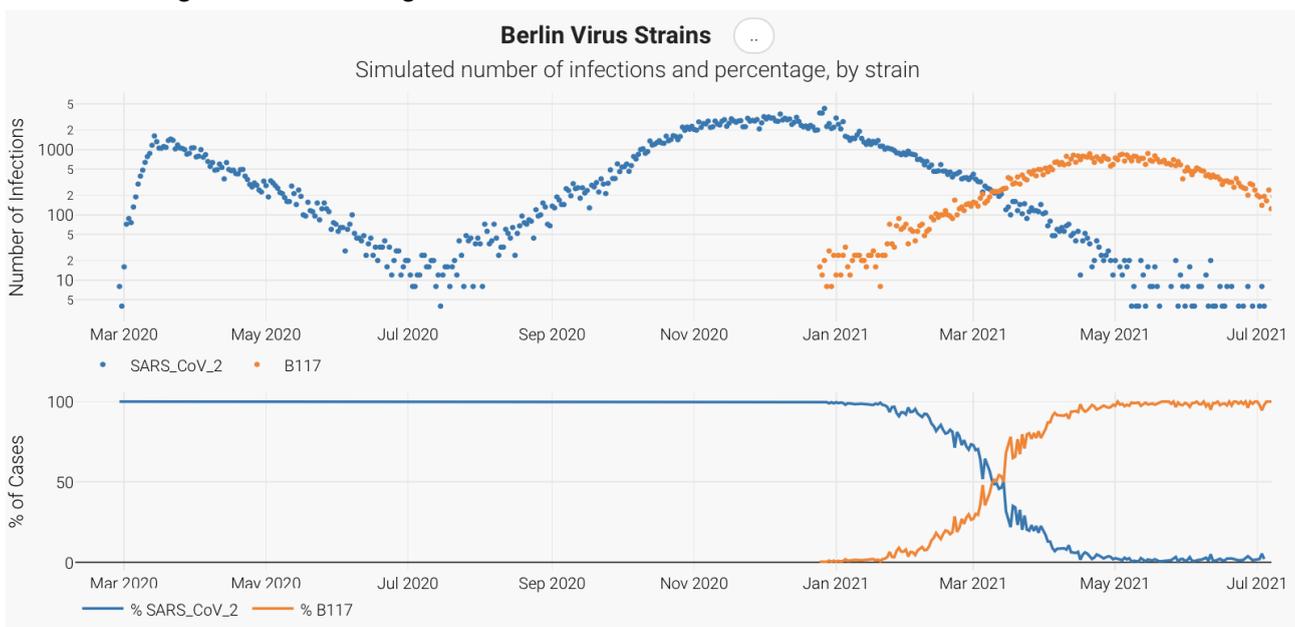


Abbildung 2: Oben: Simulierte tägliche Neuinfektionen für B117 (orange) und die ursprüngliche Variante (blau). Unten: Anteil der jeweiligen Variante an den simulierten Infektionszahlen; vgl.: <https://covid-sim.info/2021-02-23/testing?dailyInitialVaccinations=3000&testingFalseNegative=30%25&outdoorModel=yes>

¹ Dies lässt zunächst offen, ob dies durch eine doppelt so hohe Übertragbarkeit in denselben Situationen, oder durch eine doppelt so lange dauernde Infektiosität, oder eine Kombination aus beidem erreicht wird. Im Modell ist es derzeit ersteres.

² Auch wir waren in unserem Bericht von vor drei Wochen noch von der niedrigeren Übertragbarkeit ausgegangen und hatten damit einhergehend in unserem Bericht vom 5. Februar 2021 die von dieser Mutation ausgehende Dynamik immer noch unterschätzt (vgl. Müller et al. 2021). Ursache dafür war u.a., dass der grundlegende Bericht von (Davies et al. 2020) die Ausdrücke für die Übertragbarkeit und die Ausbreitungsrate z.T. synonym verwendet, was wir zunächst nicht adäquat berücksichtigt hatten.

Der durch B.1.1.7 verursachte - teilweise deutlich - höhere Beitrag verschiedener Aktivitäten zur Reinfektionsrate R (z.B. 0,5 statt 0,4 bei Innengastronomie) wird sehr deutliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Pandemie haben. Die "natürliche" Reinfektionsrate³ R₀ der *alten* Virusvariante beträgt ca. 3 (Robert Koch Institute 2020). Es ist im Januar gelungen, die Reinfektionsrate durch die ergriffenen Maßnahmen auf ca. 0,8 zu drücken, weshalb die hohen Infektionszahlen des Dezembers 2020 inzwischen signifikant gesenkt werden konnten. Mitte Februar hat sich R wieder von 0,8 auf etwa 1 erhöht, was zu gleichbleibenden Infektionszahlen geführt hat. Aktuell deutet sich der Beginn eines erneuten Anstiegs an. **Unser Modell sagt einen deutlichen Anstieg von R aufgrund der B.1.1.7-Mutation und somit eine 3. Welle bei gleichbleibenden Infektionsschutzmaßnahmen vorher (vgl. Abb. 3b).** Wird die Impfkampagne in der bisherigen Geschwindigkeit weitergeführt, wird sie in den kommenden Wochen keinen ausreichend dämpfenden Beitrag auf die Ausbreitung von B.1.1.7 haben. Zwar werden durch den Übergang in die warme Jahreszeit viele Aktivitäten nach draußen verlagert und dadurch die Ausbreitung von B.1.1.7 reduziert, aber auch dies wird erst in späteren Wochen und Monaten - in einem relevanten Ausmaß - helfen.

Um dem entgegenzuwirken und eine 3. Welle von hohem Ausmaß zu vermeiden, ist es erforderlich, dass **noch wirksamere Infektionsschutzmaßnahmen als bislang** von der Politik beschlossen werden. Dies muss nicht unbedingt durch noch härtere Maßnahmen gestaltet werden. Vielmehr sind **intelligent gestaltete Lockerungen durchaus möglich, müssen aber unbedingt mit intelligenteren Bekämpfungsmaßnahmen (als bisher) kombiniert werden.**

Ein besonderes Augenmerk sollte auf das Vermeiden von sog. "Jojo-Lockdowns" gelegt werden. Dafür ist es unbedingt erforderlich, dass der R-Wert grundsätzlich kleiner als eins bleibt – auch wenn die absoluten Fallzahlen niedrig sind. Es ist daher nicht richtig, dass bei niedrigen Infektionszahlen breit geöffnet werden kann, sondern: der Spielraum für Lockerungen ist auch bei niedrigen Infektionszahlen nicht groß. Allerdings leistet bei niedrigen Infektionszahlen die Kontaktnachverfolgung einen Anteil zur Infektionsunterdrückung, so dass die anderen Schutzmaßnahmen zusammengenommen schwächer ausfallen können. Bei zu starken Öffnungen wird sich ansonsten das typische ("Jojo-") Verhalten eines sogenannten Zweipunktreglers ergeben (ähnlich eines Heizungsthermostaten). Wir zeigen dies simulationsbasiert in Abschnitt 5.2. Dieser Bericht enthält Zahlen sowohl zu Öffnungen als auch zu verbesserten Schutzmaßnahmen, aus denen Strategien zusammengestellt werden können, mit deren Hilfe der R-Wert unterhalb von 1 gehalten werden kann.

Wie bekannt, beziehen sich unsere Analysen auf die Infektionssituation in Berlin, lassen sich aber, was die grundsätzlichen Einschätzungen zur Infektionslage und zur Ausgestaltung von Infektionsschutzmaßnahmen angeht, auf die Situation in Deutschland übertragen.

³ Das wäre der R Wert, wenn sich der Virus ohne Restriktionen ausbreiten würde.

3 Mögliche Szenarien zum weiteren Umgang mit der Pandemie-Bekämpfung

Im Rahmen der in der kommenden Woche anstehenden Bund-Länder-Beratungen gibt es aus unserer Sicht vier archetypische Szenarien zum Umgang mit der Pandemie:

1. Leichte Öffnungen (vergleichbar zum Frühjahr 2020)
2. Beibehaltung der jetzigen Restriktionen
3. Verschärfung der Restriktionen
4. "Intelligent lockern + intelligenter bekämpfen"

Im Folgenden beschreiben wir diese vier Szenarien und beurteilen sie auf Basis der von uns dazu durchgeführten Simulationen. Die ersten drei Szenarien beinhalten aktuell und in der Vergangenheit angewendete Maßnahmenpakete; die vierte Handlungsoption "Intelligent lockern + intelligenter bekämpfen" beinhaltet zusätzlich den breiten Einsatz von Schnelltests.

3.1 Szenario I: Leichte Öffnungen (vergleichbar zum Frühjahr 2020)

Aktuell wird diskutiert, Beschränkungen – ähnlich wie im Frühjahr 2020 praktiziert – nach und nach aufzuheben. In allen Bundesländern öffnen schrittweise die Schulen, zum Teil auch ohne Maskenpflicht im Unterricht. Darüber hinaus werden nicht nur Lockerungen im Bereich des Handels, sondern auch der (Innen-)Gastronomie erwogen. Laut unseren Modellierungen hat das im Frühjahr 2020 nur deshalb nicht zu einem sofortigen Wiederanstieg der Infektionszahlen geführt, weil die Menschen sich verstärkt draußen aufgehalten haben – vermutlich bedingt durch das ungewöhnlich schöne Wetter. Einen ähnlichen Effekt erwarten wir in diesem Jahr erst ab ca. April; außerdem verschärft B.1.1.7 die Situation. Daher würde laut unseren Simulationen eine **Fortsetzung einer Strategie leichter Öffnungen zu einer spürbaren 3. Welle führen**, die auch durch die wärmeren Temperaturen im Frühling nicht signifikant gebremst oder beendet werden würde. Sowohl die Infektions- als auch die Krankenhauszahlen dieser Welle lägen laut unseren Simulationen um ein mehrfaches höher als im Dezember 2020 (vgl. Abb. 3a). Ein derartiges Vorgehen halten wir im Kontext der erhöhten Gefahren, die mit der B.1.1.7-Mutation einhergehen, für gefährlich. Diese Dynamik würde voraussichtlich nach einigen Wochen eine politische Kurskorrektur erzwingen, die dann umso drastischere Gegenmaßnahmen enthalten müsste, um die Reinfektionsrate und die Infektionszahlen wieder zu senken. Die Folge wäre ein "Jojo-Lockdown" (vgl. Abschnitt 5.2), der gerade auch im Bildungsbereich (Kita und Schulen) zu (erneuten) erheblichen Lasten führen würde.

3.2 Szenario II: Beibehaltung der jetzigen Restriktionen

Laut unserem Modell würde angesichts der deutlich erhöhten Übertragbarkeit und Ausbreitungs-Gefahr bei der B.1.1.7-Mutation eine **Beibehaltung der Mitte Februar bestehenden Restriktionen zu einer dritten Welle** führen. Wenn es gelänge, das jetzige eingeschränkte Verhalten der Bevölkerung beizubehalten, so fielen während dieser 3. Welle die Fallzahlen etwas niedriger als im Dezember aus (vgl. Abb. 3b). Dies würde gemäß unserem Modell vor allem daran liegen, dass ca. ab April die wärmere Jahreszeit "zur Hilfe kommt" (Verlagerung gegenseitiger Besuche nach draußen etc.). Immerhin würden die bereits erfolgten Impfungen der besonders gefährdeten Personengruppen dazu führen, dass die Krankenhauszahlen deutlich niedriger als im Dezember bleiben würden.

3.3 Szenario III: Verschärfung der Restriktionen

Eine Verschärfung des Lockdowns unter Rückgriff auf “einfache Maßnahmen” (z.B. vollständiges Verbot gegenseitiger Besuche, weitgehende Schließung der Arbeitsplätze) würde laut unseren Simulationen, konsistent mit der internationalen Literatur (Bendavid et al. 2021), relativ zur Härte der Einschränkungen vergleichsweise geringe zusätzliche Wirkung haben (vgl. Abb. 3c).⁴ Eine abendliche und nächtliche Ausgangssperre bleibt laut unseren Simulationen eine Maßnahme mit relativ viel Wirkung, ist aber vermutlich als “lokale Notmaßnahme” besser eingesetzt, zumal mittelfristig damit zu rechnen ist, dass die Bevölkerung ihre Treffen dann in andere Tageszeiten verlegt.

3.4 Szenario IV: “Intelligent lockern + intelligenter bekämpfen”

Unsere Analysen weisen darauf hin, dass es durch die **geschickte (“intelligente”) Gestaltung** von Infektionsschutzmaßnahmen möglich ist:

- Lockerungen in (aus politischer Sicht) besonders bedeutsamen Gesellschafts- und Wirtschaftsbereichen durchzuführen UND
- ein weiteres Absinken der Fallzahlen zu erreichen.

Dabei gehen wir davon aus, dass dem Bildungsbereich (Kita, Schulen) eine besondere Bedeutung und eine bevorzugte Behandlung bei Lockerungen zukommen soll. Allerdings sind im Kontext der verschärften Bedrohungslage durch die B.1.1.7-Mutation folgende Empfehlungen unabdingbar:

- angesammeltes Wissen über die Wirkungen einzelner Infektionsschutzmaßnahmen konsequent berücksichtigen (z.B. Bedeutung des Tragens von Masken in Innenräumen, Vorteile von FFP2-/medizinischen Masken),
- die zur Verfügung stehenden Instrumente und im besonderen auch der Schnelltests in geeigneter Weise nutzen,
- sowie zeitliche Sequenz von Maßnahmenetablierungen und -anpassungen wohl überlegt durchführen und sich nicht von “Lockerungswunschdenken” leiten lassen.

Die großen Beiträge zu den Infektionen kommen laut unseren Simulationen vor allem aus Kontakten in Innenräumen. Mögliche Schutzmaßnahmen insbesondere für diese Situationen sind:

- medizinische Masken,
- Impfungen,
- Vermeidung von Kontakten in Innenräumen (z.B. Einzelnutzung von Büros),
- Reduktion der Personendichten (z.B. durch Wechselunterricht an Schulen)
- Verlagerung der Aktivität nach draußen,
- (deutlich) bessere (maschinelle) Lüftung, oder
- flächendeckender Einsatz von Schnelltests.

Es wird darauf ankommen, diese Maßnahmen intelligent zu kombinieren, um trotz B.1.1.7 sowie leichter Öffnungen dennoch ein weiteres Absinken der Infektionszahlen zu erreichen.

⁴ Wenn in einem Segment, z.B. “Arbeit” oder “Schulen”, 50% der normalen Aktivitäten unterbleiben, dann resultiert daraus bereits 75% der Wirkung. Ein Unterdrücken der verbleibenden 50% der Aktivitäten bringt noch 25% weitere Wirkung.

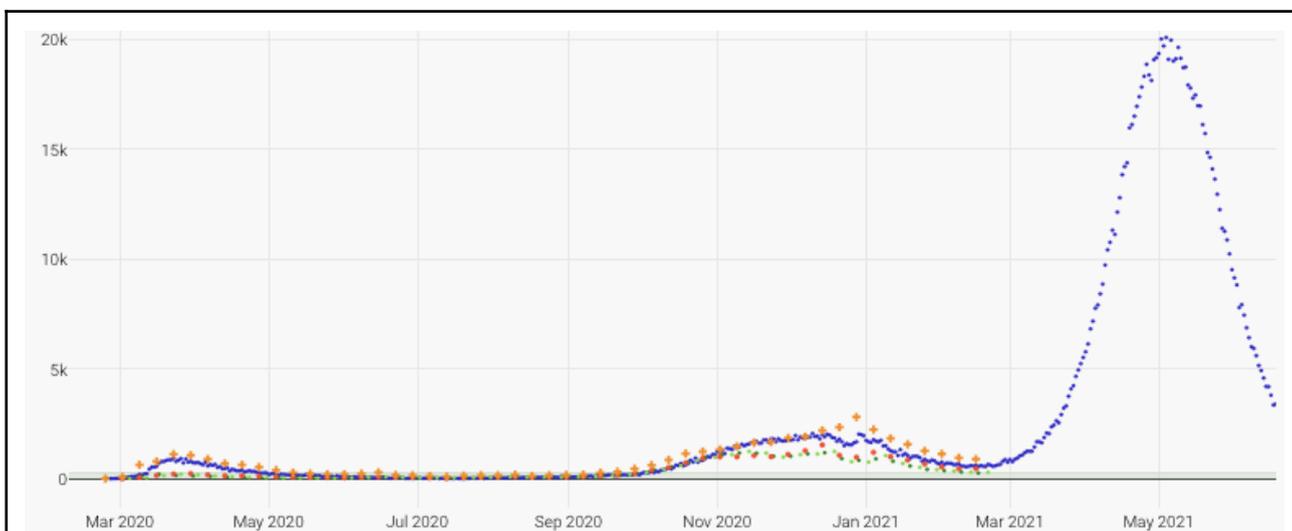
Eine leicht umzusetzende Schutzmaßnahme bleiben weiterhin medizinische Masken, vorzugsweise richtig angewandte FFP2-Masken. Deren Verwendung sollte auch auf Mehrpersonenbüros ausgedehnt werden, selbst wenn 10qm oder mehr pro Person zur Verfügung stehen. Auch bei privaten Besuchen wären Masken sinnvoll.

Eine neu hinzukommende Schutzmaßnahme sind Schnelltests. In unseren Simulationen zeigen **Schnelltests vor Schule, Arbeitsstätte oder Besuch bei Freunden eine erhebliche positive Wirkung**. Wichtig ist dabei, dass es zur Bekämpfung der Infektionsdynamik nicht notwendig ist, *alle* Infektionen durch Tests aufzuspüren; es reicht, einen genügend großen Anteil davon zu finden (vgl. Abschnitt 4.2).

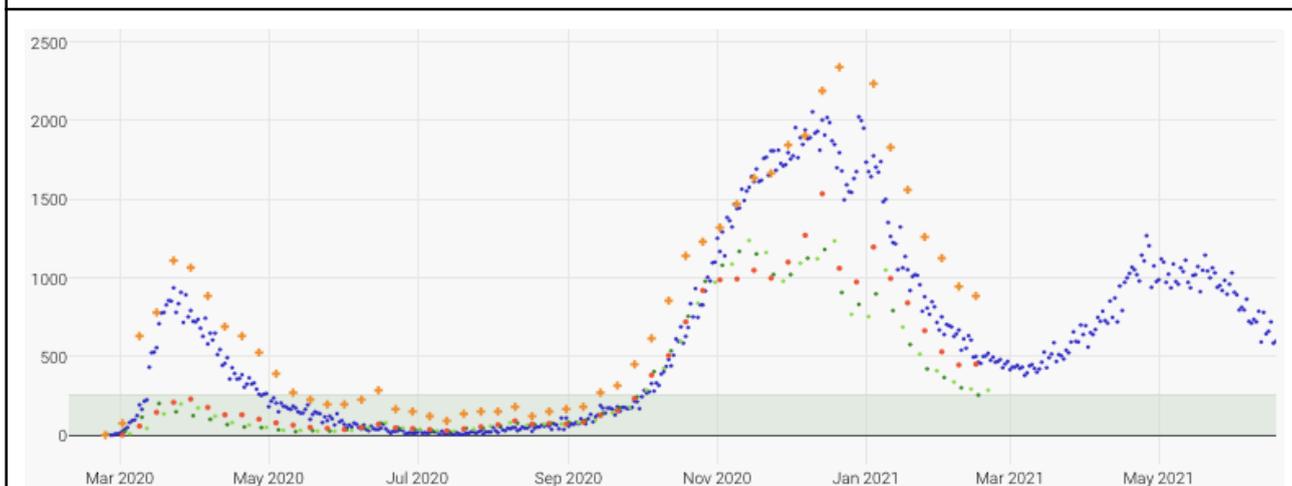
Eine Zusammenfassung der Überlegungen dieses Szenarios resultiert in folgender Merkregel:

Kontakte in Innenräumen außerhalb des eigenen Haushaltes nur mit Schutzmaßnahmen!

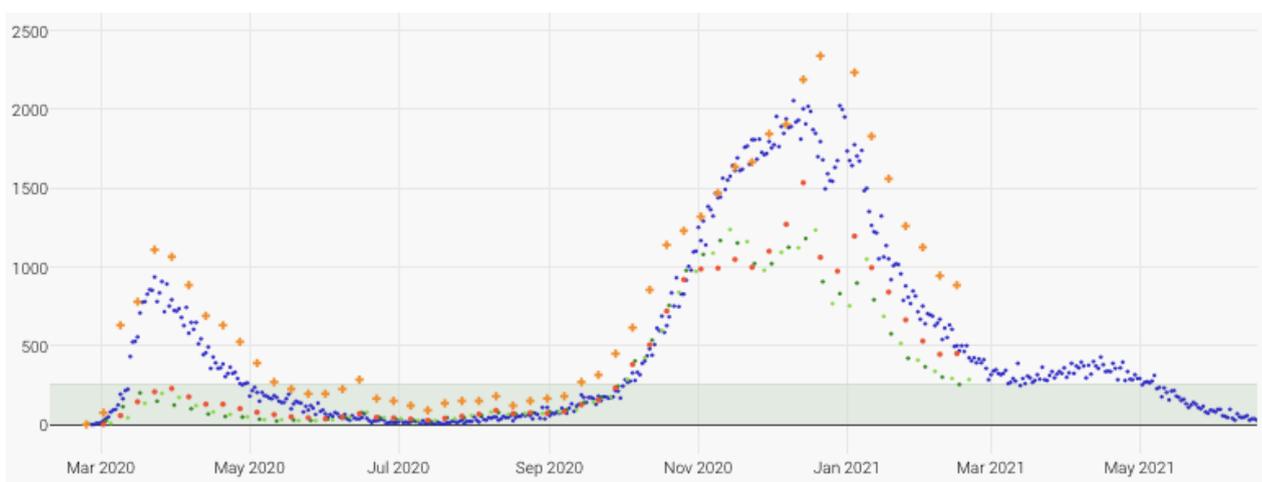
Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse unserer Simulationen für die beschriebenen vier Szenarien.



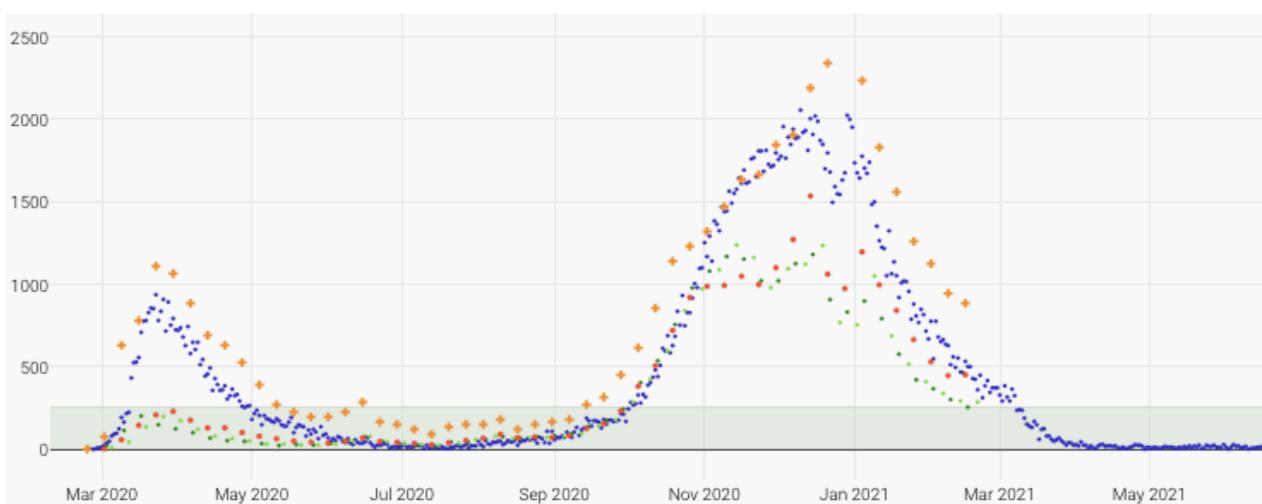
a) Szenario I: 80% der aushäusigen Aktivitäten finden statt, Schulen geöffnet.
Ergebnis: Eine sehr hohe 3. Welle ab Ende März.



b) Szenario II: Jetzige Einschränkungen werden beibehalten.
Ergebnis: Eine geringer ausfallende 3. Welle ab Ende März.



c) Szenario III: Jetziges Regime und zusätzlich weitere Maßnahmen im Arbeitsbereich.
 Ergebnis: eine leichte 3. Welle ab Ende März, die mit dem Übergang zur warmen Jahreszeit endet.



d) Szenario IV: 80% der aushäusigen Aktivitäten finden statt, Schulen geöffnet, flächendeckender Einsatz von Schnelltests im Bereich Arbeit, Bildung und Freizeit inkl. private Besuche.
 Ergebnis: ein weiterhin deutliches Absinken der Infektionszahlen in Richtung Null.

Abbildung 3: Simulationsresultate der Szenarien I - IV. Die Resultate sind unter <https://covid-sim.info/2021-02-02> (Szenario I - III) und <https://covid-sim.info/2021-02-23/testing> (Szenario IV) zu finden, wo es auch weitere Varianten gibt.

4 Beiträge zur Reinfektionsrate R

4.1 Aktivitäten und (Gegen-)Maßnahmen: Tabelle der Beiträge zur Reinfektionsrate R

Mit unseren Modellierungen können wir abschätzen, in welchem Ausmaß einzelne Aktivitäten in den unterschiedlichen Bereichen des alltäglichen Lebens (wie Schule, Arbeit und Freizeit) zur Reinfektionsrate beitragen und in welchem Ausmaß bestimmte Gegenmaßnahmen das Infektionsgeschehen eindämmen. Dabei differenzieren wir zwischen der ursprünglichen Virus-Variante und der neuen, ansteckenderen Mutation B.1.1.7, welche nach unseren Simulationen schon sehr bald vorherrschend sein wird. Da wir inzwischen von einer höheren Übertragbarkeit der Virus-Mutation B.1.1.7 ausgehen, als bisher angenommen (um 100% statt 35-70%), ergeben sich gegenüber unserem Bericht vom 5. Februar 2021 entsprechend höhere Beiträge der einzelnen Aktivitäten zur Reinfektionsrate R (vgl. Müller et al. 2021). Der Beitrag einzelner Aktivitäten zum R-Wert sowie der Effekt von bestimmten Infektionsschutzmaßnahmen sind einerseits für den bisherigen Pandemie-Verlauf und andererseits für die in Zukunft vorherrschende Virus-Mutation B.1.1.7 in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt. Lesebeispiel: Eine vollständige Schulöffnung ohne Masken und Wechselunterricht würde R um 0,3 erhöhen.

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

Man sieht in der Tabelle deutlich, dass es unter dem Regime von B.1.1.7 nahezu unmöglich ist, R kleiner 1 zu halten, wenn nicht gegenüber dem jetzigen Regime weitere Schutzmaßnahmen, wie z.B. Maskenpflicht in Mehrpersonenbüros und/oder breit eingesetzte Schnelltests, hinzugenommen werden.

	Beitrag zu R	
	Bisher	„B117“
(Unvermeidbare) Übertragungen im eigenen Haushalt	0,40	0,50
Arbeit		
... ohne Schutzmaßnahmen (also ohne Homeoffice, Maskenpflicht und Einzelbüros) [†]	0,15	0,30
... mit Pflicht zu FFP2-Masken oder Einzelbüros oder Homeoffice [‡]	< 0,01	0,03
... mit Schnelltests 1 x pro Woche (ca. 1,3 Mio Tests/Woche)		0,15
... mit Schnelltests vor jedem Arbeitstag (ca. 6,3 Mio Tests/Woche)		0,02
Schulen^{‡‡}		
... ohne Schutzmaßnahmen (also ohne Maskenpflicht im Unterricht und ohne Wechselunterricht)	0,15	0,30
... mit FFP2-Maskenpflicht während des Unterrichts und mit Wechselunterricht [*]	< 0,01	< 0,01
... mit Schnelltests 1 x pro Woche (ca. 0,5 Mio Tests/Woche)		0,10
... mit Schnelltests vor jedem Schultag (ca. 2,4 Mio Tests/Woche)		< 0,01
Einzelhandel		
... ohne Schutzmaßnahmen (also insbes. ohne Maskenpflicht)	0,05	0,10
... mit FFP2-Maskenpflicht	< 0,01	< 0,01
Gastronomie		
... innen ohne Schutzmaßnahmen	0,40	0,50
... innen mit halber Gästezahl (Maskenpflicht nicht sinnvoll möglich)	0,10	0,13
... <u>im Außenbereich</u>	0,04	0,05
Private Besuche / Treffen / Feiern		
Besuche / Treffen innen (Winter) ohne Schutzmaßnahmen	0,20	0,25
Besuche / Treffen innen mit FFP2-Masken ^{‡‡}	0,02	0,03
Besuche / Treffen innen mit unregelmäßigen Schnelltests (zufällig ausgewählte 20% der Treffen; ca. 0,5 Mio Tests/Woche)		0,10
Besuche / Treffen innen mit Schnelltests vor allen Treffen (ca. 2,6 Mio Tests/Woche)		0,01
Besuche / Treffen <u>im Außenbereich</u> (Sommer)	0,02	0,03
Feiern innen ohne Schutzmaßnahmen	0,20	0,25
Veranstaltungen		
... Museen und Streichkonzerte mit durchgehender FFP2-Maskenpflicht	< 0,01	< 0,01
... in großen Räumlichkeiten mit „ausgedünnter“ Teilnehmerzahl	unklar	unklar
... speziell Theater, Chorkonzerte und Konzerte mit Bläsern	unklar	unklar
... <u>im Außenbereich</u>	< 0,01	< 0,01
Öffentlicher Verkehr		
... ohne Schutzmaßnahmen. (also ohne Maskenpflicht) / normale Auslastung	0,10	0,20
... mit FFP2-Maskenpflicht bei derzeitiger Auslastung	< 0,01	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; grün: mit Schnelltests; orange: draußen.

† 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 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 Kinder in einem Klassenraum verglichen mit normal.

†† 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 2021b). 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.**

4.2 Schnelltests (inkl. Selbsttests)

Vor dem Hintergrund der in immer größeren Stückzahlen zur Verfügung stehenden Schnelltests und weil absehbar ist, dass diese in naher Zukunft wohl nicht mehr nur von geschultem Personal durchgeführt werden müssen, haben wir die Wirkung des flächendeckenden Einsatzes dieser Schnelltests mit unserem Modell genauer untersucht. Wir gehen dabei davon aus, dass die verwendeten Tests eine Sensitivität von 70% und eine Spezifität von 97% aufweisen,⁵ also 30% aller Infizierten übersehen werden sowie 3% falsch-positive Resultate entstehen. Beides sind eher pessimistische Werte; wichtig ist aber, dass selbst damit eine sehr deutliche positive Wirkung im Hinblick auf das Infektionsgeschehen zu erwarten ist. Wir gehen in den Simulationen davon aus, dass eine Personen am Morgen getestet wird und sich nach einem positiven Test für 2 Tage in häusliche Quarantäne begibt und das Ergebnis eines PCR-Tests abwartet. Wenn die Person

⁵ <https://www.aerzteblatt.de/archiv/216516/Antigentests-auf-SARS-CoV-2-Der-Preis-der-Schnelligkeit>

tatsächlich infiziert ist, bleibt sie anschließend für 14 Tage in Quarantäne. War der Test falsch-positiv, wird die Person nach den zwei Tagen aus der Quarantäne entlassen.

Wir haben unter diesen Annahmen verschiedene Teststrategien und Testquoten für Berlin ab dem 01.03.2021 untersucht:

1. Testen von zufälligen Personen an zwei Tagen pro Woche
2. Tägliches Testen im Bildungsbereich
3. Tägliches Testen im Arbeitsbereich
4. Tägliches Testen im Freizeitbereich
5. Kombinationen aus den Ansätzen 2-4

Die Wirkung der verschiedenen Strategien auf die Reproduktionszahl ist in Abhängigkeit von der Testrate in Abbildung 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass der flächendeckende Einsatz von Schnelltests eine erhebliche Reduktion der Reproduktionszahl bewirkt. Im verwendeten Basisszenario (Schulen offen, 80% der aushäusigen Aktivitäten finden statt, B117 dominant) liegt die Reproduktionszahl bei ca. 1,3.⁶ Wenn jede Person, die Freizeit-, Bildungs- oder Arbeitsaktivitäten ausführt, täglich getestet wird (lila Linie), so ergibt sich eine Reduktion von R um (den sehr hohen Wert von) 1,1, so dass eine Reproduktionszahl von 0,2, also nahe Null erreicht würde, obwohl in diesem Regime relativ wenig sonstige Einschränkungen vorhanden sind. Dies würde jedoch bedeuten, dass ca. 16,5 Millionen Schnelltests in Berlin pro Woche durchgeführt werden müssten. Insbesondere weil bei einem (falsch-)positiven Testergebnis (3% von 16,5 Millionen = ca. 0,5 Mio = 10x mehr als derzeit in Berlin möglich) ein PCR-Test folgen sollte, ist fraglich, ob dies kurzfristig möglich ist und damit ein realistisches Szenario darstellt. Unsere Simulationen zeigen aber, dass auch mit deutlich geringerem Testumfang eine ähnlich große Wirkung erzielt werden kann. Wenn alle Personen, die Freizeit-, Bildungs- oder Arbeitsaktivitäten durchführen, 2x pro Woche getestet werden, liegt die Reduktion der Reinfektionsrate immer noch bei ca. 0,9 (!), und die resultierende Reinfektionsrate bei extrem niedrigen 0,4. Dies entspräche laut unserem Modell ca. 6,6 Millionen Schnelltests pro Woche.⁷ Selbst mit nochmals niedrigeren Testfrequenzen wird laut unseren Simulationsergebnissen immer noch eine deutliche Wirkung erzielt.

Bei einem Vergleich der Strategie, Personen abhängig von ihrer Teilnahme an Aktivitäten zu testen (Freizeit-, Bildungs- oder Arbeitsaktivitäten, vgl. lila Linie) mit der Strategie, zufällige Personen zwei mal pro Woche zu testen (vgl. schwarze Linie) fällt auf, dass die Wirkung der aktivitätenbezogenen Testung bei ähnlicher Testzahl nur leicht über der Wirkung der zufälligen Testung liegt. Dies zeigt, dass es zwar effizienter ist, diejenigen Personen zu testen, die an dem Tag eine Aktivität in einem der problematischen Kontexte durchführen, als zufällige Personen. Andererseits sind die Unterschiede so gering, dass es **vermutlich sinnvoll ist, diejenige Teststrategie zu wählen, die letztlich am leichtesten umzusetzen ist**. Man könnte z.B. den bei FFP2-Masken praktizierten "Gutschein-Ansatz" wiederholen: damit könnte jede Person mit einem Gutschein für jede Woche der nächsten Monate eine bestimmte Anzahl an Tests erhalten, und man gibt Empfehlungen, wie diese einzusetzen sind. Offenbar kann dies immer noch kombiniert werden mit systematischen Schnelltests seitens Schulen, Arbeitgebern, oder bei Veranstaltungen.

⁶ Dieser Wert bezieht sich auf eine konkrete Situation in der Simulation, in etwa: kalte Jahreszeit, gut funktionierende Kontaktnachverfolgung, in den Schulen wird verstärkt gelüftet, Maskenpflicht ÖV und Einzelhandel, Universitäten geschlossen, und – wie gesagt – (nur) 80% der aushäusigen Aktivitäten finden statt, was, wie auch anderswo ausgeführt, die aushäusigen Infektionen bereits auf 64% reduziert.

⁷ Dies hätte zur Folge, dass sich zu jedem Zeitpunkt aufgrund der falsch positiven Testergebnisse ca. 80.000 Personen in Quarantäne befinden; nur ein geringer Anteil dieser Personen wäre tatsächlich ansteckend.

Generell lässt sich zusammenfassen, dass quasi jede Teststrategie, die auf breit eingesetzten Schnelltests beruht, eine gute Wirkung hat, und zwar selbst dann, wenn die Fehlerquote der Tests oder bei der Anwendung hoch ist. Wir würden allerdings generell vermuten, dass große Teile der Bevölkerung mit den Tests konstruktiv umgehen würden. Fehlanwendung, wie z.B. die Verwendung eines veralteten Testresultats, könnte man durch die Verbindung mit kryptographischen Verfahren reduzieren (Markowitz and Hirsch 2021). Insofern spricht viel dafür, möglichst schnell mit dem breiten Einsatz von Schnelltests zu beginnen und bei auftretenden Problemen nachzusteuern.

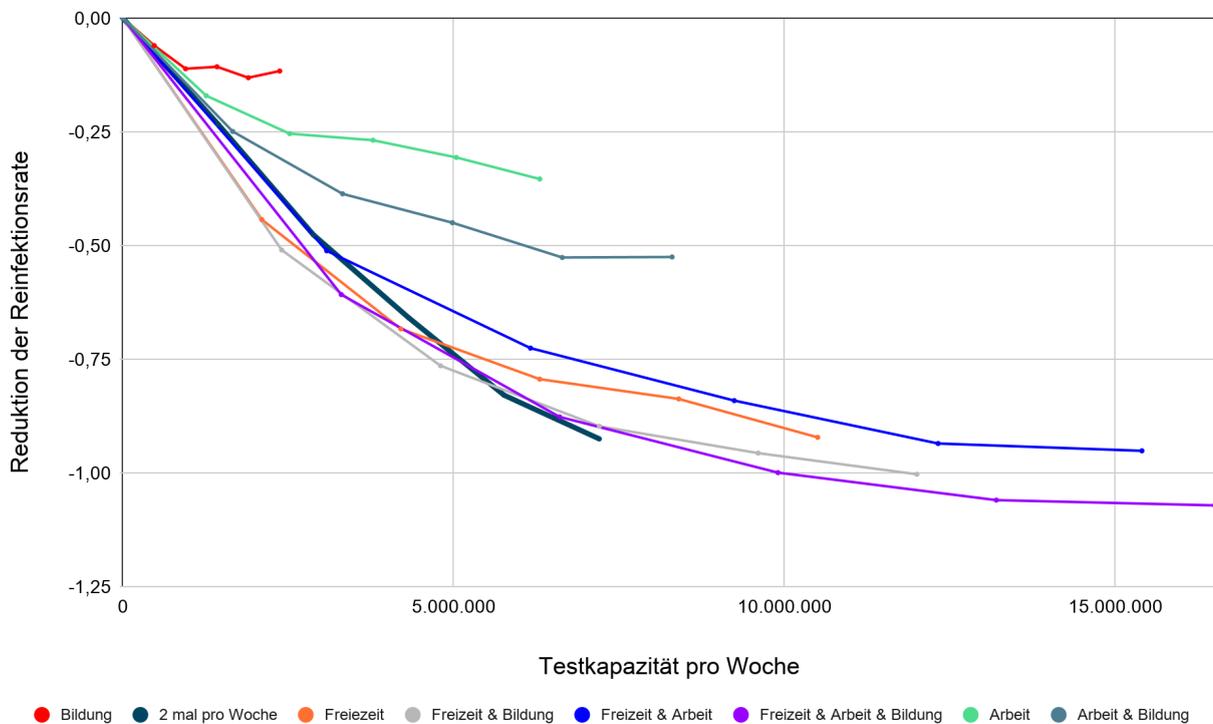


Abbildung 4: Wirkung verschiedener Teststrategien auf Reinfektionsrate. Flächendeckendes Testen in Bildungseinrichtungen würde R bspw. um ca. 0,15 reduzieren. Die hier zu erreichenden Beiträge können höher sein als die aus Tabelle 1, weil jede der Strategien ansteckende Personen generell aus dem Verkehr zieht, und damit auch Ansteckungen bei anderen Aktivitäten reduziert.

4.3 Innengastronomie

Wie oben bereits kurz erwähnt, halten wir **bis auf weiteres die Öffnung der Innengastronomie (einschließlich Kneipen, Bars etc.) für unverantwortlich**. Eine solche Lockerung würde bei der in Zukunft vorherrschenden Virus-Mutation B.1.1.7 laut unserem Modell einen Beitrag von 0,5 zur Reinfektionsrate leisten. Zusammen mit den 0,5 "Reinfektions-Punkten", die (weitgehend unvermeidbar) zuhause anfallen, würde alleine die Öffnung der Innengastronomie zu einer überkritischen Infektionsdynamik führen. Aufgrund der Ansteckungen bei der Arbeit, in Schulen oder bei gegenseitigen privaten Besuchen läge der resultierende Gesamt- R -Wert weit oberhalb von 1, und ein exponentielles Anwachsen der Inzidenzen wäre unvermeidlich.

Die wesentlichen Probleme bei der Innengastronomie sind die räumliche Enge kombiniert mit der Tatsache, dass während des Essens und Trinkens keine Maske getragen werden kann, häufig laut gesprochen wird und die Verweildauern relativ lang sind. Da man bei allen anderen derzeit geschlossenen Bereichen die Reinfektionsrate durch ein konsequentes Tragen von Masken während der Aktivität verringern kann, sollten zunächst diese anderen Bereiche geöffnet werden. Erst wenn alle diese anderen Bereiche mit einer entsprechend Pflicht zum Tragen von Masken

geöffnet worden sind, sollte – aus unserer Sicht – eine Öffnung der Innengastronomie in Kombination mit Schnelltests in Betracht gezogen werden.

Statt einer frühzeitigen Öffnung der Innenbereiche sollte sich im Bereich der Gastronomie vielmehr zum Sommer hin sofort auf den Außenbereich konzentriert werden. Hier sind die Infektionen um einen Faktor von ca. 10 niedriger, der Beitrag zur Reinfektionsrate liegt also nur bei 0,05 und damit nicht mehr im sehr kritischen Bereich. Dies würde auch der Forderung nach Planbarkeit entgegenkommen: Eine klare Absage an die Innengastronomie statt immer wiederkehrender Verschiebungen, und dafür eine wahrscheinliche Öffnungsperspektive für die Außengastronomie.⁸

5 Zeitliche Aspekte und die Vermeidung von Jojo-Lockdowns

5.1 Ab wann helfen der Frühling/Frühsummer und die Impfungen?

Wir gehen davon aus, dass ab Tageshöchsttemperaturen von über 15 Grad Freizeitaktivitäten nach draußen verlagert werden, und dass dies ab April in größerem Maße der Fall sein wird. Somit müssten wir laut unserem Modell wegen B.1.1.7 die jetzigen Beschränkungen noch bis Anfang Mai durchhalten, bei ungefähr konstanten Infektionszahlen, bevor dieser Effekt überhaupt zum Tragen kommt.

Auch die Impfungen helfen bzgl. der Infektionsdynamik nicht schnell genug: Wir müssen 50% der Bevölkerung geimpft haben, um überhaupt nur die doppelt so hohe Ansteckungswahrscheinlichkeit von B.1.1.7 zu kompensieren, und damit dort zu stehen, wo wir letztes Jahr um die gleiche Zeit standen.

Immerhin zeigen die Impfungen deutliche positive Wirkung in unseren Simulationen in der Reduktion der Krankenhausbelastung sowie der Intensivfälle.

5.2 Jojo-Lockdowns vs. “weiche Landung”

Aktuell wird in den Medien und in der Politik viel über mögliche Öffnungsszenarien und Stufenpläne gesprochen. Diese sehen meist Öffnungen bzw. Verschärfungen in verschiedenen Sektoren bei Unter- bzw. Überschreiten von bestimmten Inzidenzschwellwerten vor. Wir haben mit unserem Modell untersucht, wie die konsequente Durchführung eines solchen Stufenplans aussehen könnte. Wir gehen dabei davon aus, dass beim Erreichen des Schwellwertes sofort Restriktionen eingeführt werden und nach einer 14-tägigen Unterschreitung des Grenzwertes Lockerungen stattfinden. Das eingeschränkte Regime entspricht dem Ende Januar (ca. 65% der aushäusigen Aktivitäten finden statt, Schulen geschlossen). Im geöffneten Regime finden 90% der aushäusigen Aktivitäten statt und die Schulen sind im Normalbetrieb.

Bei Beibehaltung des derzeitigen Impftempos ergeben sich Verläufe wie in Abb. 5a/b. Klar erkennbar sind aufeinander folgende Öffnungen und Schließungen.

⁸ Wir sind keine Experten für ökonomische Kompensationsmaßnahmen. Man kann aber argumentieren, dass Unternehmen der Innengastronomie spezifische Investitionen (z.B. in Räumlichkeiten) vorgenommen haben, bzgl. derer es entweder nötig ist, dass die Gesellschaft diese kompensiert, oder durch entsprechende Zahlungen dafür sorgt, dass die Innengastronomie bis zu einem späteren Zeitpunkt “durchhalten” kann. Gerade bzgl. der Lebendigkeit von Innenstädten dürfte die zweite Variante oft vorzuziehen sein.

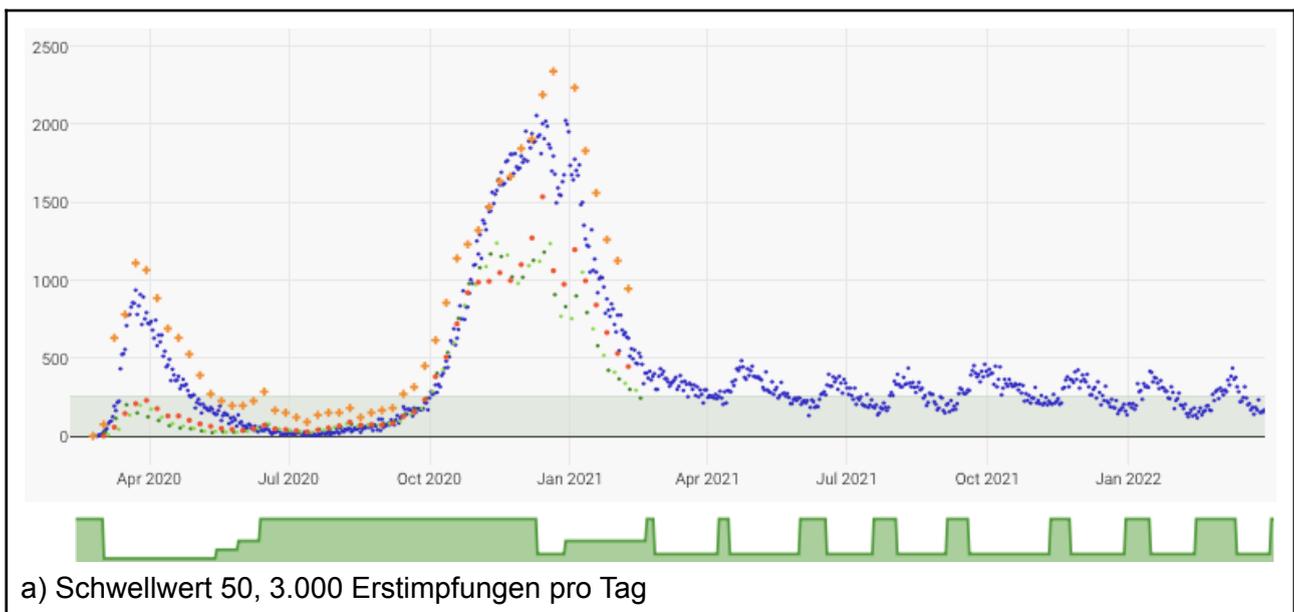
Schnellere Impfungen werden das Problem perspektivisch reduzieren, siehe Abb. 5c/d. Aber auch hier würden bis zum Herbst mehrere Öffnungs-/Schließungsschritte erfolgen. Außerdem steht die Möglichkeit im Raum, dass weitere Mutationen des Virus die vorhandenen Impfungen weniger wirksam machen, so dass trotz höheren Impftempos die Dynamik wieder dem Szenario mit der geringeren Impfrate (Abb. 5a/b) folgen würde.

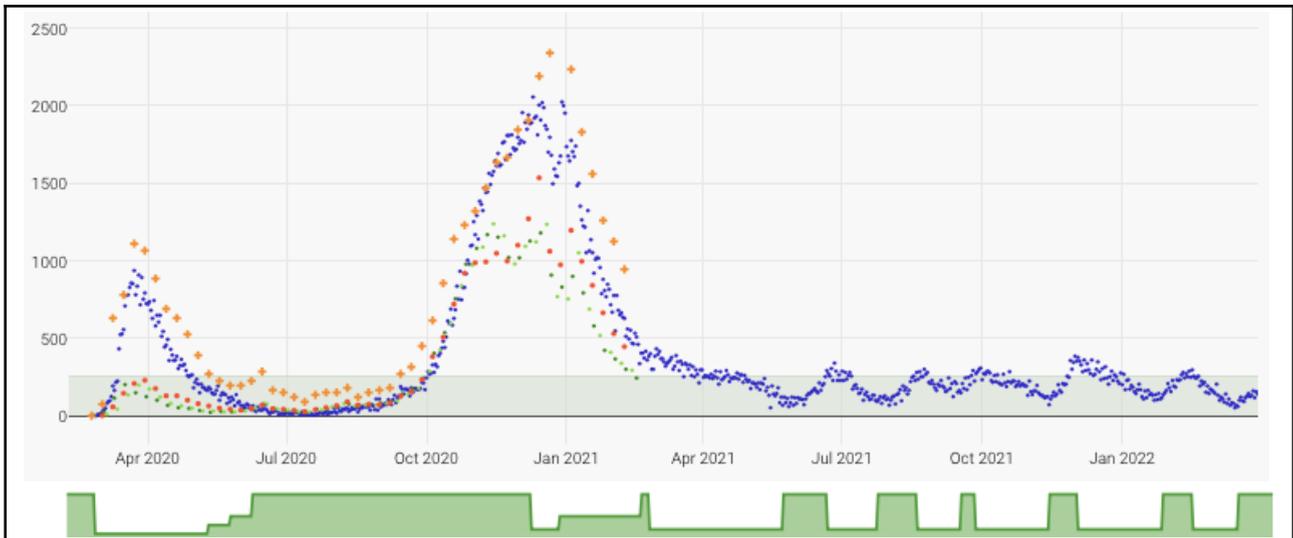
Das lässt sich auch allgemeiner beschreiben (vgl. auch Köhler et al. 2020): Tendenziell entspricht der von uns simulierte Ansatz einem sogenannten Zweipunktregler (= "harter" Regler), und dieser führt zu solchen Auf- und Abbewegungen. Die zirkulierenden Stufenpläne entsprechen eher einem sogenannten Proportional-Regler (= "weicher" Regler). Diese weichen Regler führen, wenn "nicht zu langsam und nicht zu schnell" reagiert wird, zu einem stabilen Zustand, bei welchem die Stärke der Regelung der Stärke des Gegendrucks entspricht. Allerdings hätte laut unserem Modell die Öffnung der Innengastronomie einen so großen Effekt, dass (1) alle danach noch vorgesehenen Öffnungen nicht mehr stattfinden würden, und (2) dieser Effekt aus der im Prinzip weichen Regelung in diesem Bereich eine harte Regelung machen würde.

Zusammenfassend: Vor dem Hintergrund, dass

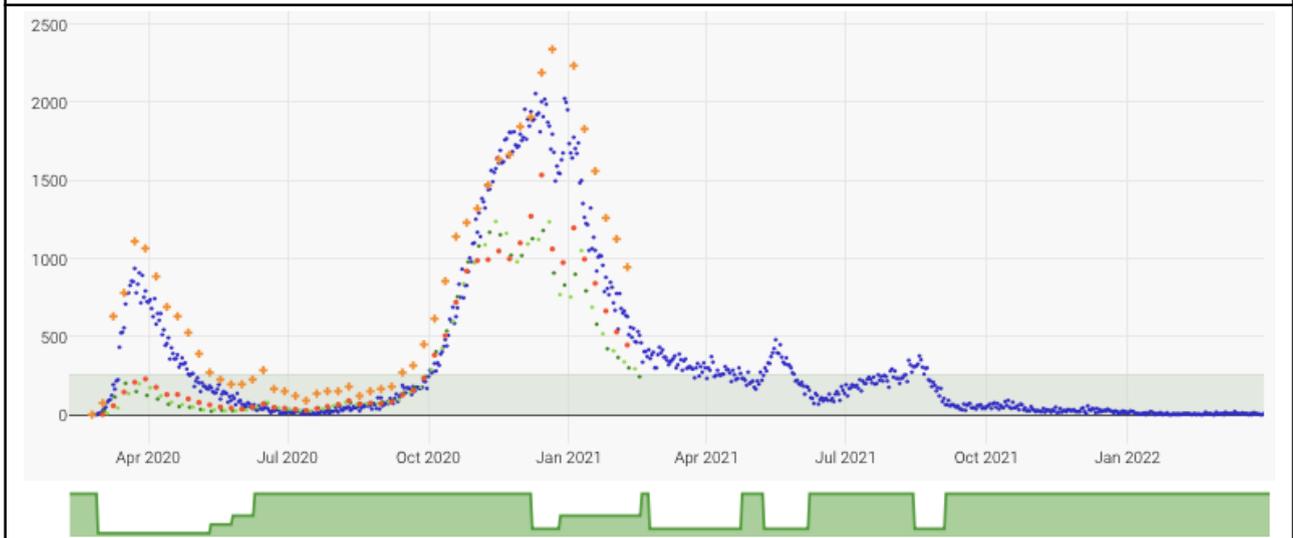
- durch das derzeitige Infektionsgeschehen sich einerseits kurzfristig die ansteckendere Virus-Mutation B.1.1.7 ausbreiten und durchsetzen wird,
- andererseits mittelfristig aber durchaus Entwicklungen zu erwarten sind, die den Umgang mit der Pandemie erleichtern können, wie zunächst die wärmeren Jahreszeiten, die eine Verlagerung von Aktivitäten nach draußen ermöglichen, sowie zu einem späteren Zeitpunkt auch die Impffortschritte,

sollten gerade jetzt **leichtfertige Lockerungen der Infektionsschutzmaßnahmen, die einen rapiden Anstieg der Infektionszahlen bewirken können, vermieden werden**. Vielmehr gilt es in der derzeitigen Situation "die Nerven zu bewahren", allenfalls **gezielte Lockerungen in gesellschaftlich besonders relevanten Bereichen (wie z.B. der Bildung)** vorzusehen und diese mit **wirksamen Maßnahmen zur verschärften Bekämpfung** der Pandemie zu kombinieren ("intelligent lockern + intelligenter bekämpfen", vgl. Abschnitt 3.4).

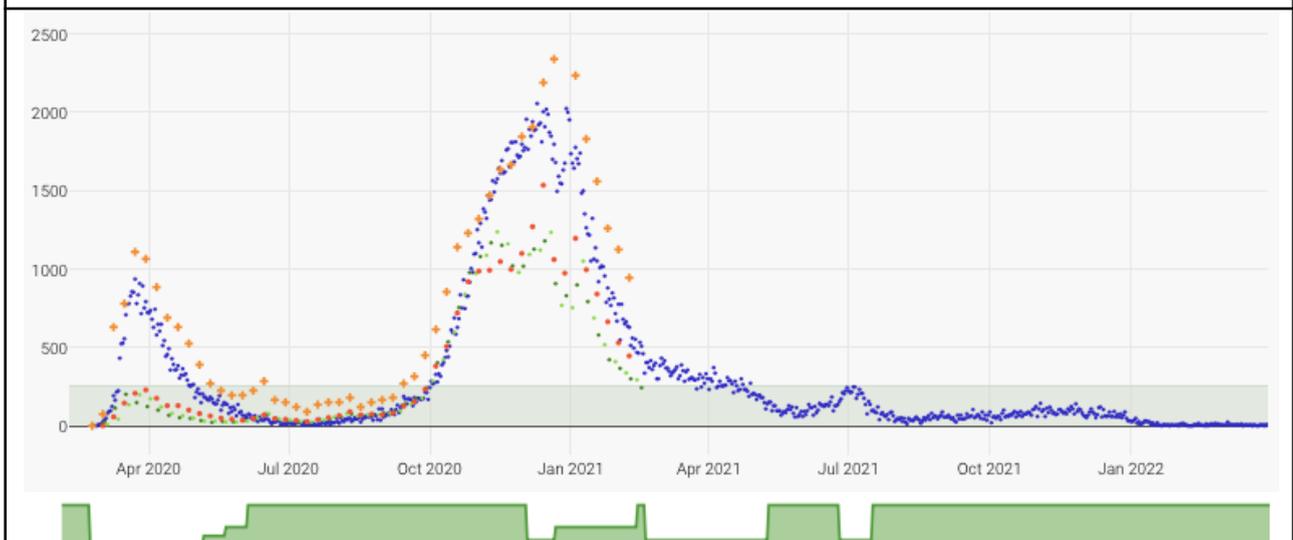




b) Schwellwert 35, 3.000 Erstimpfungen pro Tag



c) Schwellwert 50, 10.000 Erstimpfungen pro Tag



d) Schwellwert 35, 10.000 Erstimpfungen pro Tag

Abbildung 5: Simulierte tägliche Neuinfektionen bei der Anwendung von Stufenplänen bei den Schwellenwerten 35 oder 50 Neuinfektionen pro 100.000 Einwohnern und der Durchführung von 3.000 oder 10.000 Erstimpfungen pro Tag in Berlin; der grüne Balken unterhalb der Diagramme gibt jeweils den Öffnungsgrad an; vgl.: <https://covid-sim.info/2021-02-20>, auch für weitere Varianten.

6 Erweiterungen des mathematischen Modells für optimale Maßnahmenpakete

Nach wochenlangen einschneidenden Maßnahmen sind die Infektionszahlen stark gefallen und die Forderungen nach Lockerungen der bestehenden Restriktionen werden lauter, um weitere Schäden im sozio-ökonomischen Bereich zumindest abzumildern. Gleichzeitig ist durch die Verbreitung der verschiedenen Virus-Mutationen im Moment schwer abzuschätzen, ob durch eine Lockerung die nächste Welle mit ansteigenden Fallzahlen ausgelöst würde, also wiederum ein beschleunigtes Infektionsgeschehen entstehen könnte.

Im folgenden beschreiben wir ein mathematisches Modell, mit dem beide Seiten im Sinne einer Kostenschätzung gemeinsam betrachtet werden können. Das Ziel ist die Identifikation eines Maßnahmenpaketes, das zu einem möglichst kleinen Infektionsgeschehen führt und gleichzeitig eine möglichst weitreichende Rückkehr zu einer "vorpandemischen Normalität" ermöglicht.

Dafür betrachten wir die möglichen Maßnahmen nicht nur im Hinblick auf ihre Wirkung auf die Infektionsdynamik, sondern zusätzlich auch ihre sozio-ökonomischen Folgen. Das mathematische Ziel ist es, zwei Arten von Kosten gleichzeitig zu minimieren, wobei der Begriff "Kosten" nicht unbedingt wörtlich zu nehmen ist. Wir betrachten: (1) Kosten, die durch eine hohe Anzahl an Infektionen entstehen (Todesfälle, Überlastung des Gesundheitssystems, Long-Covid-Folgeschäden), und (2) sozio-ökonomischen (SÖ) Kosten (Arbeitslosigkeit, Pleiten, gesundheitliche und psychologische Schäden, Bildungsschäden).

Die meisten der bisher implementierten Maßnahmen zur Eindämmung der Infektionszahlen haben zwar das primäre Ziel erreicht (die Infektionszahlen sanken), haben aber die SÖ Kosten erhöht. Offensichtlich haben verschiedene Maßnahmen verschiedene Effekte auf die beiden Kostenarten: so ist z.B. die Maßnahme "Abstand halten" gleichzeitig effektiv im Kampf gegen die Virusverbreitung (niedrige Kosten im Bereich der Infektionen) und verursacht niedrige Kosten im SÖ Bereich. Andererseits gibt es Maßnahmen wie z.B. die komplette Schließung von Schulen, die hohe Kosten im SÖ Bereich verursachen, aber (im Vergleich zu teilgeöffneten Schulen) eher wenig zur Reduktion im Bereich der Infektionszahlen beitragen.

6.1 Minimierung von mehreren Kostenarten: Pareto-Optimierung

Wie findet man also die optimalen Maßnahmen oder besser noch, die optimale Kombination an Maßnahmen, so dass man mit möglichst niedrigen SÖ-Kosten auch die Infektionskosten niedrig hält? In der Mathematik gibt es dazu das Verfahren der sog. Pareto-Optimierung. Der Ansatz ist dabei ein Optimierungsproblem mit mehreren, oft gegensätzlichen, Zielen (und damit verbundenen Kosten) zu lösen. Eine Lösung wird dann als Pareto-optimal bezeichnet, wenn keines der Ergebnisse für die verschiedenen Ziele verbessert werden kann, ohne ein anderes dadurch zu verschlechtern.

Für unser bereits mehrfach beschriebenes ODE-Modell (siehe vorherige Berichte) wurden die folgenden drei Anti-Corona-Maßnahmen betrachtet, die jeweils mit einer Intensität von 0%, 50% und 100% befolgt bzw. durchgeführt werden:

- 1) Schulschließungen (betrifft alle Bildungsformen, also Kitas, Schulen, Universitäten)
- 2) Maskenpflicht (Tragen von OP-Masken im ÖPNV, im Einzelhandel und am Arbeitsplatz)
- 3) Kontaktnachverfolgung

Wenn wir die Intensität der drei Maßnahmen auf entweder 0%, 50% oder 100% setzen, erhalten wir $3 \times 3 \times 3 = 27$ Maßnahmenkombinationen. Unser ODE-Modell berechnet für diese Kombinationen auf Basis der Daten aus dem agenten-basierten Modell (ABM) unter anderem folgende Infektionsraten⁹:

Stärke der Maßnahmen (Schulschließungen, Maskenpflicht, Kontaktnachverfolgung)	Infektionsrate
0%, 0%, 0%	1.24
100%, 0%, 0%	1.14
100%, 50%, 0%	1.1
50%, 50%, 50%	0.97
50%, 50%, 100%	0.89
100%, 100%, 100%	0.83

Tabelle 2: Darstellung der resultierenden Infektionsrate bei verschiedener Gewichtung der Maßnahmen

Im folgenden nehmen wir vereinfacht an, dass die Infektionskosten gleich der Infektionsrate ist. Dies ist sinnvoll, da im zugrundeliegenden ODE-Modell die Infektionsrate der einzige Parameter ist, der die Maßnahmen widerspiegelt. Dadurch sind Änderungen in der Anzahl der infizierten Individuen nur abhängig von der Infektionsrate. In anderen Worten: je höher die Infektionsrate, desto höher die Infektionskosten.

Wir definieren zwei Funktionen:

- f_1 berechnet die Infektionskosten für alle Maßnahmen-Kombinationen. Sie stellt die Ergebnisse aus dem ODE dar, welches die Infektionsrate für verschiedene Maßnahmen berechnet.
- f_2 berechnet die SÖ-Kosten wie folgt:

Sei c_1 = Intensität der Schulschließungen, c_2 = Intensität der Maskenpflicht, c_3 = Intensität der Kontaktnachverfolgung. $c_1 = 0.5$ bedeutet zum Beispiel 50 % Schulschließungen.

Dann ist f_2 wie folgt definiert:

$$f_2(c_1, c_2, c_3) = 3 \cdot c_1^2 + 0.4 \cdot c_2 + 0.6 \cdot c_3 \quad c_1, c_2, c_3 \in [0, 1]$$

Aus der Formel ergibt sich, dass - im Bereich der SÖ Kosten - die Maßnahme Kontaktnachverfolgung "teurer" als die Maßnahme Maskenpflicht ist. Weiterhin sind Schulschließungen um ein Vielfaches teurer als Maskenpflicht oder Kontaktnachverfolgung.

Beispiel: Sei $c_1=1, c_2=c_3=0$. Dann ist $f_2(1,0,0) = 3$. Sei $c_1=0, c_2=c_3=1$, dann ist $f_2(0,1,1) = 1$. Also sind die SÖ-Kosten der vollständigen Schulschließungen allein dreimal so groß wie die Kosten von 100 % Maskenpflicht und 100 % Kontaktnachverfolgung).

⁹ Die Infektionsrate im ODE-Modell gibt an, wie viele Menschen sich mit dem Virus infizieren. Sie ähnelt damit der Reproduktionsrate R_0 : ein große Infektionsrate korrespondiert mit einem hohen Infektionsgeschehen, also: je kleiner, desto besser.

6.2 Die Pareto-optimalen Kombinationen

Führt man nun eine Optimierung mit den beiden o.g. Funktionen über möglichen Werte für c_1 , c_2 , und c_3 durch, ergibt sich eine optimale Lösung (also die insgesamt niedrigsten Kosten) für die folgenden Maßnahmenkombinationen:

- **Schulen** sollten zu 10% geschlossen sein.
- Die Effektivität der **Kontakt nachverfolgung** muß im Bereich von 60-80% liegen. Der genaue Wert hängt davon ab, wieviel Prozent der Bevölkerung tatsächlich im Alltag OP-Masken tragen.
- Die Berechnungen ergeben, dass die notwendige Intensität bei der **Maskenpflicht** (oder der prozentuale Anteil der maskentragenden Bevölkerung) abhängig ist von der Effektivität der Kontakt nachverfolgung. Wenn eine sehr effektive Kontakt nachverfolgung gewährleistet ist (>80%), dann könnte man es sich leisten, dass kaum noch Menschen eine Maske tragen. Wenn die Kontakt nachverfolgung aber nur zu 60% effektiv arbeitet, dann müssen - für eine Pareto-optimale Lösung in diesem Modell - alle Menschen eine Maske tragen.

Die folgenden Grafiken in Abb. 6 zeigen die berechnete Pareto-optimale Lösung für das beschriebene Modell:

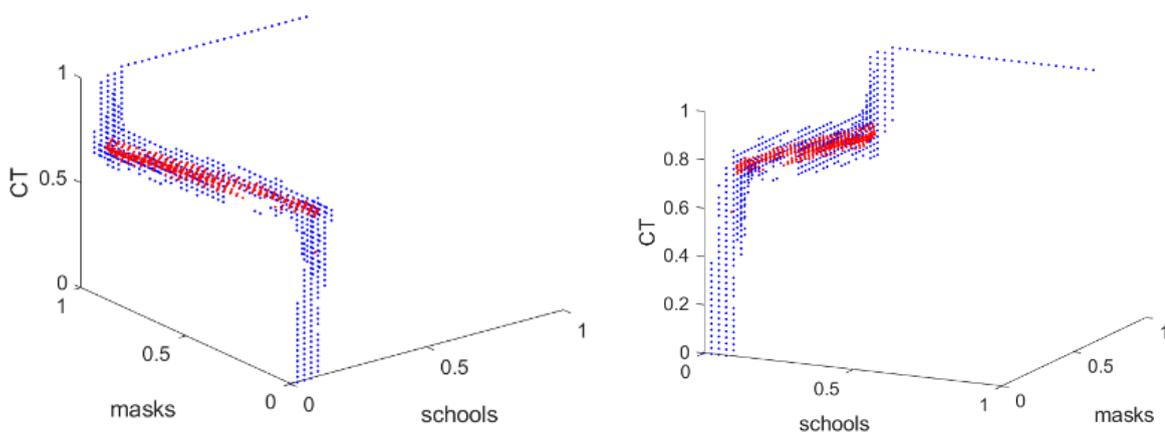


Abbildung 6: Pareto-optimale Lösung; CT steht für Contact Tracing (= Kontaktnachverfolgung)

Folgt man dem blauen Balken, sieht man, dass zuerst die Kontakt nachverfolgung auf ca. 60 bis 80% gesetzt werden muss. Dabei ist zu erkennen, dass 60 % ausreichen, wenn dafür die Maskenpflicht auf 100% gesetzt wird. Will man gar keine Maskenpflicht (also 0%), dann muss 80% Kontakt nachverfolgung gewährleistet werden. Wichtig zu beobachten: 100% Kontakt nachverfolgung wäre für die Infektionskosten günstig, aber für die SÖ-Kosten ist das zu teuer und wird daher von der Pareto-Optimierung nicht vorgeschlagen.

6.3 Ausblick

Der hier vorgestellte Ansatz legt die Grundlage für weitere Forschung in diesem Bereich und bietet die Möglichkeit für eine Vielzahl von Modellen verschiedenster Komplexitätsstufen und Ausprägungen. Insgesamt sind wir damit nun in der Lage, die jeweiligen Aspekte bzw. Arten von Maßnahmen gegeneinander zu testen, um optimale Maßnahmenkombinationen unter Beachtung teilweise gegensätzlicher Kostenarten zu bestimmen. Zur tatsächlichen Festlegung der betrachteten Kosten müßten aber sicherlich weitere Experten aus den jeweiligen Fachrichtungen herangezogen werden.

Zu beachten ist allerdings, dass das hier vorgestellte Modell offensichtlich eine stark vereinfachte Approximation an die Wirklichkeit ist. Beispielsweise dürfte klar sein, dass selbst für die wenigen hier betrachteten Maßnahmen die jeweilige Intensität nicht immer nur durch eine einzelne Zahl dargestellt werden kann - z.B. gibt es nicht nur offene oder geschlossene Schulen, sondern auch Wechselunterricht, Lüftungssysteme etc.

7 Quellen

- Bendavid, Eran, Christopher Oh, Jay Bhattacharya, and John P. A. Ioannidis. 2021. "Assessing Mandatory Stay-at-Home and Business Closure Effects on the Spread of COVID-19." *European Journal of Clinical Investigation*, January, e13484.
- 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>.
- Davies, Nicholas G., Sam Abbott, Rosanna C. Barnard, Christopher I. Jarvis, Adam J. Kucharski, James D. Munday, Carl A. B. Pearson, et al. 2020. "Estimated Transmissibility and Severity of Novel SARS-CoV-2 Variant of Concern 202012/01 in England." *bioRxiv*. medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2020.12.24.20248822>.
- Köhler, Johannes, Lukas Schwenkel, Anne Koch, Julian Berberich, Patricia Pauli, and Frank Allgöwer. 2020. "Robust and Optimal Predictive Control of the COVID-19 Outbreak." *Annual Reviews in Control*, December. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.11.002>.
- Lelieveld, Jos, Frank Helleis, Stephan Borrmann, Yafang Cheng, Frank Drewnick, Gerald Haug, Thomas Klimach, Jean Sciare, Hang Su, and Ulrich Pöschl. 2020. "Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (21). <https://doi.org/10.3390/ijerph17218114>.
- Markowitz, A., and M. Hirsch. 2021. "Alternative Zum Lockdown - Neue Perspektiven Durch Corona-Selbsttests?" February 24, 2021. https://www.deutschlandfunk.de/alternative-zum-lockdown-neue-perspektiven-durch-corona.2897.de.html?dram:article_id=492660.
- Müller, Sebastian Alexander, William Charlton, Natasa Djurdjevac Conrad, Ricardo Ewert, Christian Rakow, Hanna Wulkow, Sophia Becker, Tim Conrad, Kai Nagel, and Christof Schütte. 2021. "MODUS-COVID Bericht vom 05.02.2021." Technische Universität Berlin. <https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-11376>.
- RKI. 2021a. "2. Bericht Zu Virusvarianten von SARSCoV-2 in Deutschland, Insbesondere Zur Variant of Concern (VOC) B.1.1.7." https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/DESH/Bericht_VOC_2021-02-17.pdf?__blob=publicationFile.
- . 2021b. "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.

Robert Koch Institute. 2020. "RKI - SARS-CoV-2 Steckbrief Zur Coronavirus-Krankheit-2019 (COVID-19)." 2020.

https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html.

Zeit Online. 2020. "Aerosole: So Schnell Verbreitet Sich Das Coronavirus in Innenräumen." November 26, 2020.

https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2020-11/coronavirus-aerosole-ansteckungsgefahr-infektion-hotspot-innenraeume?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F.