

MODUS-COVID Bericht vom 27.08.2021

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

1 Zusammenfassung

Die Mobilitätsdaten zeigen eine weitgehende Rückkehr zu einem normalen aushäusigen Aktivitätsniveau – wie auch im letzten Sommer (vgl. Abschnitt 2, S.2).

Die allgemeine Situation ist, insbesondere wegen der nicht genau bekannten Schutzwirkung der Impfungen gegen die reine *Übertragung* der Delta-Variante, unübersichtlich. Im schlimmsten Fall wird sich die Infektion, einschl. Ansteckungen bereits immunisierter Personen, noch schneller ausbreiten als im Herbst 2020. Glücklicherweise führen Ansteckungen bereits immunisierter Personen selten zu schweren Verläufen; es verbleiben allerdings die möglicherweise schweren Verläufe der nicht-immunisierten Personen, welche immer noch zu erheblichen Belastungen der Krankenhäuser führen können. Als wichtige Merkregel ist damit zu rechnen, dass ein relativer Anstieg der Inzidenzen von z.B. 30% pro Woche irgendwann auch zu den gleichen relativen Anstiegen der Krankenhausbelegungen führen wird; hierauf haben die Impfungen keinen Einfluss (vgl. Abschnitt 3, S. 2).

Basierend auf vorliegenden Daten für die Berliner Situation diskutieren wir einige mögliche Indikatoren für das Pandemiegeschehen. Insbesondere die Gesamtbelegung der Krankenhäuser (einschl. Normalstationen) scheint für Covid-19 ein geeigneter Indikator zu sein (vgl. Abschnitt 4, S. 4).

Basierend auf unserem ODE-Modell quantifizieren wir die Wirkung von Reisen in Hoch- bzw. Niedriginzidenzländer. Ein wichtiges Resultat ist, dass rückkehrende Personen aus Hochinzidenzländern prinzipiell die Inzidenz im Heimatland erhöhen, durch gezieltes Testen ggf. gefolgt von Isolation dies allerdings ins Gegenteil verkehrt werden kann, wenn nur die Befoligungsquote für diese Maßnahme genügend hoch ist (vgl. Abschnitt 6, S. 7).

2 Mobilitätsdaten

Die Berliner Mobilitätsdaten zeigen, dass die aushäusig verbrachte Zeit an Wochentagen mit Beginn der Sommerferien etwas gesunken ist. Zum Ende der Ferien Anfang August gab es dann wieder den entsprechenden Anstieg. Die aushäusigen Aktivitäten an den Wochentagen sind insgesamt auf einem vergleichbaren Niveau wie im selben Zeitraum in 2020. Die aktuellen aushäusigen Aktivitäten an den Wochenenden liegen etwas über dem Vorjahresniveau.

Durchschnittliche Dauer aushäusiger Aktivitäten Berlin

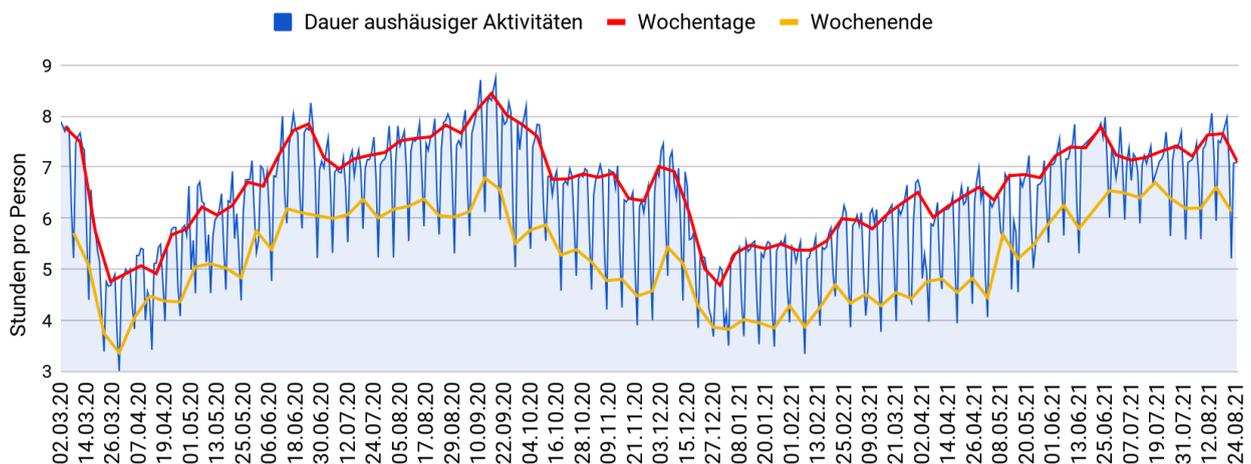


Abbildung 1: Im Mittel aushäusig verbrachte Zeit pro Person in Berlin; ermittelt aus anonymisierten Mobilfunkdaten. Rot: Mittelwerte über die Wochentage der jeweiligen Woche. Gelb: Mittelwerte über die Wochenend- und Feiertage (einschl. Samstag) der jeweiligen Woche. Eigene Darstellung; Datenquelle: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

3 Derzeitige Situation aus der Sicht unserer Modelle

Impfungen schützen stärker vor schweren Erkrankungen als vor symptomatischen Erkrankungen und stärker vor symptomatischen Erkrankungen als vor asymptomatischer Infektion. Der Schutz gegen eine asymptomatische Infektion mit der Delta-Variante liegt z.B. nur bei ca. 50 bis 60% (Elliott et al. 2021), was einem Faktor von gut 2 entspricht (die Anzahl der asymptomatischen Infektionen ist unter ansonsten gleichen Bedingungen unter Geimpften (nur) um etwas mehr als einen Faktor zwei unterdrückt gegenüber Ungeimpften).

Andererseits ist die Delta-Variante um mehr als einen Faktor 2 ansteckender als der Wildtyp. Daraus ergibt sich insgesamt, dass die **Dynamik bzgl. Ausbreitung selbst bei einer Impfquote von 100% ähnlich wäre wie im Herbst 2020**. Da wir auf absehbare Zeit eine Impfquote unter 100% haben werden, und bei den Ungeimpften die erhöhte Ansteckungswahrscheinlichkeit nicht durch die Impfung kompensiert wird, ist mit einer Ausbreitung zu rechnen, die *schneller* sein wird als im Herbst 2020.

Bei der Ausbreitung handelt es sich um einen multiplikativen Prozess. Als Folge davon sind die *relativen* Anstiege von Woche zu Woche weitgehend konstant, während die *absoluten* Anstiege immer größer werden (ein sog. *exponentielles* oder *explosives* Wachstum). Hierfür werden dann oft logarithmische Abbildungen verwendet, die auf der y-Achse etwas ungewohnt zu lesen sind, aber dafür dieses multiplikative Wachstum als gerade Linie enthalten. In einer logarithmischen Darstellung ist der Anstieg der 7-Tage-Inzidenz der letzten Wochen in etwa als gerade Linie zu erkennen - diese Linie entspricht einem Anstieg der Inzidenzen von ca. 30% pro Woche (vgl. Abb. 2).

Bei Ungeimpften gelten weiterhin die "alten" Wahrscheinlichkeiten für schwere Verläufe. Geimpfte sind weitgehend gegen schwere Verläufe geschützt. Das macht es zunächst naheliegend, die Inzidenz um die Quote der Geimpften und Genesenen zu bereinigen: Wenn z.B. bei einer Inzidenz von 100 diese Quote bei 70% liegt, dann könnte man vermuten, dass es bei diesen 70% keine schweren Verläufe gibt, und somit nur bei 30 von 100 Fällen ein schwerer Verlauf möglich ist. Dies ist aber tatsächlich falsch, weil sich Geimpfte und Genesene auch mit kleinerer Wahrscheinlichkeit überhaupt infizieren. Im extremsten Fall wären alle 100 nicht-immun und somit anfällig für schwere Verläufe, und die Vorhersage der Krankenhausbelastung basierend auf der Inzidenz hätte sich gar nicht geändert.¹ Die Realität wird wohl zwischen beiden Extremen liegen, also weder wird eine gegebene Inzidenz zur gleichen Krankenhausbelastung wie bisher führen, noch wird man sie vollständig um die Quote der Geimpften/Genesenen bereinigen können. Und die Altersabhängigkeiten von Impfquoten sowie der Wahrscheinlichkeit schwerer Verläufe spielen hier auch eine Rolle.

Es ist nicht auf einfache Weise möglich, die Inzidenz um die Quote der bereits immunisierten zu bereinigen. Im ungünstigsten Fall (alle gemeldeten Neuinfektionen bei Nicht-Immunisten; gleichmäßige Verteilung über alle Altersgruppen) sind die kritischen Werte ähnlich wie bisher.

Auf jeden Fall ändert ein möglicher Reduktionsfaktor nichts an den *relativen* Anstiegen – die Krankenhausbelegungen werden, sobald sie sich stabilisiert haben, den relativen Anstiegen bei den Inzidenzen folgen. Wenn also die Inzidenzen weiter um die derzeitigen 30% pro Woche ansteigen, dann werden auch die Krankenhauszahlen um 30% pro Woche ansteigen.

Ein bestimmter relativer Anstieg der Inzidenzen, z.B. um 30% pro Woche, erzeugt *den gleichen* relativen Anstieg der Krankenhausbelegungen, auch um 30% pro Woche.

¹ Beispielrechnung: Wir betrachten 100'000 Personen, davon 70'000 immunisiert, 30'000 nicht, sowie eine Inzidenz von 100. Im Extremfall treten alle Infektionen bei den Nicht-immunisten auf. Dann:

1. Gesamtinzidenz 100.
2. Inzidenz unter den Immunisierten: 0.
3. Inzidenz unter den Nicht-Immunisten: 333 (= $100/30'000 \cdot 100'000$).
4. Alternativ könnte man die Inzidenz der Nicht-Immunisten bezogen auf alle Personen ausweisen, das wäre dann hier wieder 100.

In DIE ZEIT (Heinen 2021) wird der Unterschied zwischen 3. und 4. thematisiert. Beide Indikatoren sind sinnvoll: 3. quantifiziert die Größe des Problems bezogen auf die entsprechende Subpopulation, 4. ist der korrekte Indikator für die Vorhersage der Krankenhausbelastung. Wichtig ist wie immer, dass genau angegeben wird, welcher der beiden Indikatoren verwendet wird.

4 Passende Indikatoren für das Infektionsgeschehen

Es wird derzeit über einen Ersatz für die Inzidenz als Indikator für die Schwere des Infektionsgeschehens diskutiert. Einige mögliche Indikatoren können wir aus unseren Erfahrungen mit Berlin gut bewerten. Dies ist insbesondere deshalb möglich, weil für Berlin auch die Gesamtbelegung (einschl. Normalstationen) mit Covid-19-Patienten immer tagesaktuell zur Verfügung stand und steht (vgl. Tagesspiegel 2021; Abb. 3). Diese Indikatoren, als mögliche Alternativen zur Meldeinzidenz, sind:

1. **Belegung aller Krankenhausbetten (inkl. Normalstationen) mit Covid-19-Patienten.** Die Notwendigkeit einer Hospitalisierung zeigt sich typischerweise bereits ca. 4 Tage nach Symptombeginn (RKI 2021a). Im Vergleich dazu ist die Verzögerung bei der Meldeinzidenz nicht viel niedriger, wenn davon ausgegangen wird, dass der Arztbesuch mit Abstrich einen Tag nach Symptombeginn erfolgt, das Laborresultat am Folgetag vorliegt und die Meldung an das Gesundheitsamt einen Tag in Anspruch nimmt - insgesamt also 3 Tage nach Symptombeginn erfolgt. Vergleiche dazu auch Abb. 3 mit Abb. 2.²
2. **Belegung der Intensivstationen/Beatmungsbetten.** Ein intensivpflichtiger Verlauf zeigt sich typischerweise bereits ca. 5 Tage nach Symptombeginn (RKI 2021a), also nur einen Tag später als ein krankenhauspflchtiger Verlauf entsprechend Punkt 1. Allerdings ist dieser Indikator für einen universell einsetzbaren Indikator zu grobkörnig, da manche Landkreise nur mit sehr wenigen Intensivbetten ausgestattet sind. Dies verfälscht die Statistik und kann einen großen Unterschied in der prozentualen Belegung verursachen.
3. Eine weitere Möglichkeit wäre die **Skalierung der Meldeinzidenz um die Quote der Nicht-Immunen**, also bei einem Anteil von z.B. $\frac{1}{3}$ Nicht-Immunen eine Multiplikation mit 3. *Dies ist allerdings kein zulässiges Vorgehen*, wie unter "Derzeitige Situation aus Sicht unserer Modelle" erläutert: Wenn die in die Inzidenz eingehenden Infizierten weitgehend nicht-immunisiert waren, dann führen sie zur gleichen Krankenhausbelastung wie vor Beginn der Impfungen. Nur wenn ein erheblicher Teil der in die Inzidenz eingehenden Infizierten bereits immunisiert war, dann kann hier mit weniger schweren Verläufen gerechnet werden. Eine reskalierte Inzidenz ist somit aus jetziger Sicht kein sinnvoller Indikator, da die korrekte Reskalierung nicht auf einfache Weise angegeben werden kann.
4. **Todesrate.** Dieser Indikator kommt für die Steuerung des *aktuellen* Infektionsgeschehens zu spät und scheidet damit hierfür aus.

Es stellt sich auch die Frage nach dem Steuerungsziel:

Soll entweder (a) die Überlastung des Gesundheitssystems vermieden werden? Oder eher (b): die Überlastung der Kontaktnachverfolgung durch die Gesundheitsämter?

Die obigen Indikatoren 1 bis 4 zielen auf die Vermeidung der Überlastung des Gesundheitssystems ab. Eine Konsequenz dieses Ansatzes wäre eine relativ schnelle Infektion der bisher nicht immunen Personen - die sog. Durchseuchung. Ob dies in der jetzigen Situation, insbesondere ohne Verfügbarkeit eines zugelassenen Impfstoffes für Personen unter 12 Jahren angemessen ist, ist eine ethische Fragestellung und muss schlussendlich von der Politik entschieden werden.

² Von der Infektion zum Symptombeginn dauert es nochmals typischerweise 5 Tage. Das bedeutet auch, dass Interventionen frühestens 9 Tage später in diesen Indikatoren sichtbar werden.

Für zweiteres, also die Vermeidung der Überlastung der Kontaktnachverfolgung, müsste geklärt werden, bis zu welcher Meldeinzidenz diese aufrecht erhalten werden kann. Die Kontaktnachverfolgung, gefolgt von Quarantäne für möglicherweise infizierte Personen, funktioniert offensichtlich zielgenauer als ein flächendeckender Lockdown und ist grundsätzlich besser akzeptiert.

Gleichzeitig mit der Belegung der Krankenhäuser sollten zusätzlich auch die **täglichen Neuaufnahmen** einbezogen werden. Dieser Wert sagt zwar weniger über die tatsächliche Belastung der Krankenhäuser aus. Er lässt aber früher einen Trend erkennen, da er nicht durch gleichzeitige Entlassungen von Patienten aus vorherigen Wellen verfälscht wird.

Weiterhin sollten die **Veränderungen** der Indikatoren von einer Woche zur nächsten betrachtet werden, also z.B. eine Steigerung um X% pro Woche. Die *relativen* Veränderungen sind dabei oft über mehrere Wochen stabil und sind relevanter für den dynamischen Prozess; die *absoluten* Veränderungen wachsen bei zunehmender Infektionsdynamik von Woche zu Woche an, und sind relevanter für die Veränderung der Belastungssituation der Krankenhäuser.

Offensichtlich gibt es mehrere Möglichkeiten, die Meldeinzidenz zu ersetzen, beispielsweise durch eine einzige Zahl (etwa Krankenhausbelegungen) oder eine Kombination von mehreren Werten. Ein typischer (mathematischer) Regler verwendet wenigstens eine Stellgröße sowie zusätzlich ihre erste Ableitung. Beispielsweise könnte das die Belegung der Krankenhäuser mit Covid-Patienten sowie die täglichen Neuaufnahmen sein - dies würde für die Verwendung einer Kombination sprechen. Allerdings dürfte es vermutlich schwierig sein, bundesweite Einigkeit zu erzielen, welche Indikatoren in welcher Gewichtung zu welchen Maßnahmen führen sollten; dies spricht also eher für nur einen Indikator.

Falls der weitere Verlauf der Pandemie durch nur einen Indikator gesteuert werden soll, so sehen wir zwei Möglichkeiten:

- Falls das Steuerungsziel die Vermeidung der Überlastung der Krankenhäuser ist, dann ist der dafür geeignete Indikator die Gesamtbelegung der Krankenhäuser (einschl. Normalstationen) mit Covid-Patienten (wobei deren maximale Belegung so festgelegt werden muss, dass daraus keine Überlastung der Intensivstationen resultiert).
- Falls hingegen das Steuerungsziel die Aufrechterhaltung der Kontaktnachverfolgung durch die Gesundheitsämter ist, dann ist der dafür geeignete Indikator weiterhin die Meldeinzidenz, evtl. erhöht gegenüber letztem Jahr wegen der inzwischen erhöhten Leistungsfähigkeit der Gesundheitsämter.

Schlussendlich sei darauf hingewiesen, dass die Belastung der Krankenhäuser (inkl. Normalstationen) bei anderen Infektionskrankheiten möglicherweise kein guter Indikator wäre, z.B. bei großem zeitlichen Abstand zwischen Symptombeginn und möglicher Hospitalisierung. Insofern bleibt die Meldeinzidenz ein guter "genereller" Indikator - auch für eine nächste mögliche Epidemie.

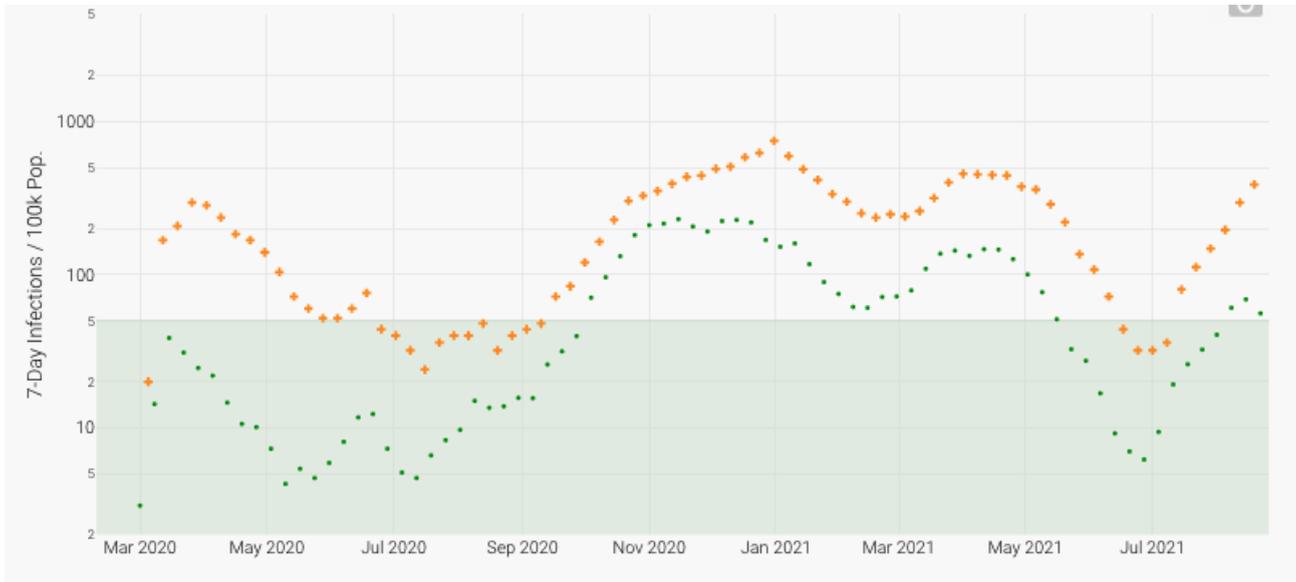


Abbildung 2: Verschiedene Indikatoren für Berlin, die auf PCR-Tests beruhen: Grün: Meldeinzidenz. Orange: Quote der positiven Tests, multipliziert mit einem plausiblen Faktor, so dass sie mit der Meldeinzidenz vergleichbar wird. Alle Werte sind auf Wochenwerte gemittelt. Man beachte die logarithmische Skala der y-Achse. Eigene Darstellung; Datenquelle: (ALM e.V 2020; RKI 2021b)

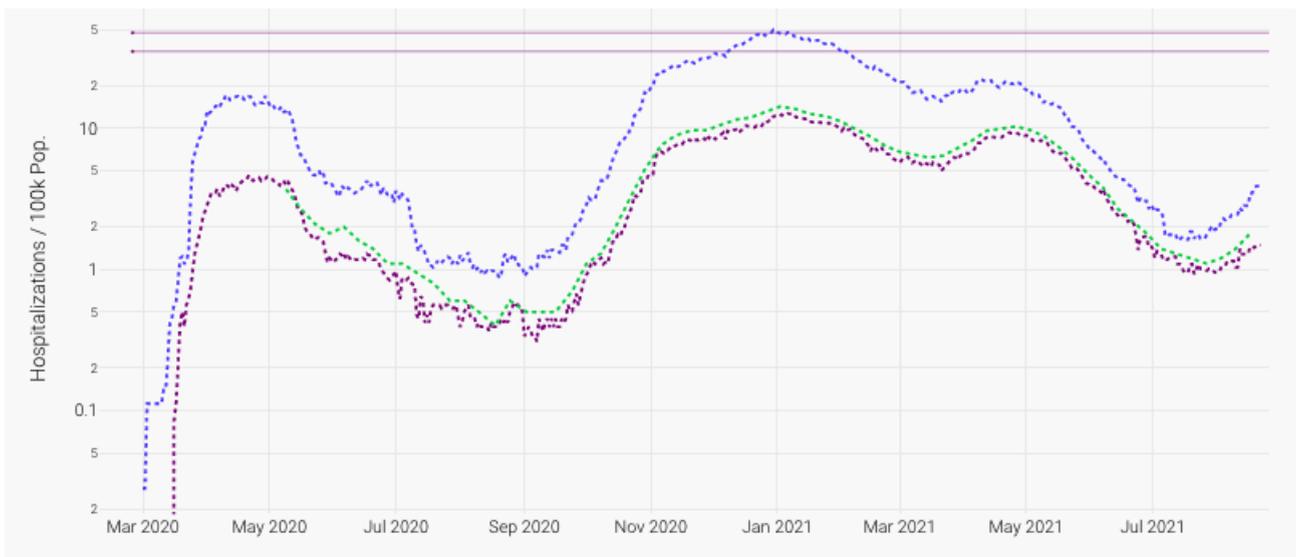


Abbildung 3: Gesamtbelegung der Krankenhäuser (einschl. Normalstationen) (blau) sowie separat der Intensivstationen (magenta und grün) mit Covid-Patienten in Berlin. Die Werte in blau und magenta beruhen auf (Tagesspiegel 2021). Die Werte in grün basieren auf (DIVI-Intensivregister 2021) Unterschiede, die aber keine strukturellen Auswirkungen haben. Man beachte die logarithmische Skala der y-Achse. – Man sieht gut, dass die Kurven sich ähnlich verhalten wie die Kurven in Abb. 2; die Belegungszahlen sind also als Indikator ähnlich gut wie die Inzidenzen. Die Tatsache, dass Anstiege leicht verspätet sichtbar werden, liegt daran, dass sie durch Abgänge aus der vorherigen Welle überlagert werden; dies ließe sich durch eine separate Ausweisung nur der Neuaufnahmen lösen. Das Problem der Grobkörnigkeit der Intensivbelegung taucht für Berlin aufgrund seiner großen Anzahl von Intensivbetten nicht auf. Eigene Darstellung.

5 Neue Version des agentenbasierten Modells

Wir haben die Sommerpause genutzt, um unser agentenbasiertes Modell einem gründlichen Update zu unterziehen. Z.B. haben wir eingebaut, dass für jede Kombination aus Impfstoff und Virusvariante die Schutzwirkungen gegen Ansteckung, symptomatischer Erkrankung sowie schwerer Erkrankung unterschiedlich sind. Allerdings ist dieses Modell noch nicht fertig kalibriert. Wir verzichten daher in diesem Bericht auf die Vorhersage von Maßnahmenwirkungen für den Herbst. Wir werden versuchen, dies so bald wie möglich nachzuholen.

6 Einfluss von Reiserückkehrern auf die Infektionsdynamik

Die 7-Tage Inzidenz lag in Deutschland von Ende Mai bis Mitte August teilweise deutlich unter 50. Dies war in vielen beliebten Urlaubsländern der Deutschen allerdings nicht der Fall - in einigen Ländern lag sie sogar zeitweise deutlich über 200 und damit etwa 4x so hoch wie bei uns. Während mehr als die Hälfte der Deutschen in 2021 ihren Urlaub innerhalb Deutschlands verbrachten oder verbringen werden, finden ca. 45% der Reisen ins Ausland statt - damit verbringen etwa 20 Millionen Menschen ihren Urlaub im Ausland (vgl. Stiftung für Zukunftsfragen 2021; "Statista" 2021). Es kann angenommen werden, dass das Infektionsrisiko im Urlaub in einem sog. Hochinzidenzland höher ist als wenn innerhalb Deutschlands verreist worden wäre. Das bedeutet, dass infizierte Reiserückkehrer einen negativen Effekt auf die Infektionsdynamik in Deutschland haben - also das Infektionsgeschehen verstärken.

Im Folgenden werden wir diesen Effekt mit unserem (in den vorherigen Berichten bereits detailliert vorgestellten) ODE³-Modell darstellen und den Einfluss von Corona-Tests bei der Einreise quantifizieren. Wir werden dies zunächst an einem hypothetischen Beispiel mit realitätsnahen Zahlen zeigen, um die Effekte zu demonstrieren. Im Anschluss werden wir ein vergleichbares Szenario mit den tatsächlichen Daten aus dem Sommer 2021 entwerfen und daraus Rückschlüsse auf das tatsächliche Geschehen ziehen.

6.1 Erweiterung des ODE-Modells

Für die folgenden Betrachtungen haben wir unser ODE-Modell um mehrere Gleichungen und um ein neues Kompartiment, **U** für **Urlaubsland** erweitert. Damit können Menschen "innerhalb des Modells" in einem anderen Land Urlaub machen. Aus diesem Urlaub kommen sie entweder gesund (bzw. ohne Corona-Infektion) oder mit einer Corona-Infektion zurück. Dies modellieren wir mit einer Reaktion von U zurück zum Kompartiment S ("Susceptibles") und von U in das Kompartiment E (die Infizierten, aber noch nicht Infektiösen). Außerdem modellieren wir, dass ein gewisser Anteil der im Urlaub Infizierten direkt in Quarantäne geschickt wird, zum Beispiel durch routinemäßige Tests bei der Einreise.

³ ODE = Ordinary Differential Equation

Die Raten dieser Reaktionen setzen wir wie folgt:

- Die Rate der Reaktion $S \rightarrow U$ heißt k_{travel} und beschreibt, wie viele Menschen in den Urlaub fahren. Diese wird je nach Szenario angepasst.
- Die Rückreaktion, d.h. die Reaktion $U \rightarrow S$, wird beschrieben durch die Rate k_{travel_back} und wird fixiert auf den Wert 0.2. Interpretiert heißt dieser Wert, dass die Menschen im Durchschnitt nach $1/0.2 = 5$ Tagen aus dem Urlaub zurückkehren.
- Die Rate k_{E_travel} beschreibt, wie viele Menschen sich im Urlaub infizieren und **ungetestet** zurückkehren, also am Infektionsgeschehen *in Deutschland* teilnehmen.
- Schließlich beschreibt die Rate $k_{travel_quarantine}$ die Anzahl an Menschen, die sich im Urlaub infizieren, aber getestet und somit "aus dem Verkehr gezogen" werden: dies wird beschrieben durch die Reaktion $U \rightarrow QE$. Wir nehmen an, dass $QF * k_{travel_quarantine} = (1-QF) * k_{E_travel}$ ist, wobei $QF = \text{Quarantäne-Faktor}$ und einen Wert zwischen 0 und 1 annimmt. D.h., wenn wir modellieren wollen, dass alle Reisenden getestet werden, ist $QF = 1$ und alle im Urlaub infizierten gelangen nach Rückkehr sofort in das Kompartiment QE.

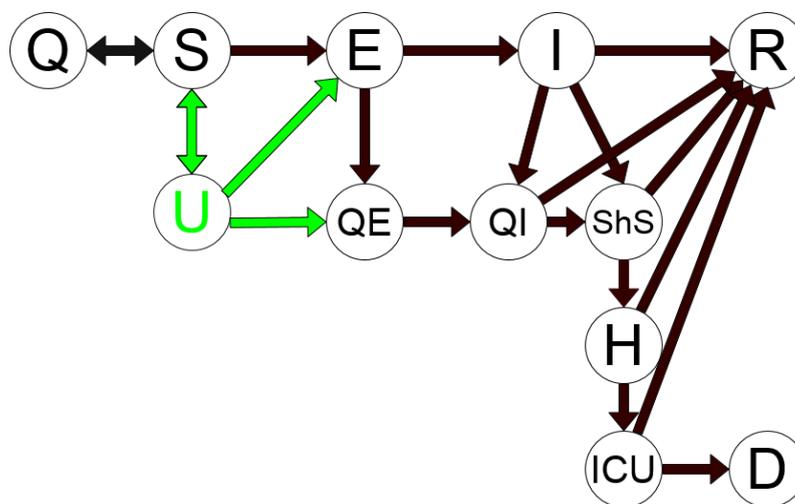


Abbildung 4: Das um Urlaubsrückkehrer erweiterte Modell. Neben einem neuen Kompartiment, U für Urlaubsland, gibt es vier neue Übergänge: von S nach U und zurück (modelliert Menschen aus Deutschland, die in den Urlaub fahren und nicht infiziert zurückkehren), von U nach E (modelliert Urlauber, die sich infizieren und unbemerkt zurückkehren) und von U nach QE (modelliert Urlauber, die bei Rückkehr getestet werden und sich in Quarantäne begeben).

6.2 Szenario 1: Hypothetische "Sommerferien"

In unserem ersten hypothetischen Beispiel modellieren wir einen Zeitraum von 6 Wochen ("Sommerferien") und nehmen an, dass in dieser Zeit 3,75 Millionen Personen ins Ausland reisen⁴. (Im ODE Modell setzen wir dazu den Parameter $k_{travel}=0,001625$.) Weiter nehmen wir vereinfacht an, dass es nur zwei Reiseziele gibt: ein Urlaubsland H mit deutlich höherer Inzidenz und ein Urlaubsland N mit deutlich niedriger Inzidenz - beides im Bezug auf die Inzidenz in Deutschland. In diesem hypothetischen Modell würde sich die 7-Tage-Inzidenz **ohne den Einfluss der Reisen** in den betrachteten sechs Wochen in etwa verdoppeln und am Ende dieses Zeitraums bei 102 liegen (siehe Abb. 5).

⁴ Zugrunde gelegt werden 20 Mio. Auslandsreisen (verreiste Personen) in 2021, davon 50% im Sommer bzw. ca. 2,5 Mio Reisen pro Sommermonat.

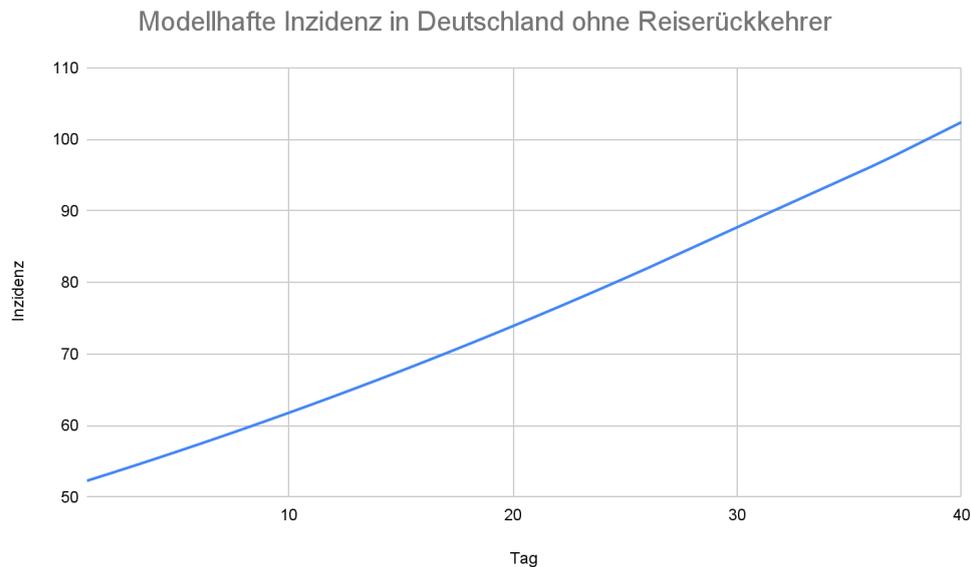


Abbildung 5: Modellhafte Inzidenz in Deutschland über einen Zeitraum von sechs Wochen. Die Inzidenz steigt stetig an und verdoppelt sich in etwa. Hierbei wurden noch keine Reiserückkehrer einbezogen.

Mit diesen Annahmen betrachten wir zwei Fälle in diesem "Sommerferien"-Szenario:

Fall 1: Urlaub im Hochinzidenzgebiet

Zuerst nehmen wir an, dass die Reisenden in Länder reisen, die im Durchschnitt eine deutlich höhere Inzidenz als Deutschland haben. Dies traf auf viele beliebte Urlaubsländer der Deutschen im Juni und Juli zu. Wir nehmen als Durchschnittsinzidenz dieser Hochinzidenz-Reiseländer einen Wert von 150 an - das ist etwas mehr als doppelt so hoch wie der deutsche Inzidenzwert von 66 am 26.8. (Im Modell setzen wir $k_{E_travel} = 0.00022$.)

Bei 3,75 Millionen Reisenden in den modellierten sechs Wochen und einer durchschnittlichen Verweildauer von 5 Tagen befinden sich damit ca. 469.000 Menschen gleichzeitig im Urlaub. Bei einer Inzidenz von 150 würden sich davon laut Modell ca. 100 Menschen pro Tag mit dem Coronavirus infizieren.⁵ Insgesamt würden sich also ca 4.000 Menschen im Urlaub anstecken.

Im Ergebnis würde dies nach sechs Wochen zu einer Erhöhung der Inzidenz in Deutschland von 102 auf 108 führen.

Fall 2: Urlaub im Niedriginzidenzgebiet

Nehmen wir nun an, dass die Reisenden in ein Niedriginzidenzland reisen. Als Durchschnitt nehmen wir einen Inzidenzwert von 25 für diese Länder an - etwa $\frac{1}{3}$ des deutschen Inzidenzwertes am 26.8. (Dafür setzen wir den neuen Parameter $k_{E_travel} = 0,000035$). Dies bedeutet, dass bei 469.000 gleichzeitig verreisten Deutschen sich pro Tag durchschnittlich 17 Menschen infizieren, insgesamt also 680 Menschen mit einer Corona-Infektion zurück nach Deutschland reisen.

Im Ergebnis würde dies die Inzidenz in Deutschland nach sechs Wochen auf einen Wert von 96 **verringern** - da ein erheblicher Teil der Deutschen (hier: etwa 0,5% der Bevölkerung über 6 Wochen) zeitweise einem niedrigeren Infektionsgeschehen ausgesetzt waren als in der Heimat.

⁵ 150 Ansteckungen/ 7 Tage / 100000 Personen x 469000 Personen = 100,5 pro Tag.

Inzidenz in Deutschland bei verschiedenem Reiserückkehrer-Eintrag

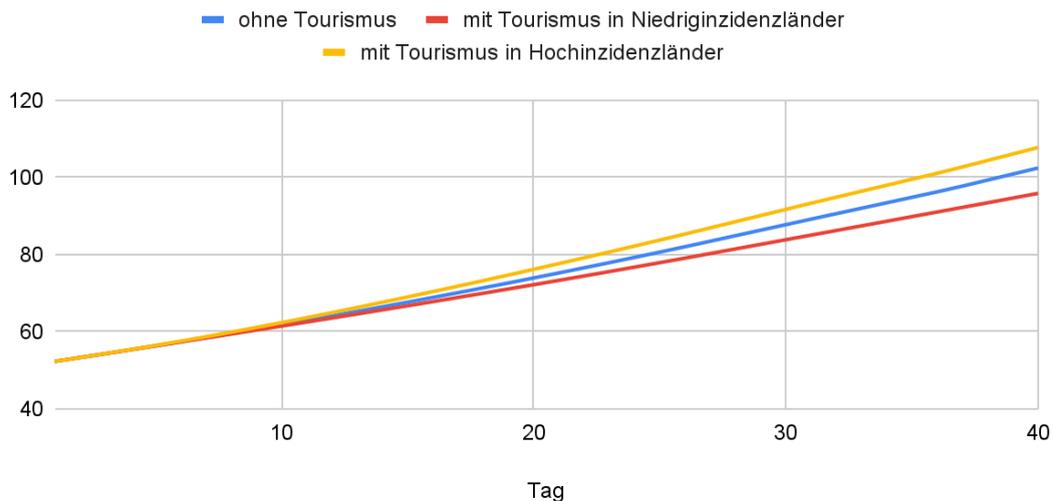


Abbildung 6: Inzidenz in Deutschland über sechs Wochen hinweg bei Eintrag von Infektionen aus verschiedenen Regionen.

Einfluss von Test- und Quarantänemaßnahmen für Reiserückkehrer

Wie oben beschrieben haben Reiserückkehrer aus Hochinzidenzgebieten einen nicht zu vernachlässigen Einfluss auf die Infektionsdynamik in Deutschland, da die Wahrscheinlichkeit einer Corona-Infektion höher als in Deutschland ist. Seit dem 1. August müssen alle (nicht geimpften oder genesenen) Reiserückkehrer bei der Einreise einen negativen Corona-Test nachweisen. Das folgende Beispiel verdeutlicht, dass dieser Schritt - theoretisch - sogar den Inzidenzwert in Deutschland verringern kann.

Nehmen wir an, dass nur jede zehnte im Ausland mit dem Corona-Virus infizierte Person das Virus auch tatsächlich in die deutsche Bevölkerung einträgt. Die restlichen 90% der positiven Fälle werden erkannt und in Quarantäne abgesondert. Bezogen auf das o.g. "Sommerferien"-Szenario bedeutet das, dass bei Rückreisen aus Hochinzidenzgebieten statt 4.000 Menschen "nur" 400 Menschen das Virus heimbringen. Effektiv reduziert sich dadurch die Inzidenz in Deutschland von 102 (ohne Reisen) auf 96. Die konsequente Testung hat also zur Folge, dass sich die Inzidenz in Deutschland verringert, sogar unter den Wert, den es ohne Reisende haben würde.

Insgesamt lässt sich zeigen, dass eine zunehmende Effektivität der Test- und Quarantänemaßnahmen bei Reiserückkehrern sich direkt (linear) auf die Inzidenz in Deutschland auswirkt (siehe Abb. 7).

Einfluss einer zunehmenden Effektivität der Testung von Reiserückkehrern aus Hochinzidenzgebieten auf die Inzidenz in Deutschland

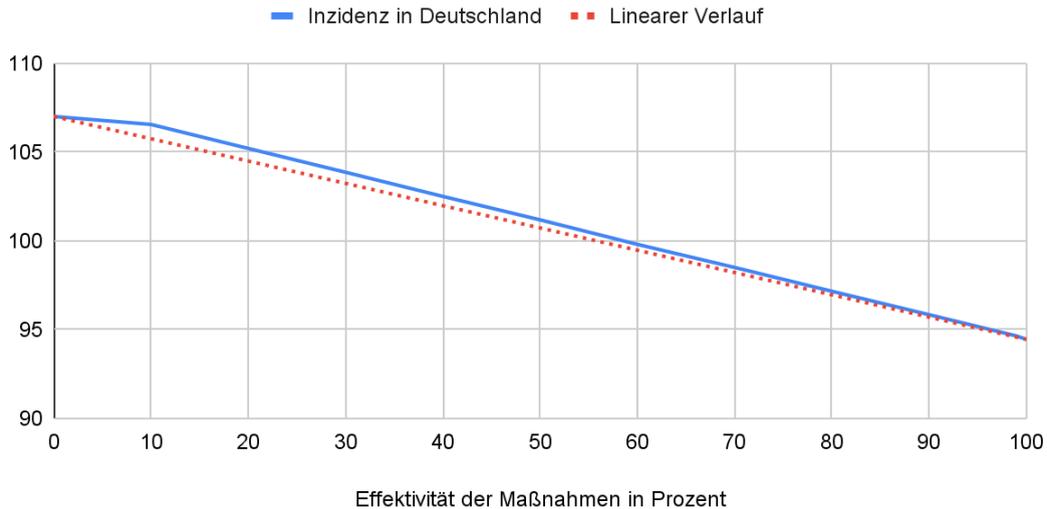


Abbildung 7: Effektivität der Test- und Quarantänemaßnahmen bei Reiserückkehrern geplottet gegen die Inzidenz in Deutschland nach sechs "Reisewochen". 100% Effektivität bedeutet, dass **alle** infizierten Rückreisenden identifiziert und in Quarantäne abgesondert werden. Ein solch rigoroses Testen führt dazu, dass die Inzidenz in Deutschland sogar unter den Wert sinkt, den es ganz ohne Reisende hätte. Zum Vergleich ist in rot ein linearer Verlauf geplottet.

6.3 Szenario 2: Realitätsnahe Urlaubszeit

Im ersten "Sommerferien" Szenario haben wir den Verlauf der 7-Tage Inzidenzen so modelliert, dass der beschriebene Effekt klar zu erkennen war. Im folgenden Szenario werden wir für den betrachteten 6-Wochen-Zeitraum die tatsächlich aufgetretenen Inzidenzen (vom 16.7.-26.8.21) zugrunde legen und damit zwei Fragen nachgehen:

1. **Wie hätte sich die Inzidenz entwickelt, wenn zusätzlich 3.5 Millionen Reiserückkehrer aus Hochinzidenzgebieten (wie im vorherigen Szenario) in das Infektionsgeschehen eingeflossen wären?**
2. **Wenn wir annehmen, dass diese Reiserückkehrer tatsächlich am Infektionsgeschehen teilgenommen haben, wie hätte die Inzidenz sich *ohne sie* entwickelt?**

Entwicklung mit zusätzlichen Reiserückkehrern aus Hochinzidenzgebieten

Um die erste Frage zu beantworten, passen wir unser Modell **ohne Reisende** an die tatsächlichen Daten der betrachteten 6 Wochen an. Durch die Analyse der Reise-Reaktionen (im ODE-Modell mit den o.g. Parameterwerten für k_{travel} und $k_{E_{travel}}$) können wir feststellen, welche Auswirkung die (mit dem Corona-Virus infizierten) Reiserückkehrer auf die deutsche 7-Tage-Inzidenz gehabt hätten. **In dieser Modellrechnung hätte sich der Inzidenzwert nach 6 Wochen von 58 auf 66 erhöht.**

Inzidenz in Deutschland der letzten 6 Wochen mit und ohne Reiserückkehrern

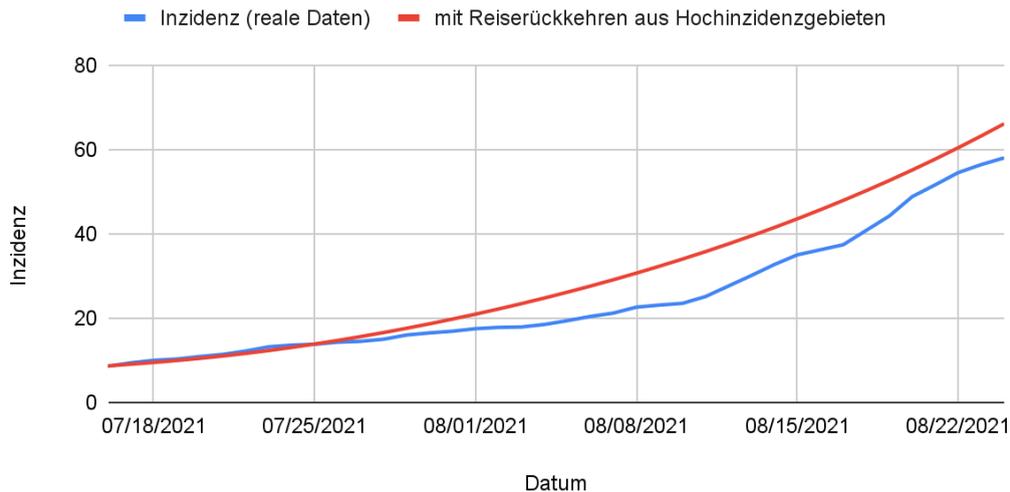


Abbildung 8: Modellhafter Verlauf der Inzidenz in Deutschland, wenn zusätzlich zum tatsächlichen Infektionsgeschehen auch noch Reiserückkehrer aus Hochinzidenzgebieten am Infektionsgeschehen teilgenommen hätten.

Entwicklung ohne Reiserückkehrer aus Hochinzidenzgebieten

In diesem Teil wollen wir mittels unseres Modells berechnen, wie sich die die 7-Tage-Inzidenz *ohne Reiserückkehrer aus Hochinzidenzgebieten* entwickelt hätte. Hierfür passen wir das Modell wie im vorherigen Teil an die echten Daten an - diesmal aber beziehen wir den "Urlauber-Teil" mit ein (Kompartiment U im Modell, inkl. der beteiligten Reaktionen und den entsprechenden Raten). Die dadurch ermittelten Parameterwerte werden fixiert. Um in der Simulation unseres ODE-Modells das gewünschte Szenario zu erreichen, wird der "Urlauber-Teil" des Modells deaktiviert. **Im Ergebnis verringert sich die Inzidenz von 58 auf 49** (siehe Abb. 9).

Inzidenz in Deutschland der letzten 6 Wochen ohne Reiserückkehrer

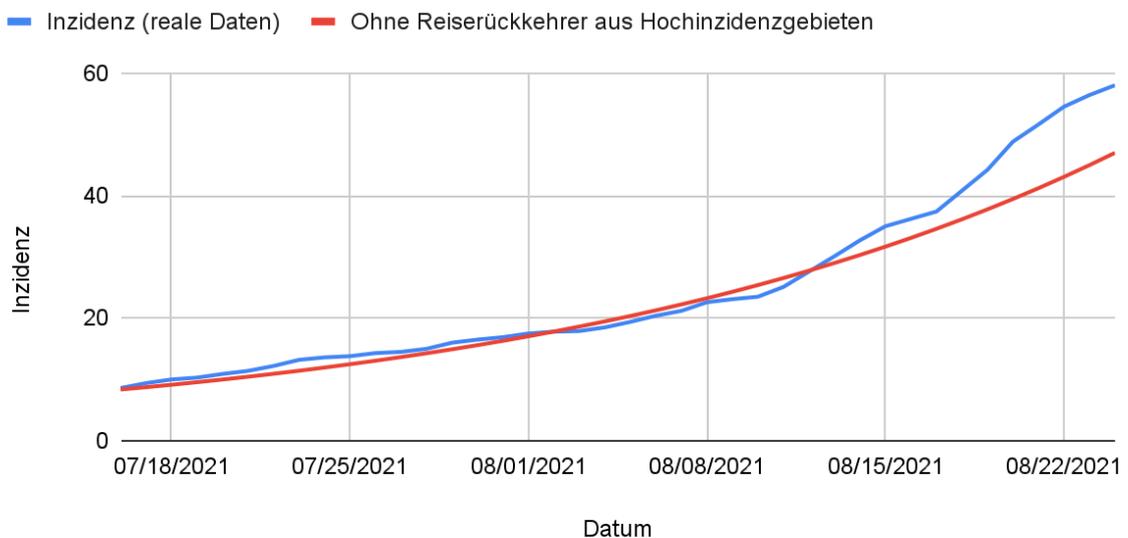


Abbildung 9: Modellhafter Verlauf der Inzidenz in Deutschland, wenn keine Reiserückkehrer aus Hochinzidenzgebieten am Infektionsgeschehen teilgenommen hätten.

6.4 Schätzung der tatsächliche Inzidenz in den Reiseländern

Im wöchentlichen Lagebericht des RKI vom 19.08.21 wird angegeben, dass der Anteil der Reiserückkehrer am Gesamtinfektionsgeschehen in den vergangenen Wochen (Meldewoche 29-32) durchschnittlich 13% betragen hat (vgl. RKI 2021c, S. 7). Unter dieser Annahme und der oben getroffenen Annahme von 3,5 Mio. Urlaubern können wir mit unserem Modell die durchschnittliche Inzidenz in den Urlaubsländern schätzen. Dazu passen wir unser Modell an die tatsächlichen Daten ohne den Beitrag der Reiserückkehrer an. Dafür deaktivieren wir den "Urlauber-Teil" des Modells und benutzen alle Modell-Parameter für die bestmögliche Anpassung (den besten "Fit") an die Daten. Anschließend aktivieren wir den "Urlauber-Teil" wieder und fitten die tatsächlichen Inzidenzen **mit** dem Reiserückkehrer-Beitrag nur mit dem neuen Parameter k_{E_travel} . **Eine Analyse ergibt, dass in den Urlaubsländern eine durchschnittliche Inzidenz von 83 vorgeherrscht hat** - allerdings nur, wenn die oben getroffenen Annahmen erfüllt sind. Die folgende Abbildung 10 zeigt die relativ gute Übereinstimmung des angepassten Modells an die tatsächlichen Daten.

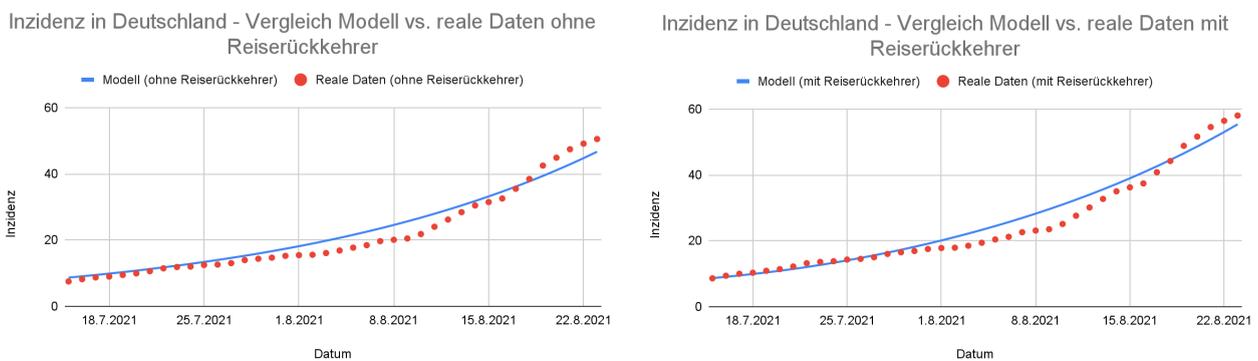


Abbildung 10: Fit des ODE-Modells an die tatsächlichen Inzidenzen in Deutschland der letzten sechs Wochen. Da das RKI ausgibt, dass ca. 13 % der Infektionen von Reiserückkehrern stammen, ziehen wir diesen Wert von den tatsächlichen Inzidenzen ab, um die realen Daten ohne Reiserückkehrer zu erhalten. Wir fitten das Modell an beide Kurven.

6.5 Fazit

Die gezeigten Szenarien und Beispiele zeigen deutlich, dass Reiserückkehrer aus Hochinzidenzgebieten die 7-Tage-Inzidenz erhöhen kann, wenn keine konsequente Testpflicht bei der Einreise etabliert wird. Umgekehrt zeigen unsere Ergebnisse, dass eine konsequente Testung der Reiserückkehrer dazu führen kann, dass die Inzidenz hierzulande sogar niedriger wird. Außerdem wird deutlich, dass für Reisen in Länder, in denen die Inzidenz niedriger ist als in Deutschland, im Prinzip keine Testpflichten notwendig wäre.

7 Quellen

- ALM e.V. 2020. "ALM-Datenerhebung." May 29, 2020.
<https://www.alm-ev.de/aktuell/corona-themenseite/datenerhebung-alm-ev/>.
- DIVI-Intensivregister. 2021. "DIVI-Intensivregister." 2021. <https://www.divi.de/register/tagesreport>.
- Elliott, Paul, David Haw, Haowei Wang, Oliver Eales, Caroline E. Walters, Kylie E. C. Ainslie, Christina Atchison, et al. 2021. "REACT-1 Round 13 Final Report: Exponential Growth, High Prevalence of SARS-CoV-2 and Vaccine Effectiveness Associated with Delta Variant in England during May to July." 2021.
https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/90800/2/react1_r13_final_preprint_final.pdf.
- Heinen, Nike. 2021. "2G-Regel in Hamburg: Die Welle Der Geimpften." ZEIT ONLINE. August 26, 2021.
<https://www.zeit.de/hamburg/2021-08/2g-regel-hamburg-corona-massnahme-vorsicht-skepsis>.
- RKI. 2021a. "Epidemiologischer Steckbrief Zu SARS-CoV-2 Und COVID-19. Zeitintervalle Bei Der Behandlung." 2021.
https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html;jsessionid=322C72668A8C88A6B4F5E3ABDE8AF474.internet061?nn=13490888.
- . 2021b. "Fallzahlen in Deutschland." 2021.
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=f10774f1c63e40168479a1feb6c7ca74>.
- . 2021c. "Lagebericht Des RKI Zur Coronavirus-Krankheit Vom 19.08.2021."
https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Situationsberichte/Wochenbericht/Wochenbericht_2021-08-19.pdf?__blob=publicationFile.
- Senozon. 2021. "The Senozon Mobility Model." The Senozon Mobility Model. 2021.
<https://senozon.com/en/model/>.
- "Statista." 2021. 2021. <https://de.statista.com/>.
- Stiftung für Zukunftsfragen. 2021. "Tourismusanalyse 2021." 2021.
<http://www.tourismusanalyse.de/>.
- Tagesspiegel. 2021. "Die Zahl Der Coronapatienten in Berliner Kliniken." Tagesspiegel Innovation Lab. January 15, 2021. <https://datawrapper.dwcdn.net/QTkUC/7830/>.