



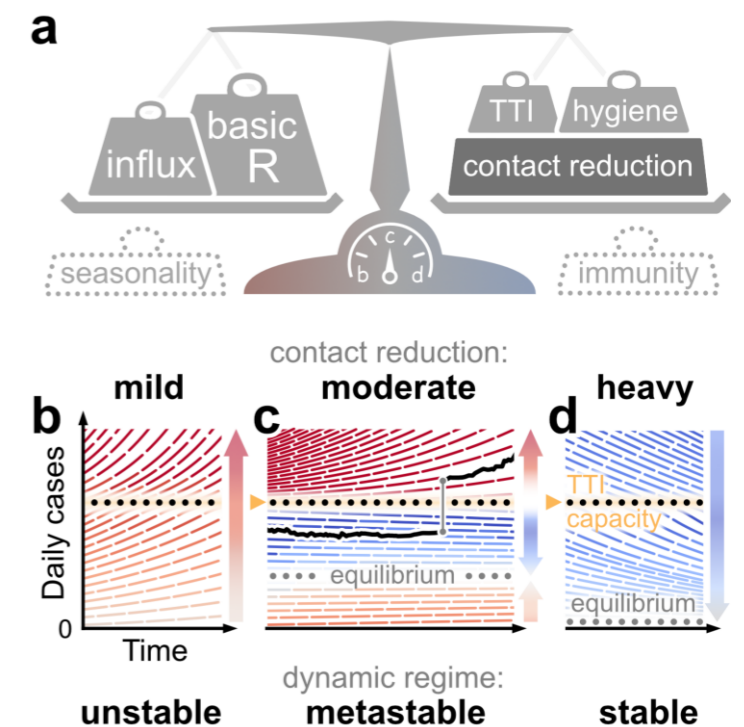
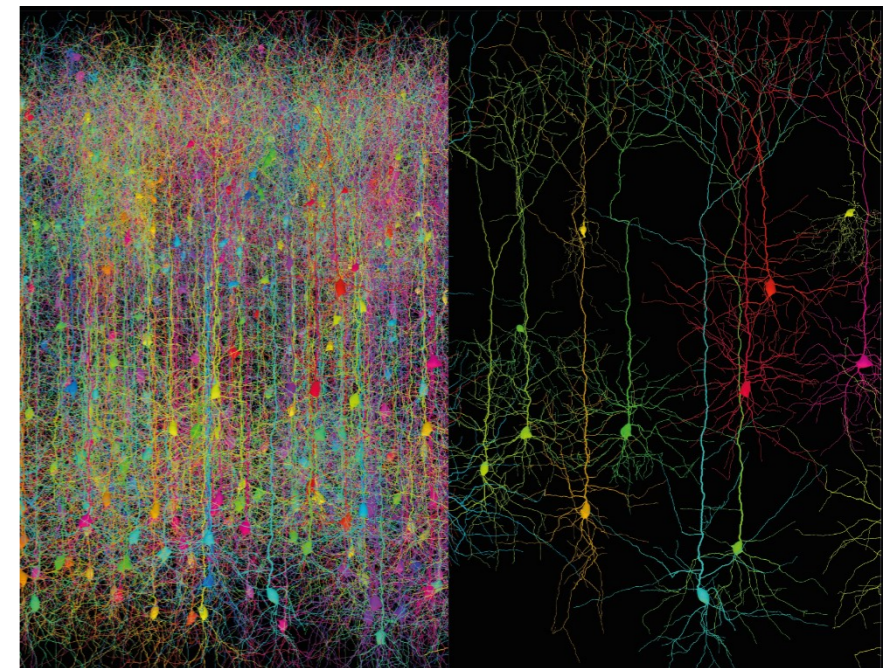
Die Ausbreitung von
SARS-CoV-2
abschätzen,
vorhersagen und
eindämmen

Viola Priesemann

Max-Planck-Institut für
Dynamik und
Selbstorganisation
Göttingen

Übersicht

- **Ausbreitungsprozesse:**
Von der Theorie neuronaler Systeme zur Analyse von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen herleiten:**
Der Beitrag von Test-Trace-Isolate (TTI) – also von „Testen-Kontaktnachverfolgen-Isolieren“ – zur Eindämmung von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen abschätzen und vorhersagen:**
Wieviel tragen einzelne „Nicht-Pharmazeutische Interventionen“ (NPI) zur Eindämmung bei?
- Wo stehen wir, und was bringen die kommenden Monate?



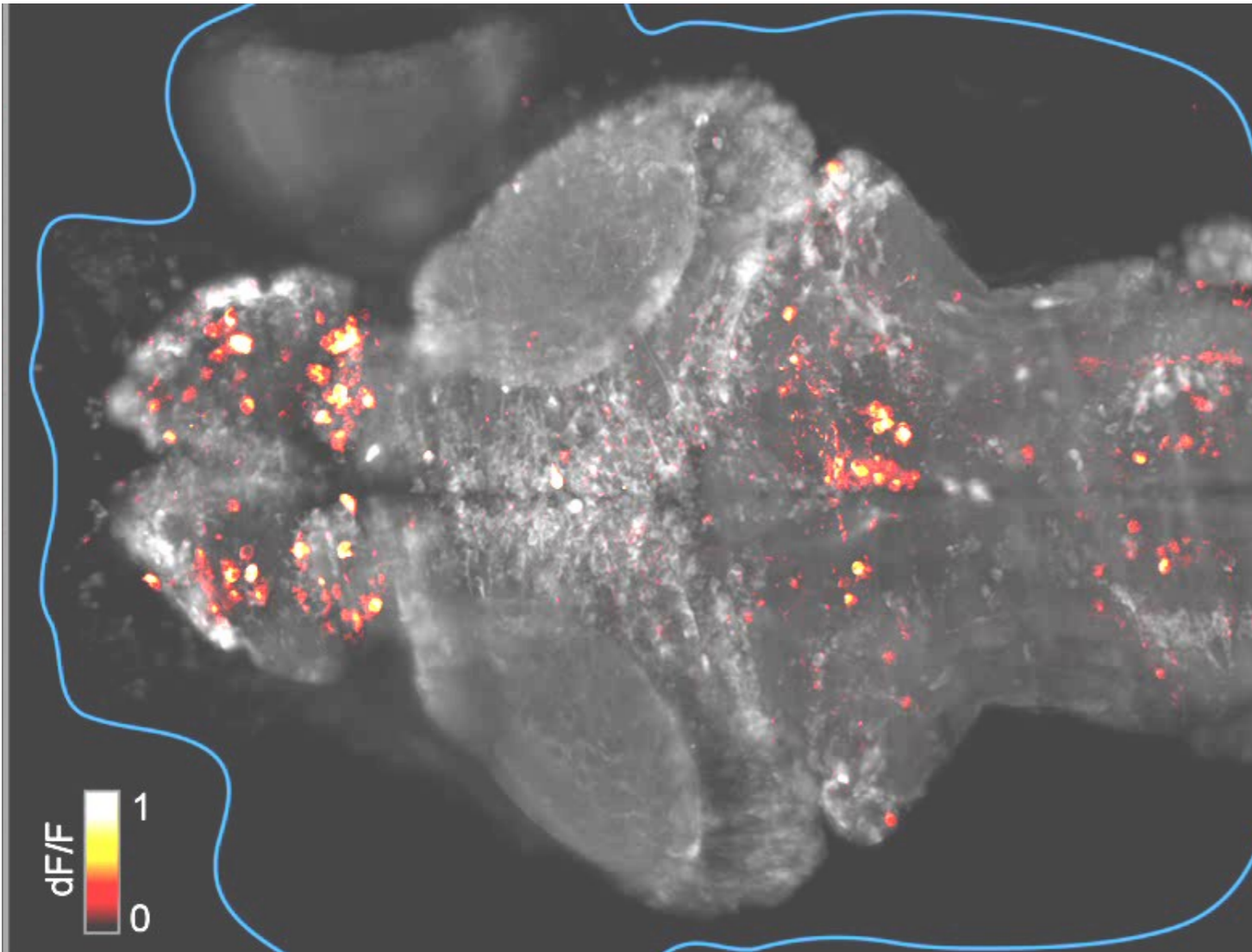
Kollektive Gehirndynamik

Lichtscheibenfluoreszenzbildgebung in einer Zebrafischlarve

100.000 Neuronen (80 Mrd. im Menschen)

100 – 10.000

Verbindungen/Neuron

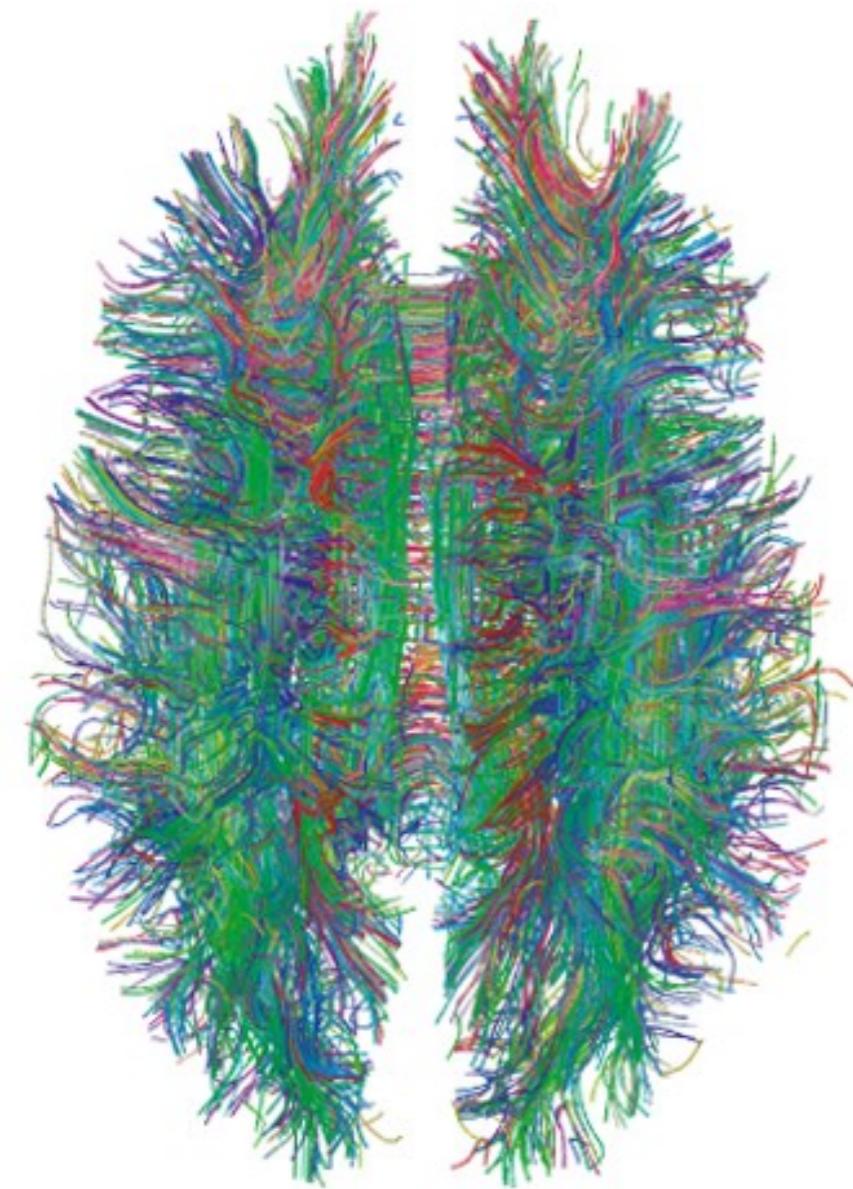


Interaktionen:

- pulsähnlich (“spikes“)
- gerichtet
- zeitverzögert
- plastisch (lernen!)

Hochdimensionale Topologie
→ Schwer, kollektive
Eigenschaften zu
charakterisieren

Gehirnnetzwerke & Reisenetzwerke

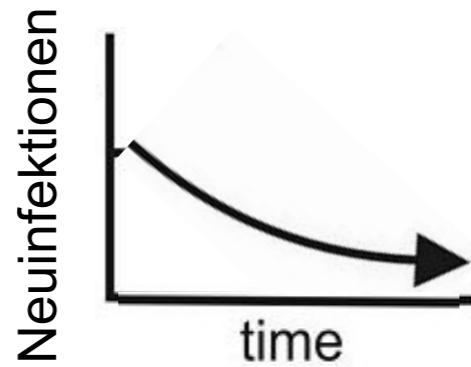
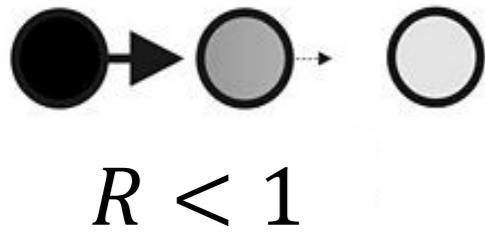


Ausbreitungsprozesse

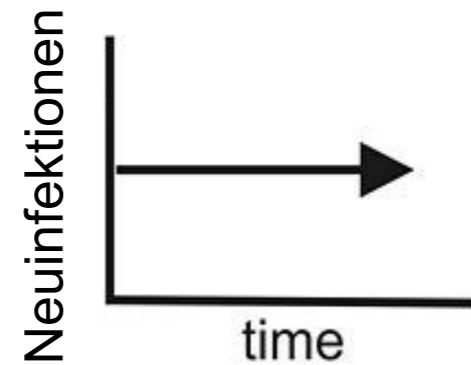
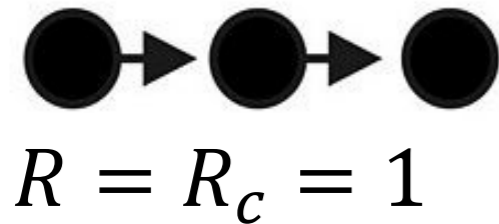
Reproduktionszahl R :

Eine infizierte Person infiziert im Mittel R

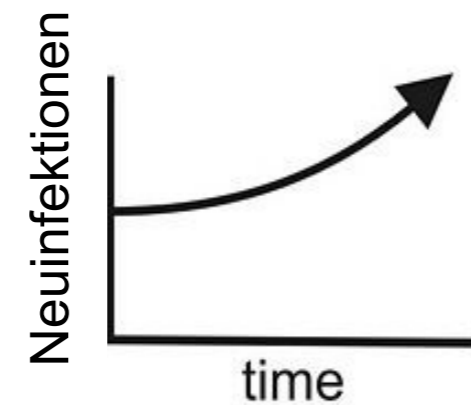
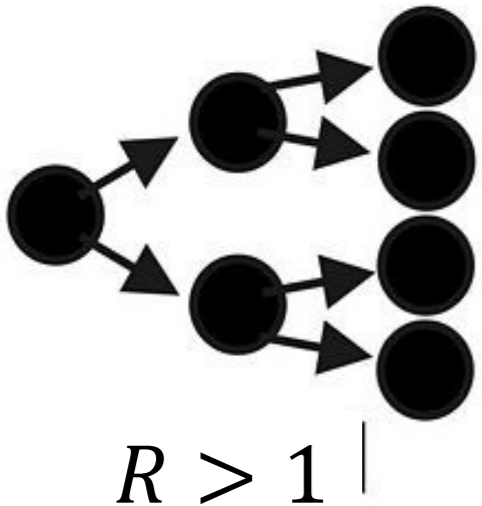
Personen in der nächsten Generation.



Rückgang



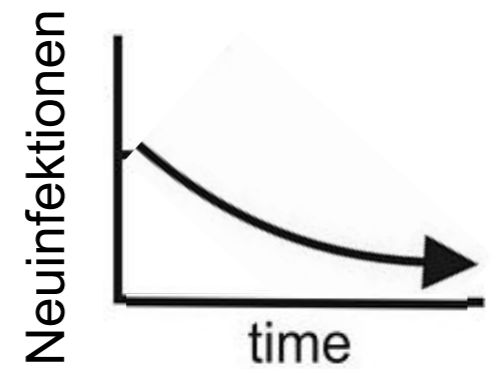
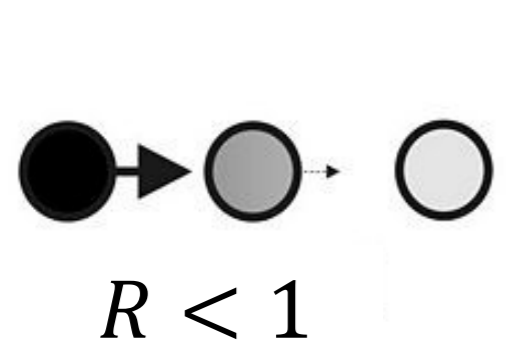
“kritischer Übergang”



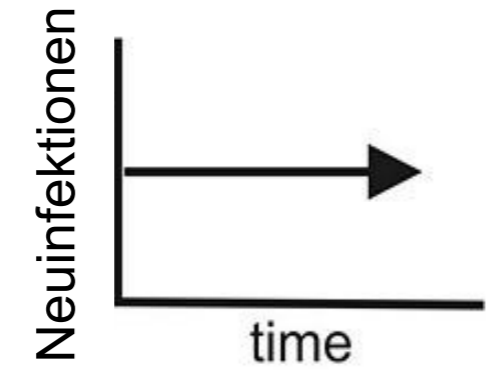
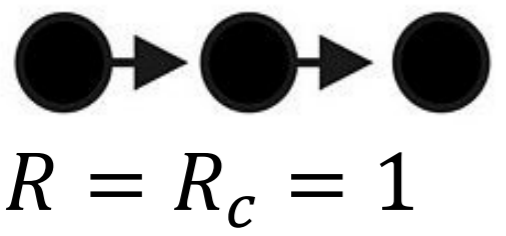
Wachstum

Ausbreitungsprozesse

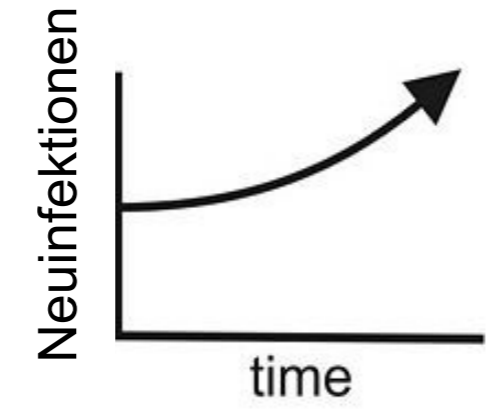
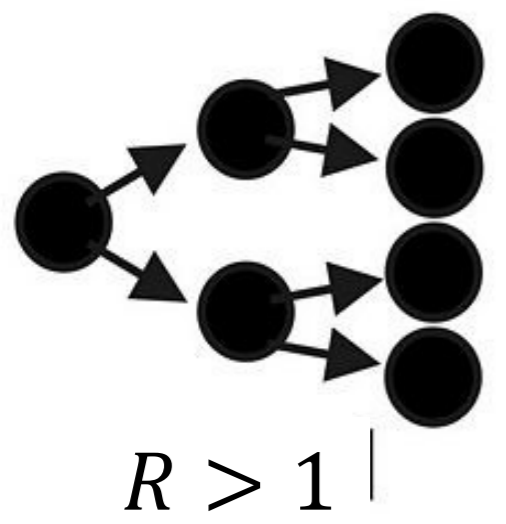
Reproduktionszahl R :
 Eine infizierte Person infiziert im Mittel R
 Personen in der nächsten Generation.



Rückgang



“kritischer Übergang”



Wachstum

Verzweigungsprozess

Aktivität $A(t)$ in System:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{A(t-1)} Y_{i,t} + h_t$$

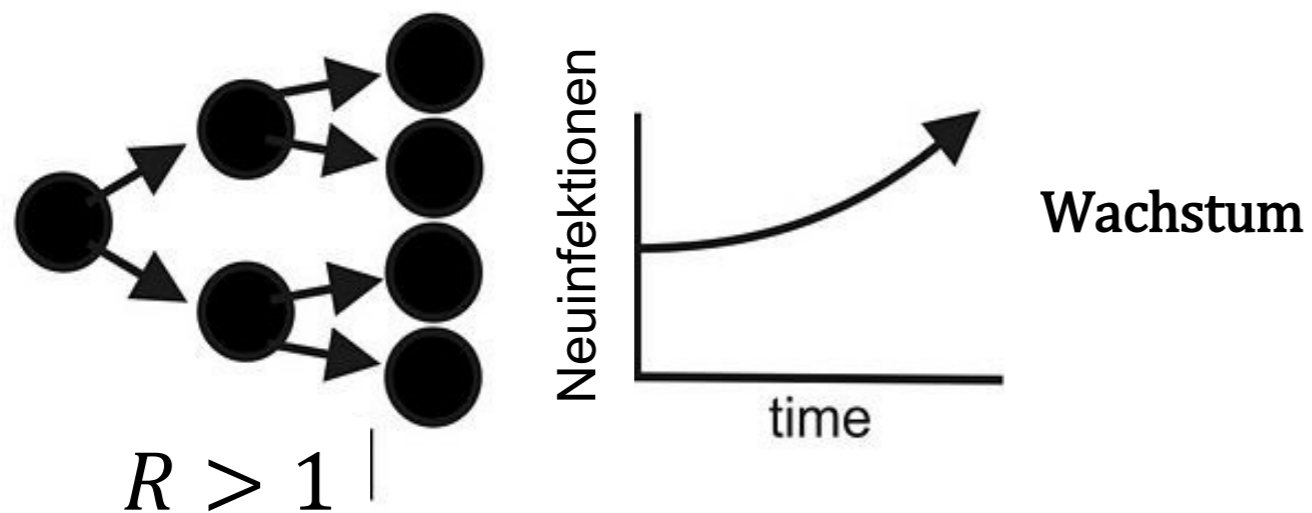
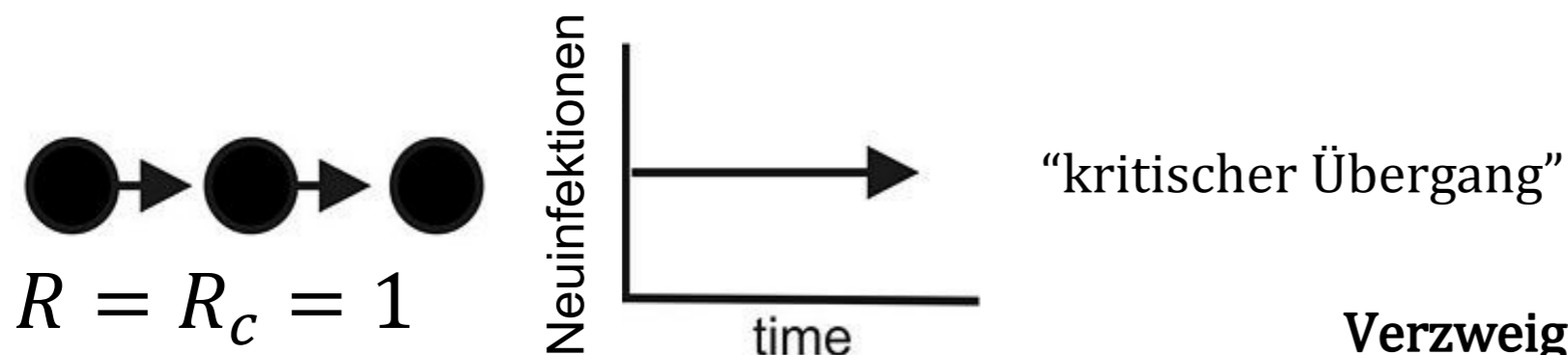
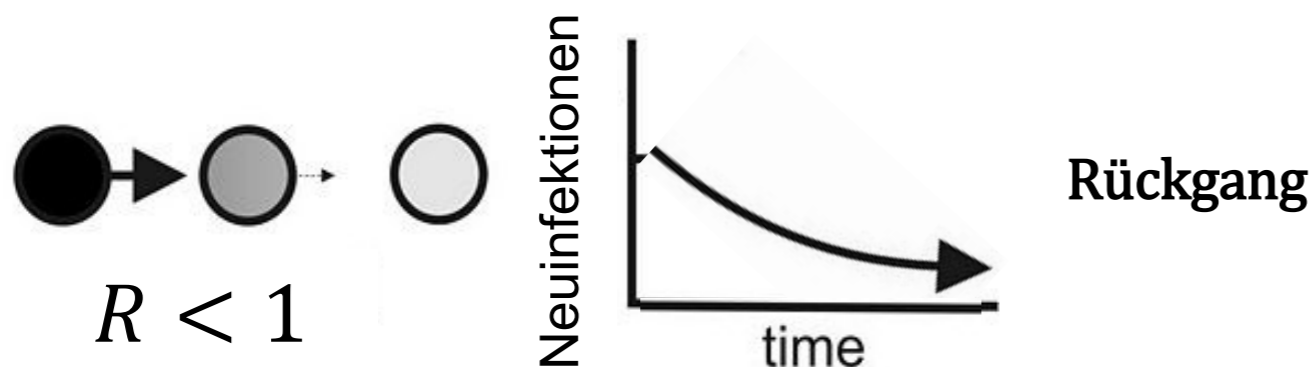
- h_t externer Input (Zufallsvariable)
- Y # aktivierte Einheiten pro aktive Einheit (Z.V.)
- $R = E[Y]$ mittlere # “Kinder” pro Einheit

Ausbreitungsprozesse

Reproduktionszahl R :

Eine infizierte Person infiziert im Mittel R Personen in der nächsten Generation.

Basis – Reproduktionszahl
 $R_0 \approx 3$



Verzweigungsprozess

Aktivität $A(t)$ in System:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{A(t-1)} Y_{i,t} + h_t$$

- h_t externer Input (Zufallsvariable)
- Y # aktivierte Einheiten pro aktive Einheit (Z.V.)
- $R = E[Y]$ mittlere # “Kinder” pro Einheit



Menschliches Gehirn:
80 Milliarden Neuronen

Sampling (Experiment):
Nur 100-1000 Neuronen
mit ausreichender Präzision

Subsampling bias:

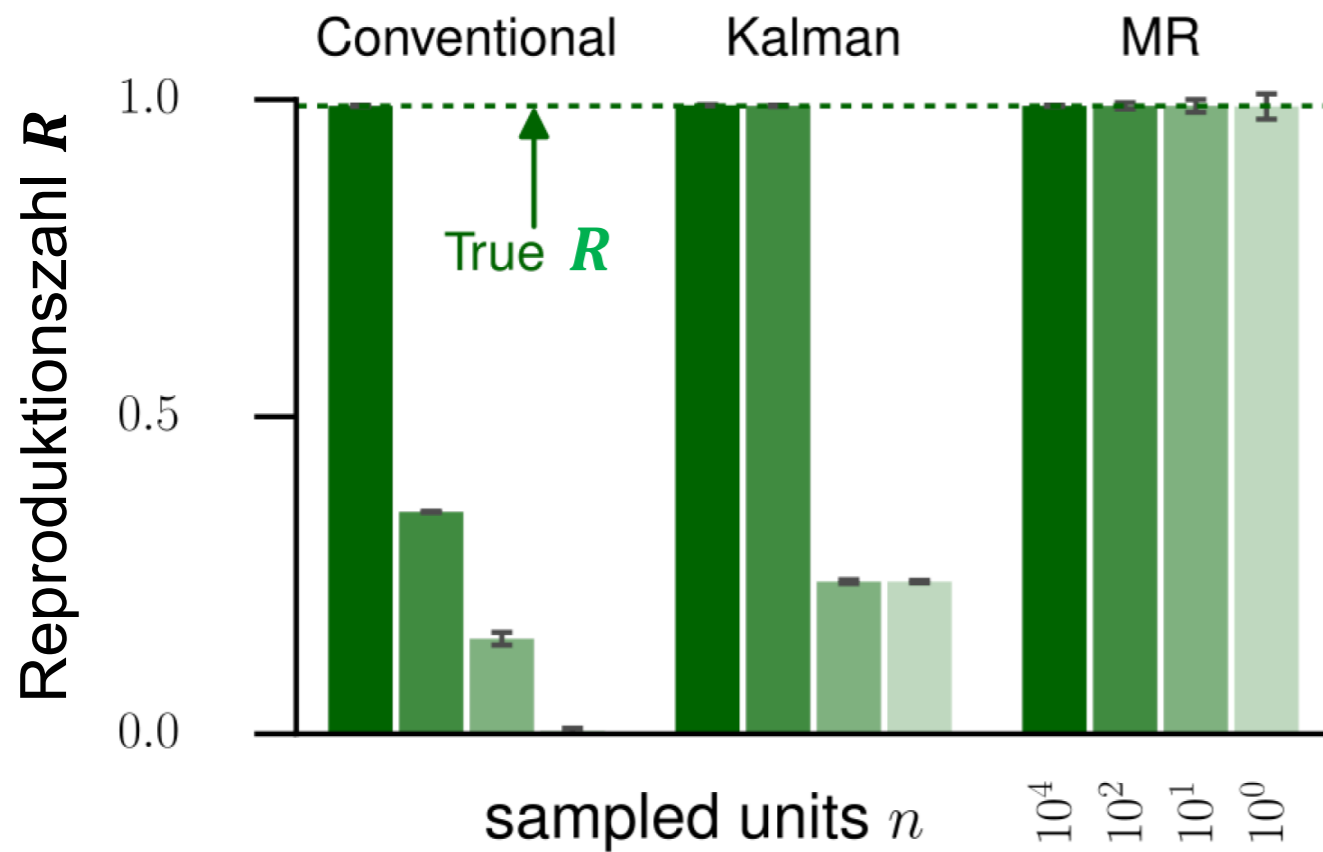
- Fehlschätzung der Kontrollparameter
- Skalenfrei Eigenschaften nicht beibehalten
- Korrelationsstärke unterschätzt

→ subsampling-invarianter Schätzer

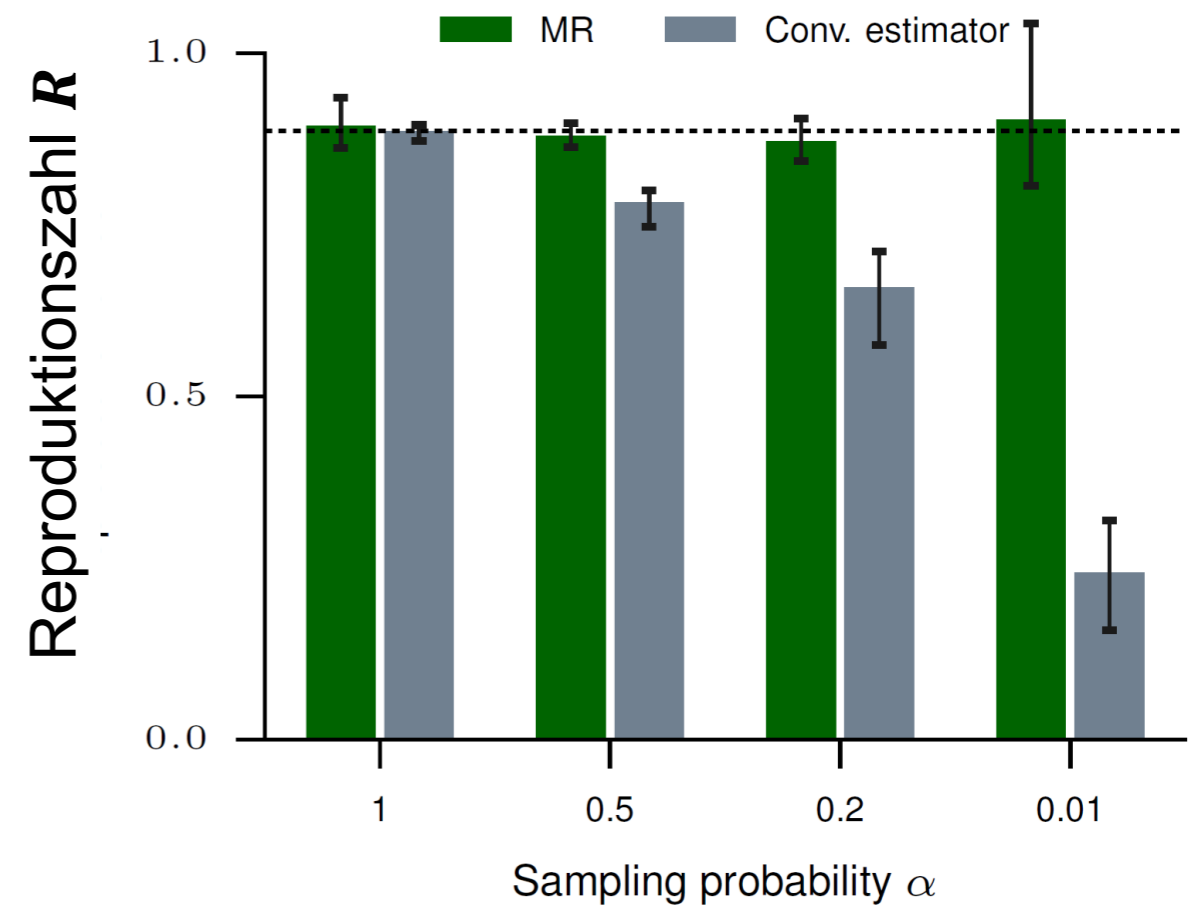
Neto, Spitzner & VP, arxiv
Wilting & VP, Cerebral Cortex, 2019
Wilting & VP, Nature Communications, 2018
Levina & VP, Nature Communications, 2017

Überwindung des Subsampling-Problems

Schätzung der Reproduktionszahl R im Modell aus einem Teil der 10.000 Neuronen

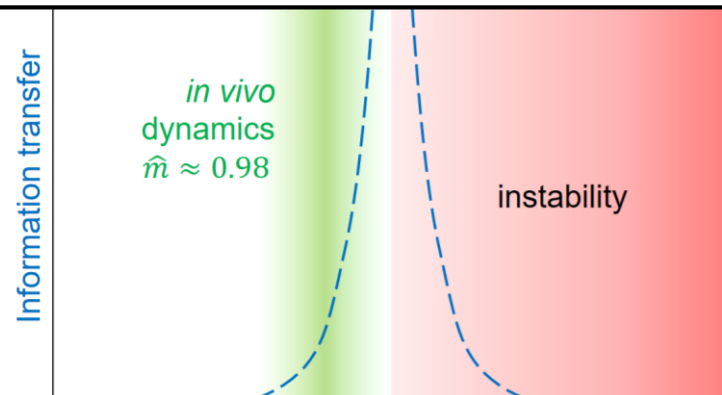


Schätzung der Reproduktionszahl R von Masernfallzahlen



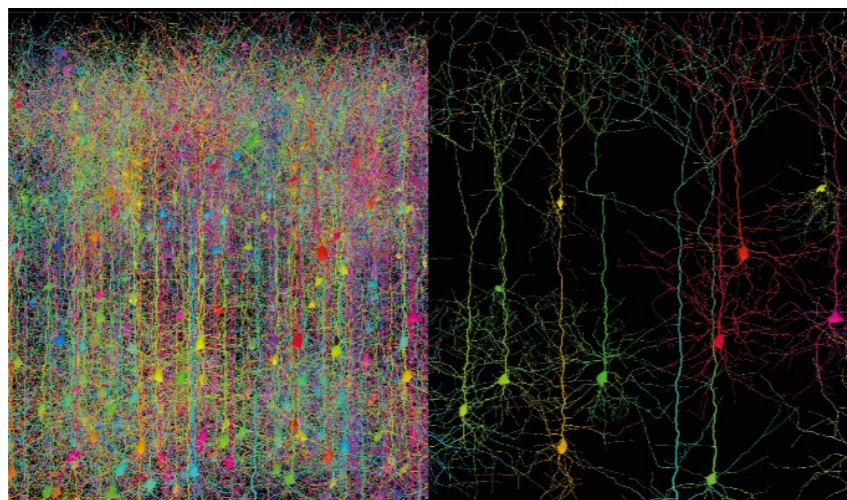
Physik neuronaler Systeme

Ausbreitungsprozesse und Phasenübergänge



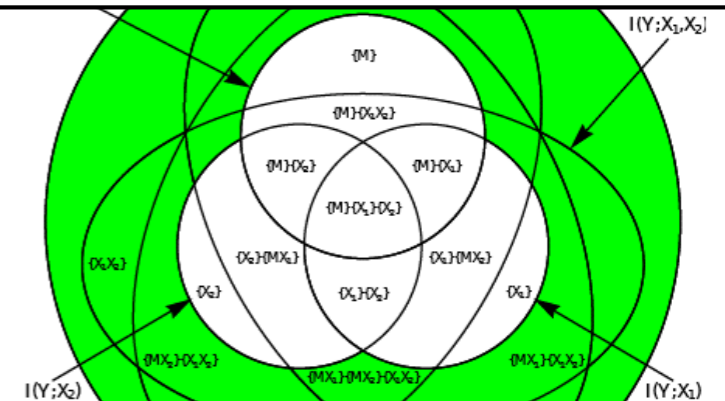
- VP et al., Plos Comp Biol., 2013
- Wilting & VP, Cerebr. Ctx, 2019
- Wilting & VP, Curr Op Neurosci, 2019
- Neto, Spitzner & VP, arxiv; Spitzner et al., arxiv

Subsampling-Theorie



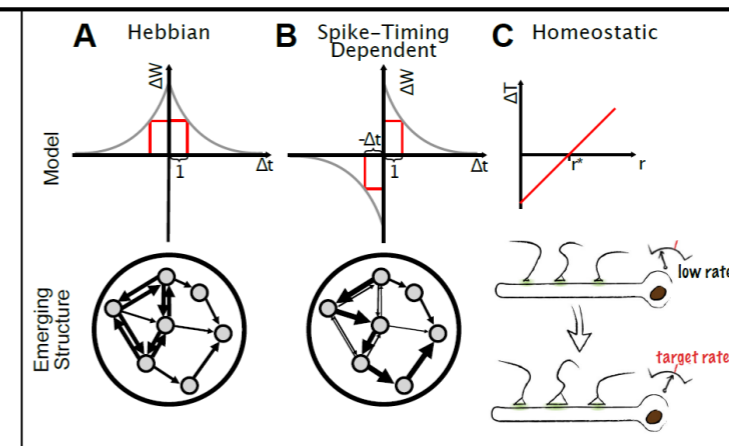
- VP et al., 2009, 2013, 2014
- Levina & VP, Nat. Commun., 2017
- Wilting & VP, Nat. Commun., 2018
- de Heuvel et al., PRE & PRR, 2020

Informationstheorie, um Berechnungen zu quantifizieren & designen



- Wibral, Lizier & VP, Matter to Life, 2017
- Wollstadt et al., Plos CB, 2017
- Wibral et al., Entropy, 2017
- Rudelt, ... VP, biorxiv, 2020

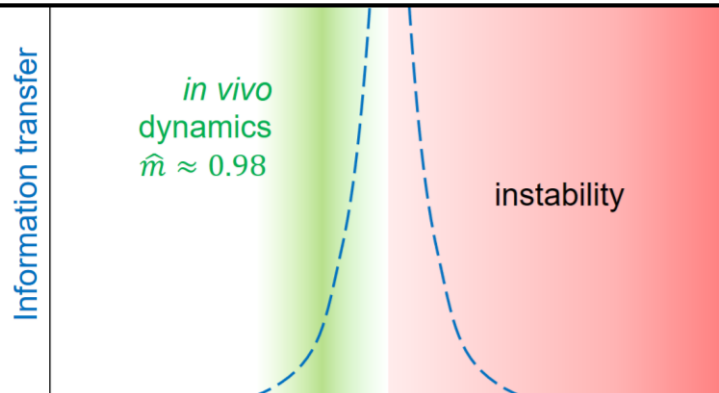
Lokale Lernregeln, um Berechnungen zu optimieren



- Zierenberg, ... VP, Phys Rev X, 2018
- del Papa, VP & Triesch, 2017, 2019
- Cramer, ... VP, Nat Commun., 2020
- Mikulasch, Rudelt & VP, arxiv; Loidolt et al., arxiv

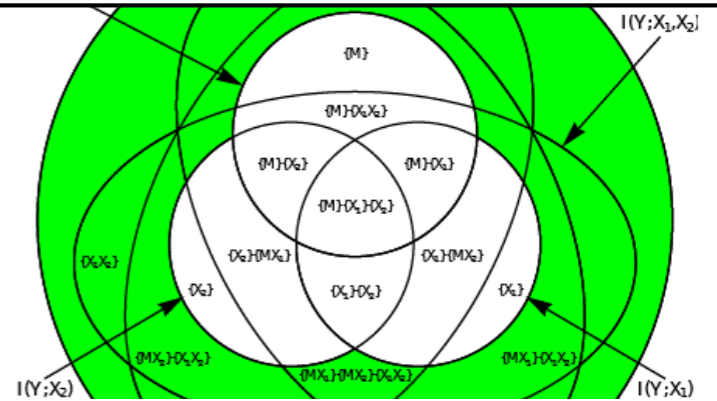
Physik neuronaler Systeme

Ausbreitungsprozesse und Phasenübergänge



COVID-19
 Dehning, ... VP, Science, 2020
 Linden, ... VP, Dtsch Arztebl Int, 2020
 VP et al., The Lancet, 2020
 Dehning, ... VP, medrxiv, 2020
 Contreras ... VP, Nat Commun / arxiv
 [+ Position Papers + Outreach]

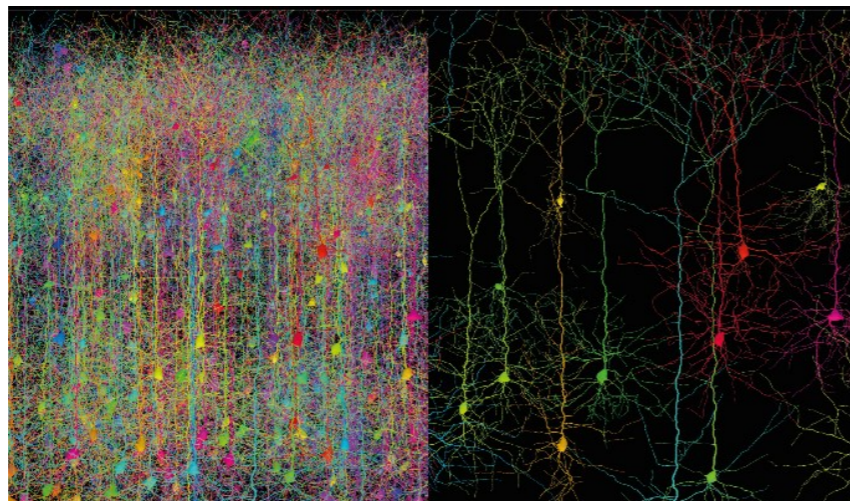
Informationstheorie, um Berechnungen zu quantifizieren & designen



VP et al., Plos Comp Biol., 2013
 Wilting & VP, Cerebr. Ctx, 2019
 Wilting & VP, Curr Op Neurosci, 2019
 Neto, Spitzner & VP, arxiv; Spitzner et al., arxiv

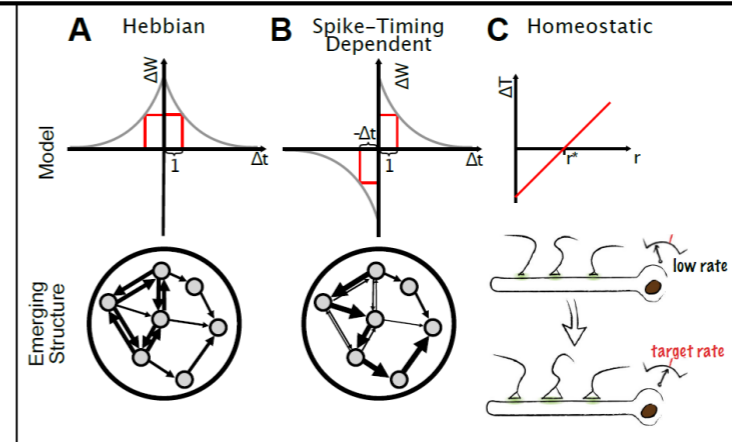
Wibral, Lizier & VP, Matter to Life, 2017
 Wollstadt et al., Plos CB, 2017
 Wibral et al., Entropy, 2017
 Rudelt, ... VP, biorxiv, 2020

Subsampling-Theorie



VP et al., 2009, 2013, 2014
 Levina & VP, Nat. Commun., 2017
 Wilting & VP, Nat. Commun., 2018
 de Heuvel et al., PRE & PRR, 2020

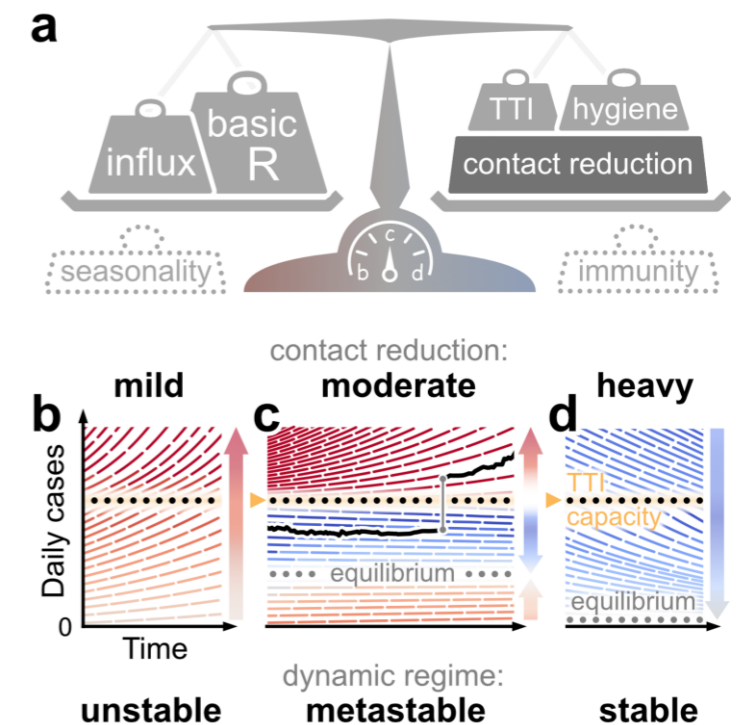
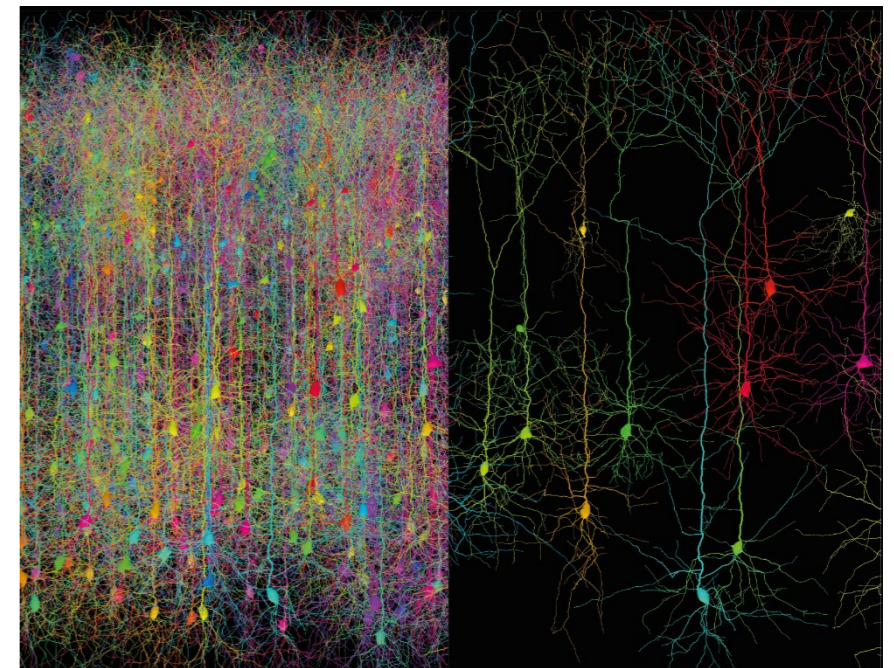
Lokale Lernregeln, um Berechnungen zu optimieren



Zierenberg, ... VP, Phys Rev X, 2018
 del Papa, VP & Triesch, 2017, 2019
 Cramer, ... VP, Nat Commun., 2020
 Mikulasch, Rudelt & VP, arxiv; Loidolt et al., arxiv

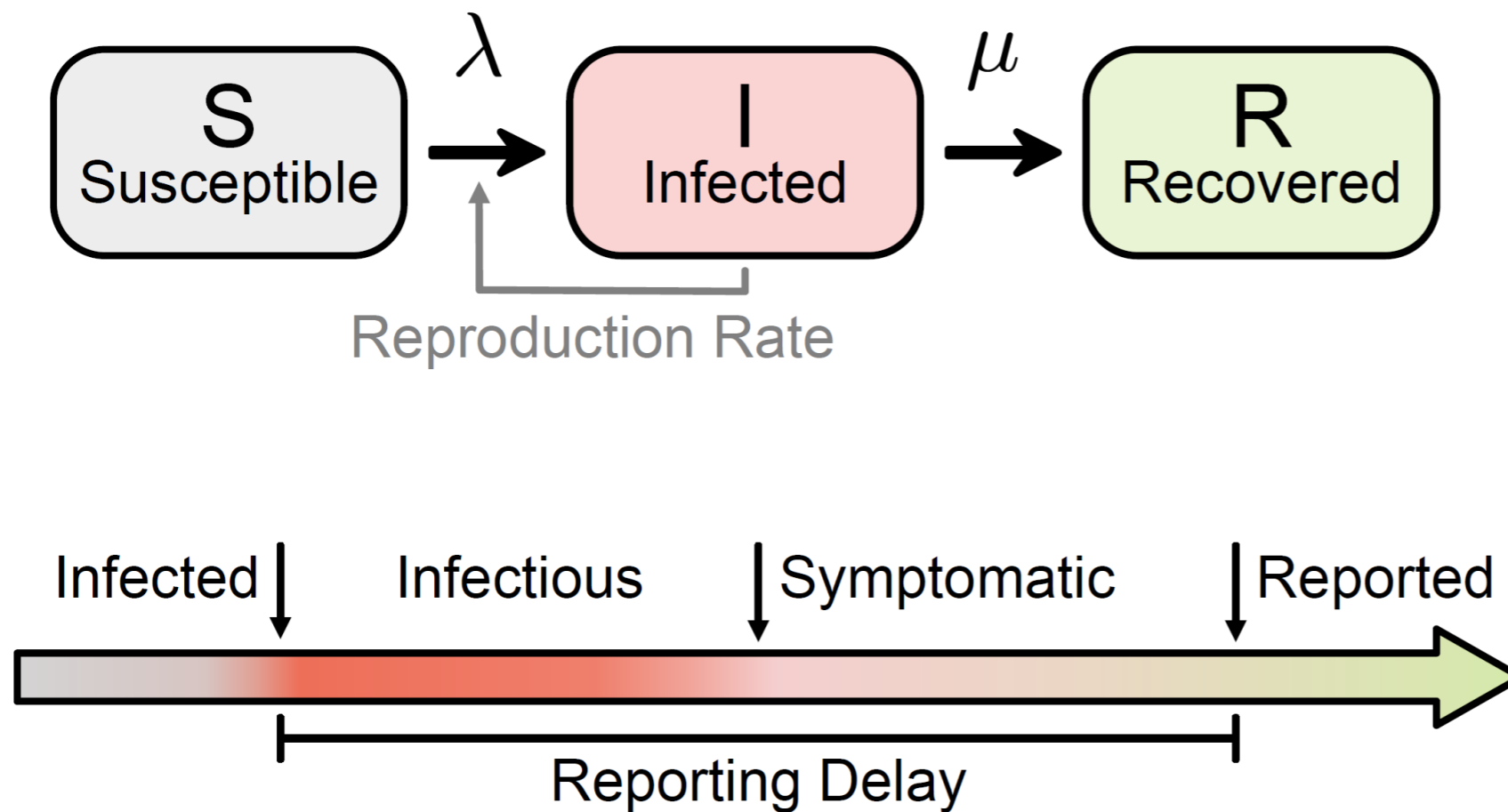
Inhalt

- **Ausbreitungsprozesse:**
Von der Theorie neuronaler Systeme zur Analyse von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen herleiten:**
Der Beitrag von Test-Trace-Isolate (TTI) – also von „Testen-Kontaktnachverfolgen-Isolieren“ – zur Eindämmung von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen abschätzen und vorhersagen:**
Wieviel tragen einzelne „Nicht-Pharmazeutische Interventionen“ (NPI) zur Eindämmung bei?
- Wo stehen wir, und was bringen die kommenden Monate?



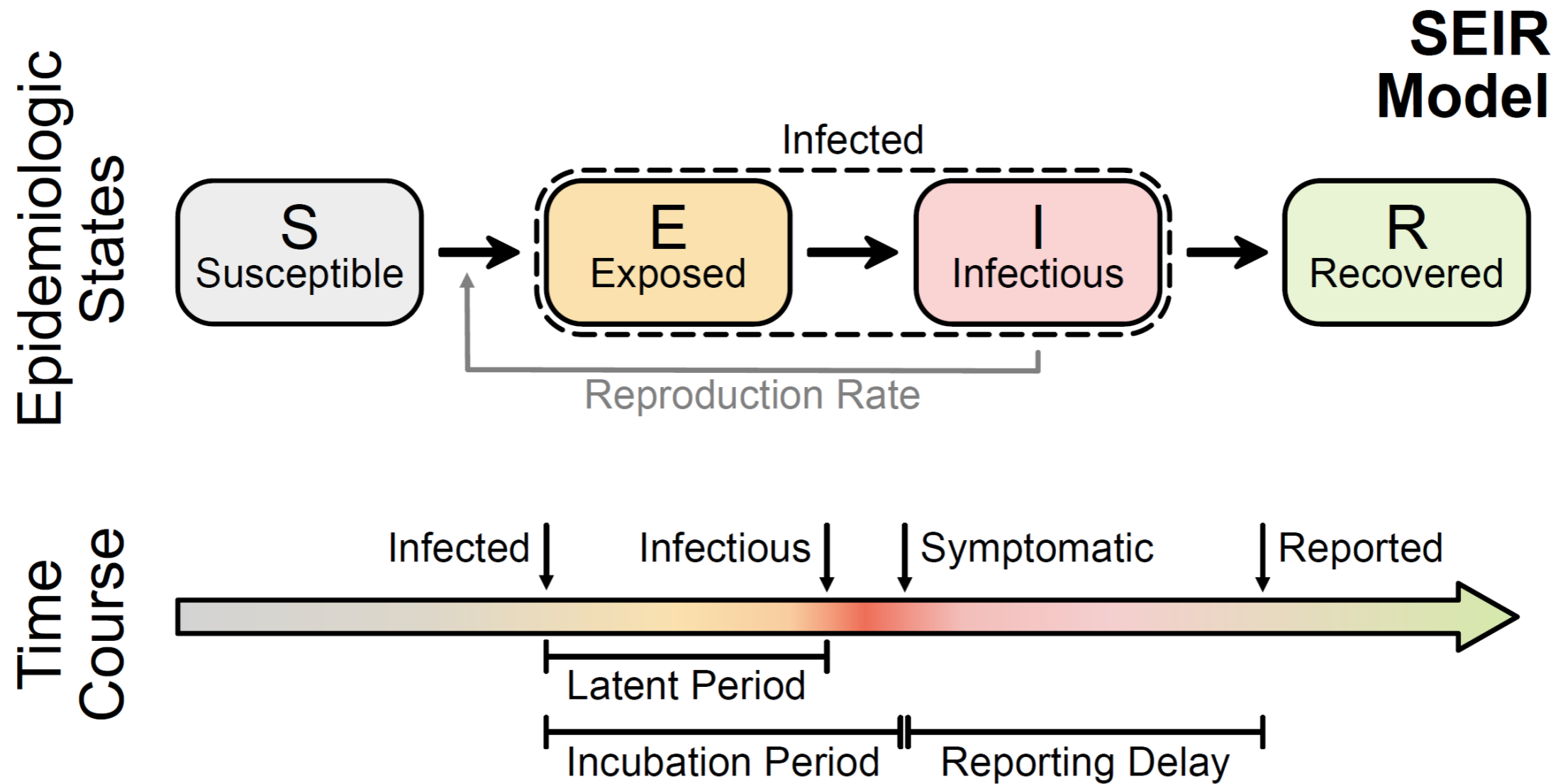
SIR-Modell: Suszeptibel-Infiziert-Recovered

SIR Model



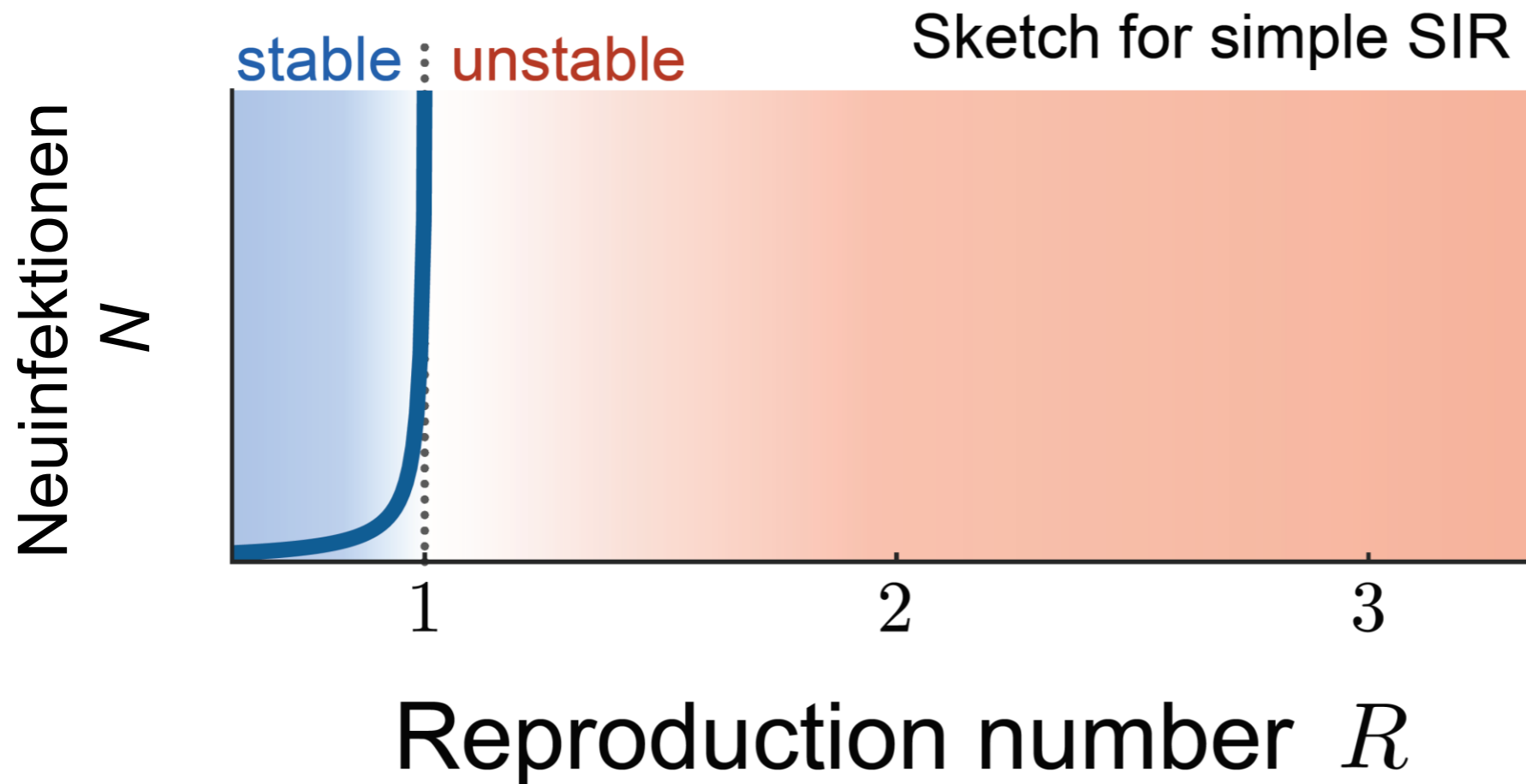
$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= -\lambda \frac{SI}{N} \\ \frac{dI}{dt} &= \lambda \frac{SI}{N} - \mu I \\ \frac{dR}{dt} &= \mu I\end{aligned}$$

SEIR-Modell: Suszeptibel-Exponiert-Infiziert-Resistent

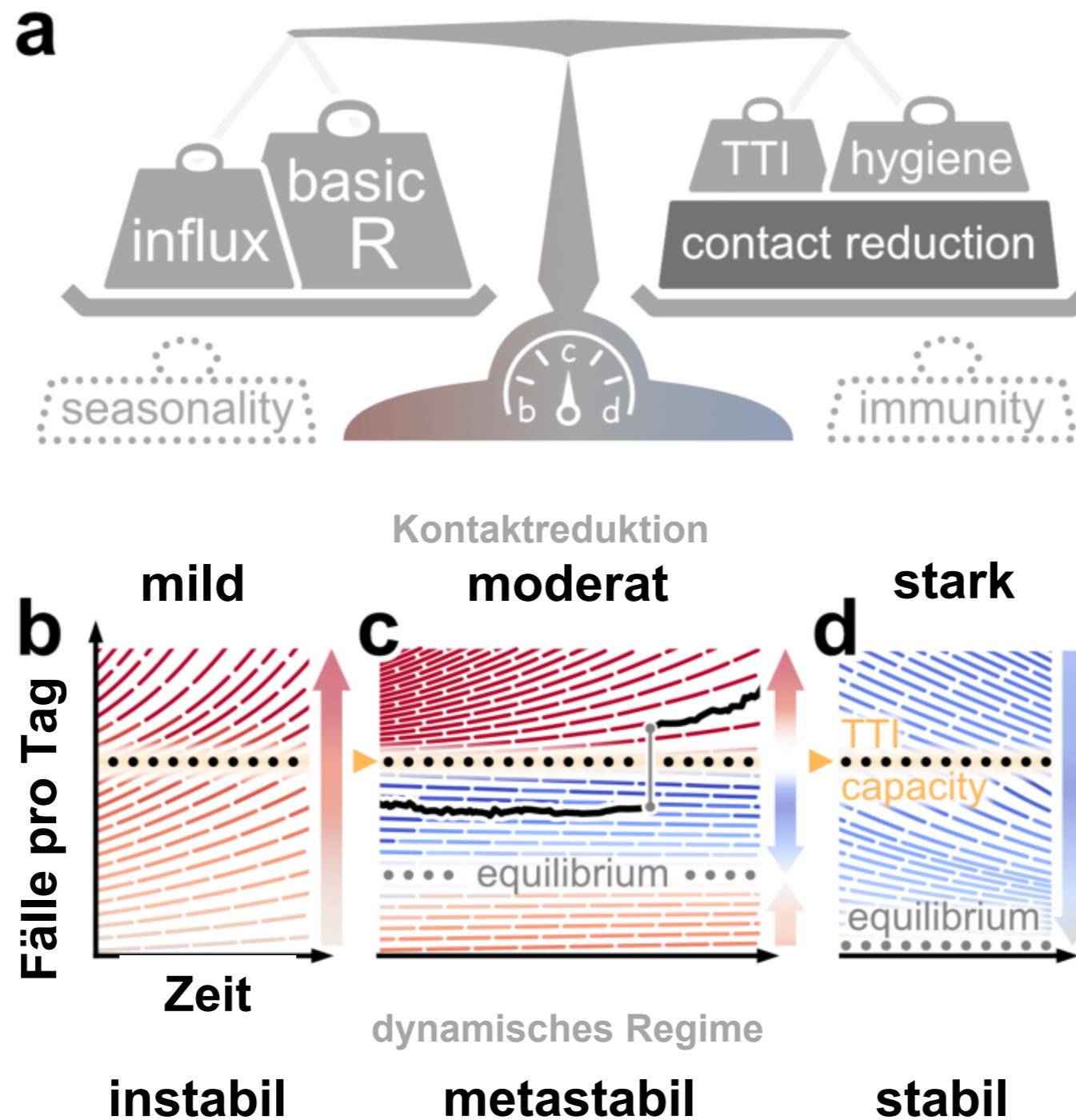


Die Reproduktionszahl R und die Einschleppung neuer Fälle Φ bestimmen das Level der Neuinfektionen N







$$N \approx \frac{\Phi}{R_c - R} = \frac{\Phi}{1 - R}, \quad \text{für } R < 1$$



Kombinierte Massnahmen um COVID-19 einzudämmen



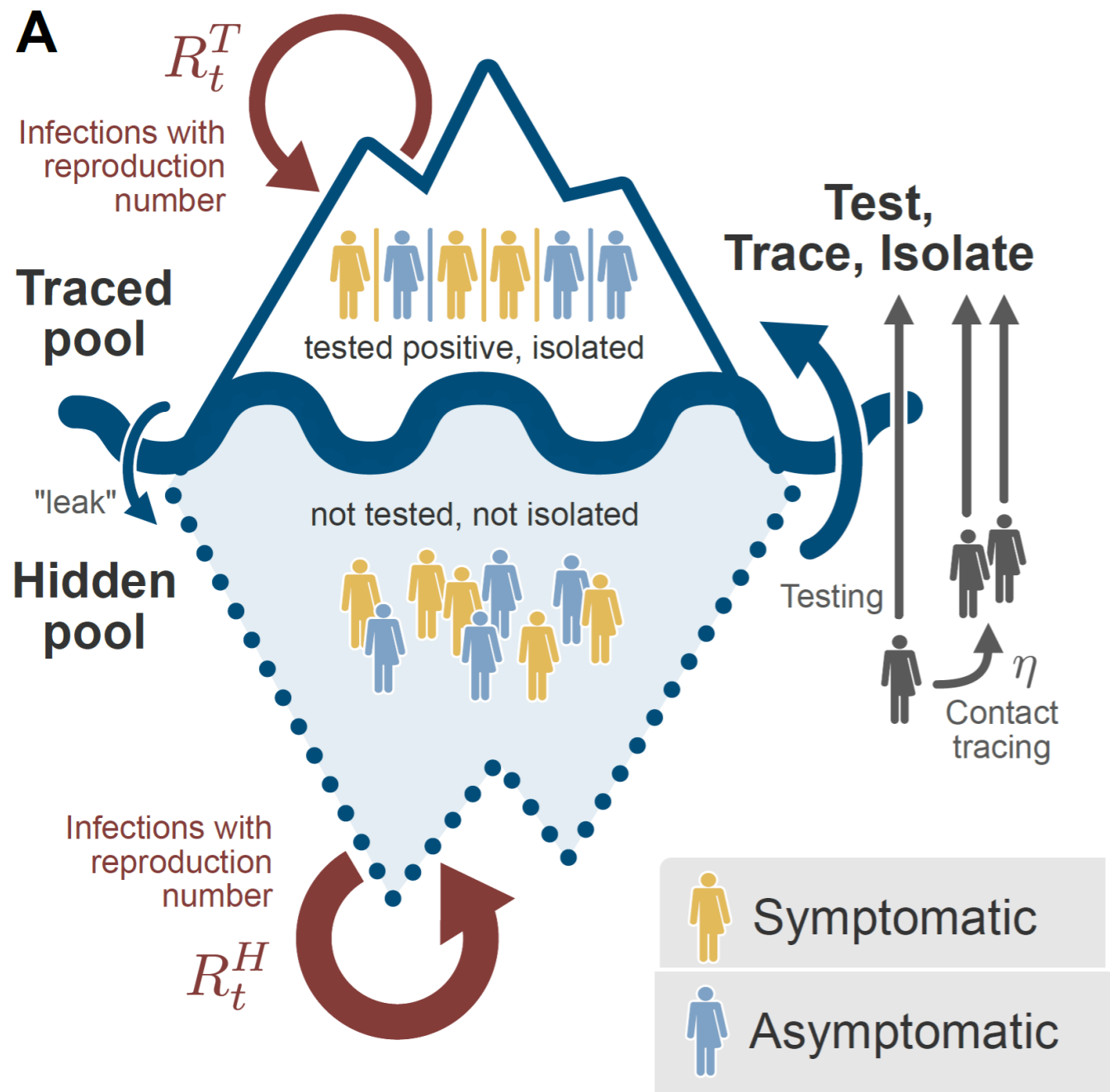
The challenges of containing SARS-CoV-2 via test-trace-and-isolate

Sebastian Contreras ^{1,2,5}, Jonas Dehning^{1,5}, Matthias Loidolt ^{1,5}, Johannes Zierenberg ¹, F. Paul Spitzner¹, Jorge H. Urrea-Quintero¹, Sebastian B. Mohr ¹, Michael Wilczek ^{1,3}, Michael Wibral⁴ & Viola Priesemann ^{1,3}✉

Without a cure, vaccine, or proven long-term immunity against SARS-CoV-2, test-trace-and-isolate (TTI) strategies present a promising tool to contain its spread. For any TTI strategy, however, mitigation is challenged by pre- and asymptomatic transmission, TTI-avoiders, and undetected spreaders, which strongly contribute to “hidden” infection chains. Here, we study a semi-analytical model and identify two tipping points between controlled and uncontrolled spread: (1) the behavior-driven reproduction number R_t^H of the hidden chains becomes too large to be compensated by the TTI capabilities, and (2) the number of new infections exceeds the tracing capacity. Both trigger a self-accelerating spread. We investigate how these tipping points depend on challenges like limited cooperation, missing contacts, and

© The Author(s) 2020. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Test-Trace-and-Isolate (TTI) trägt zur Eindämmung bei



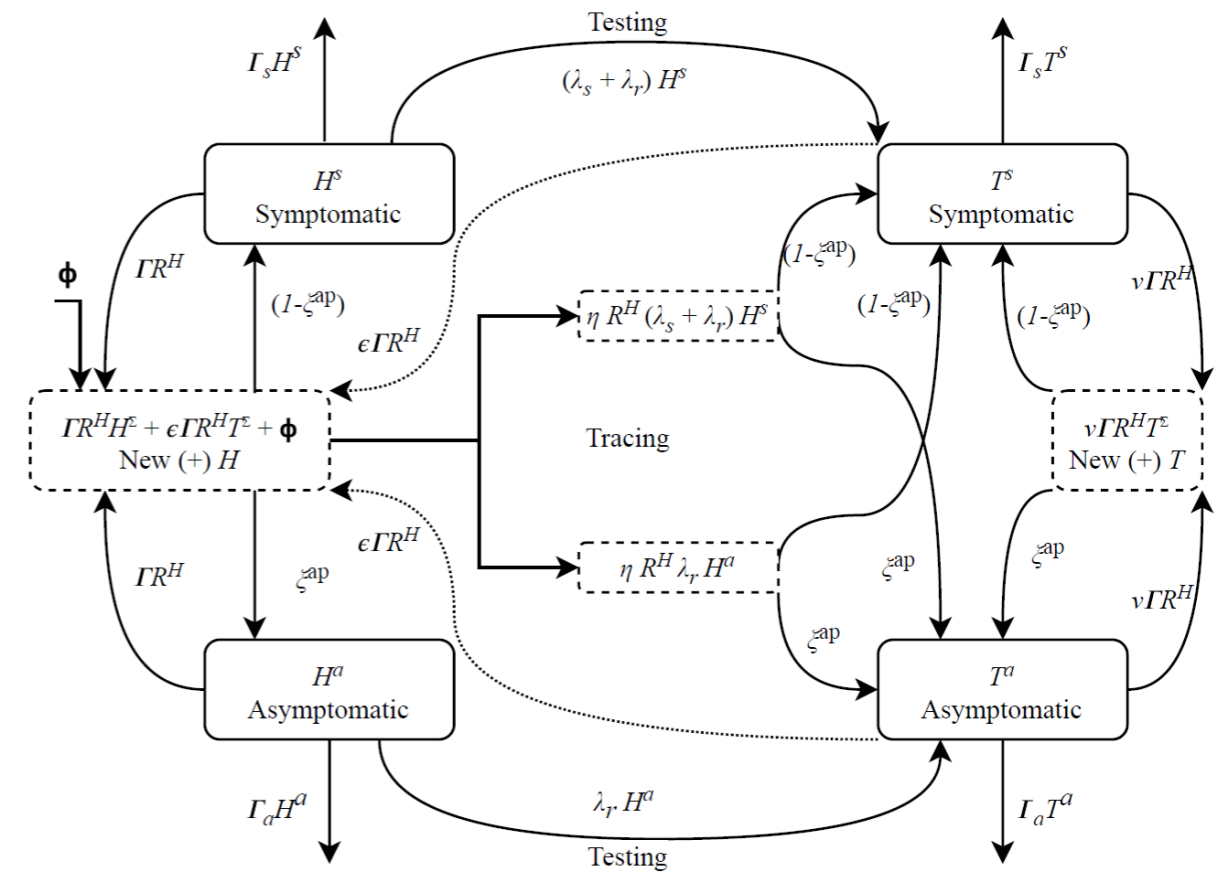
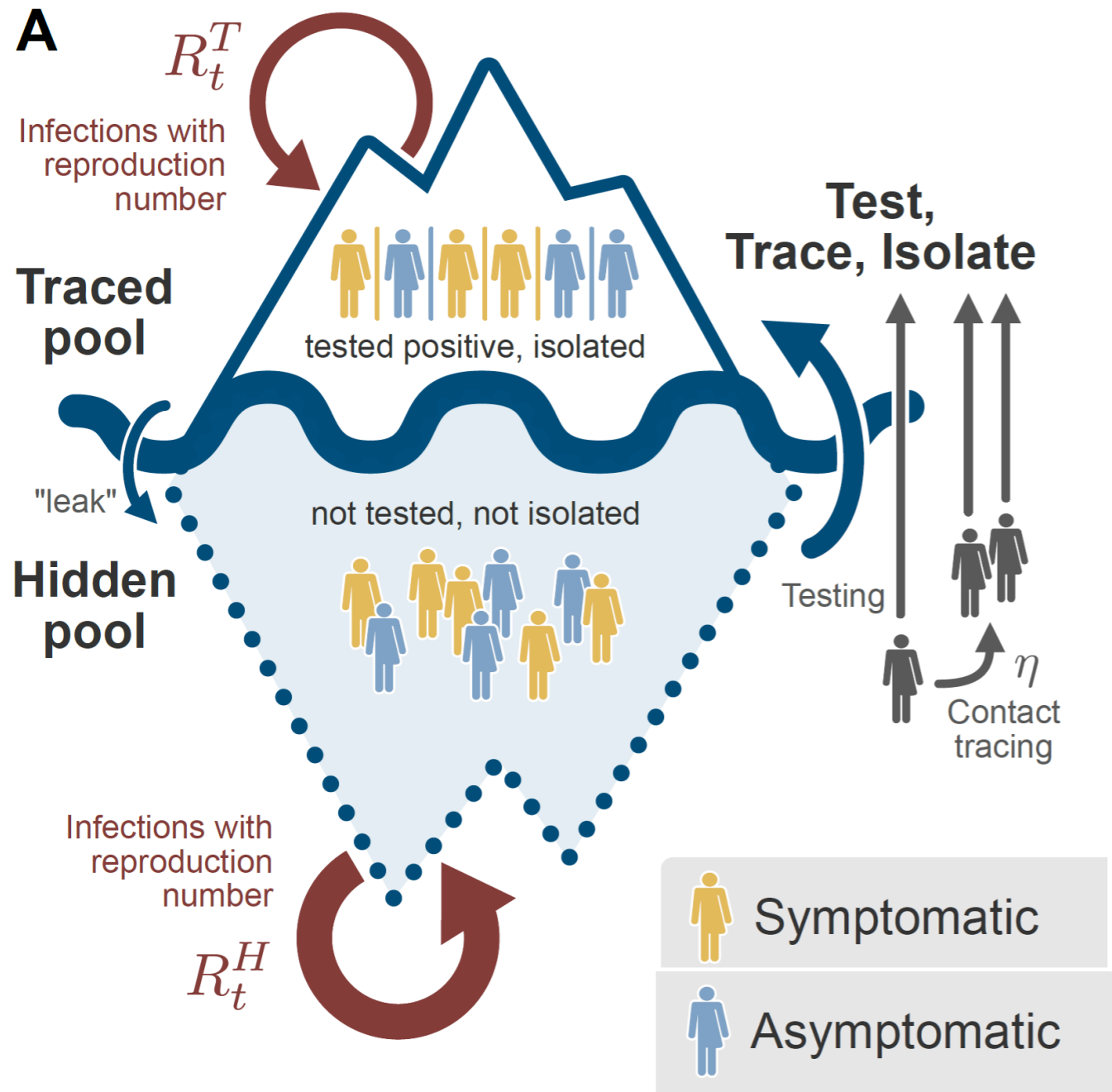
Testen & Isolieren

- Zufall (0)
- Symptome (50 % der sympt., im Mittel nach 5 Tagen)
- Kontaktpersonen testen

Kontaktnachverfolgung ist schwierig:

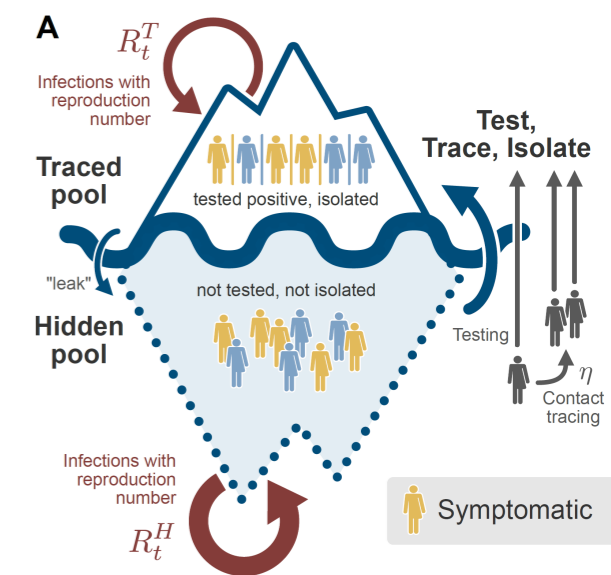
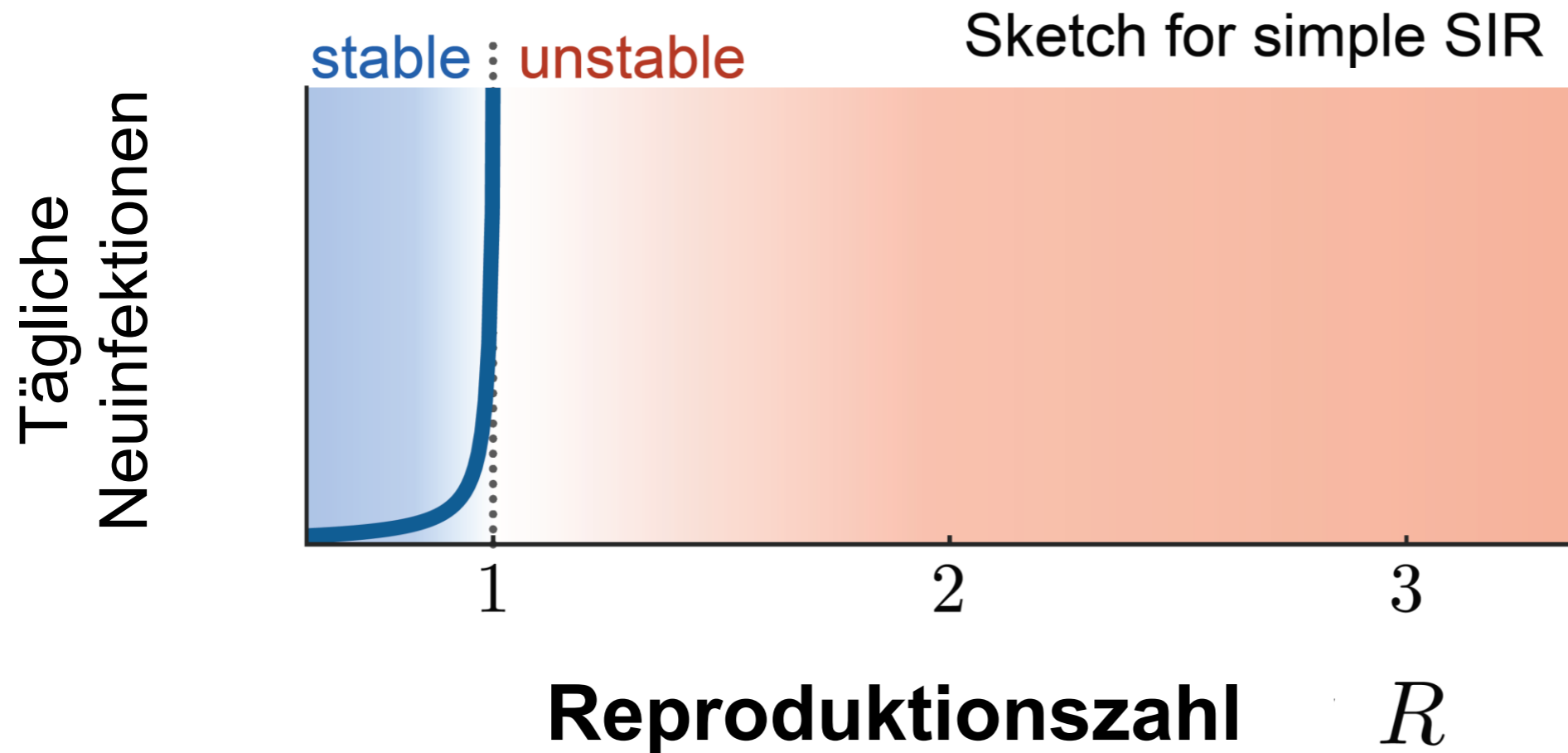
- Pre- und asymptomatische Ansteckung
- 1/3 der Kontakte werden übersehen
- Quarantäne ist nicht perfekt
- "Test-Vermeider" (20 %)
- Eintrag neuer Infizierter aus dem Ausland
- Limitierte Kapazität der Gesundheitsämter zum Testen und Nachverfolgen

Test-Trace-and-Isolate (TTI) trägt zur Eindämmung bei



Die Reproduktionszahl R und die Einschleppung neuer Fälle Φ bestimmen das Level der Neuinfektionen N

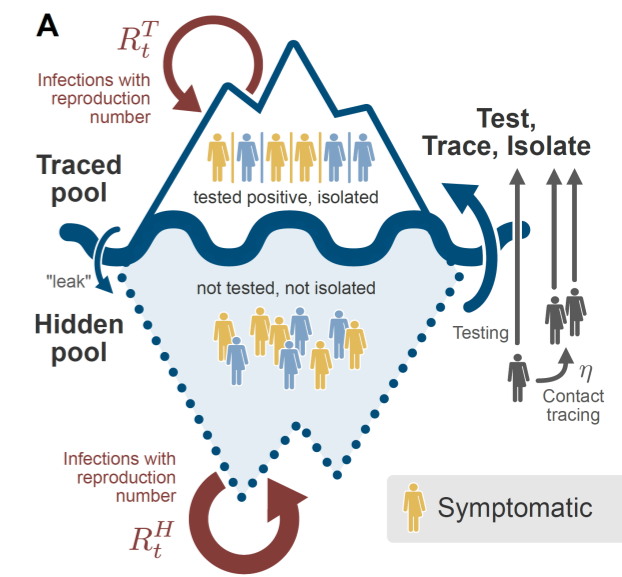
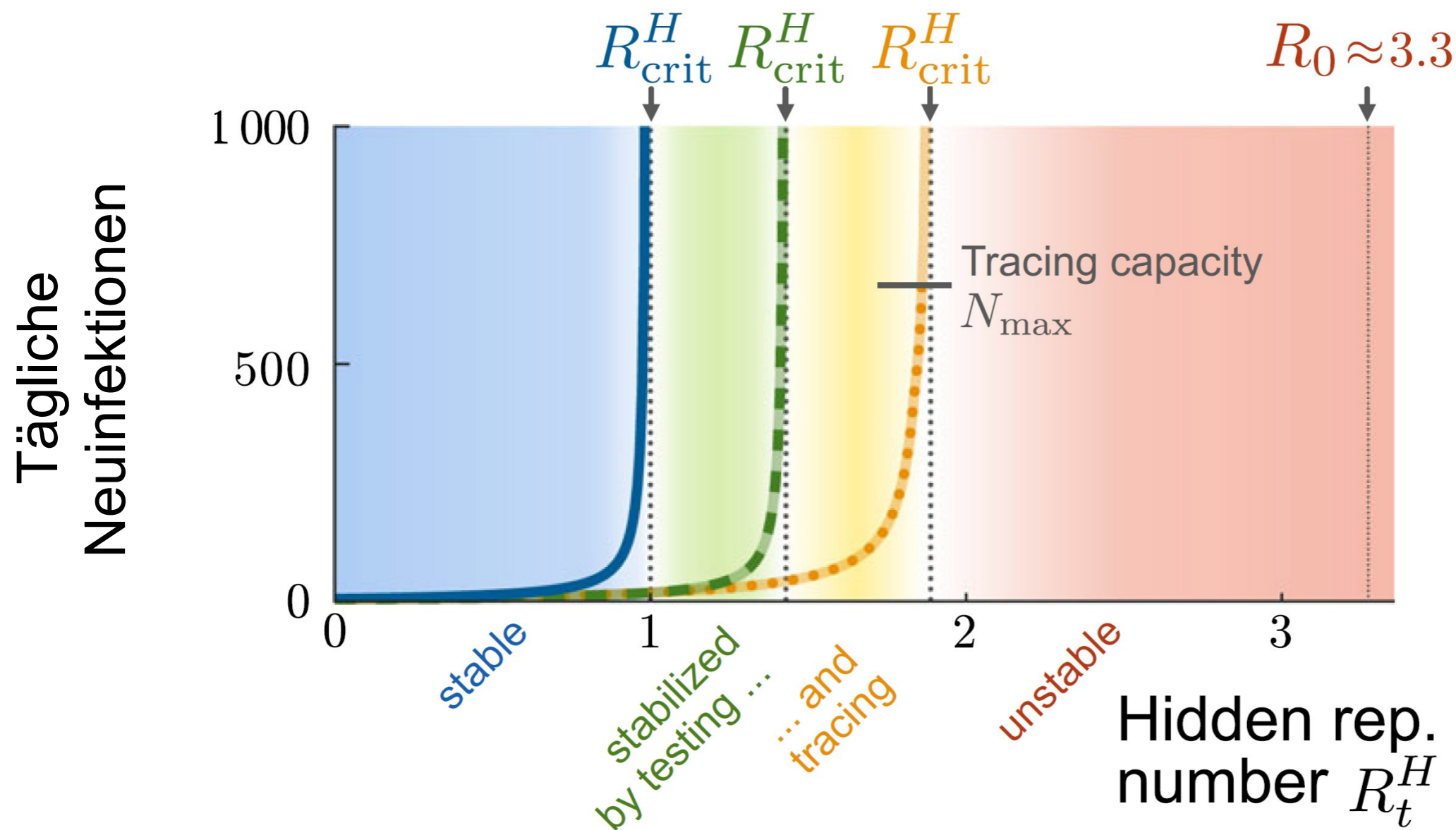
$$N \approx \frac{\Phi}{R_c - R} = \frac{\Phi}{1 - R}, \quad \text{für } R < 1$$



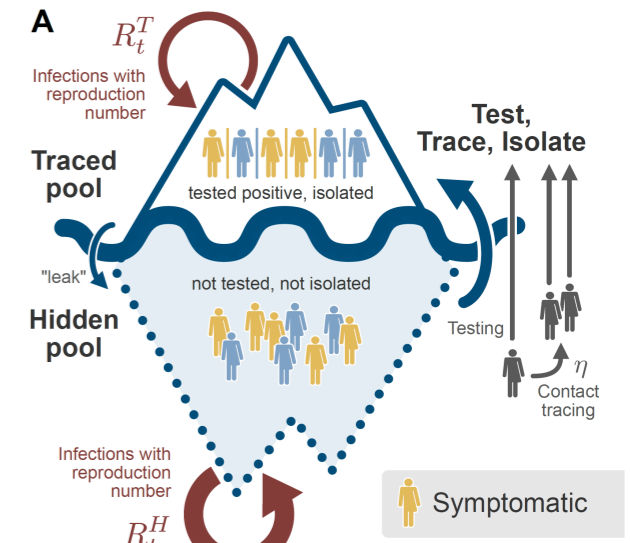
TTI verschiebt die Stabilitätsgrenze:

Ohne TTI darf der R-Wert höchstens 1 sein.

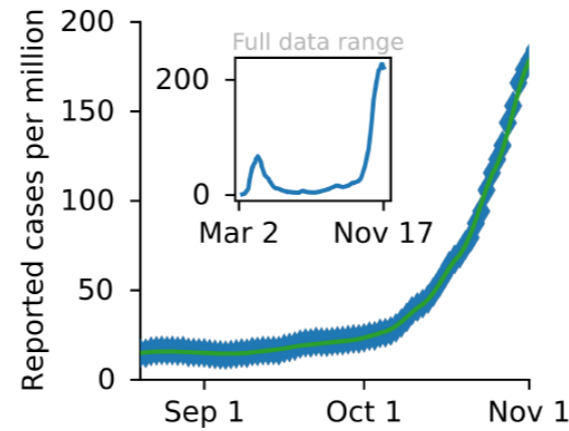
Mit TTI darf der R-Wert im alltäglichen Leben fast 2 sein
(das R des RKI muss weiter bei oder unter 1 sein!)



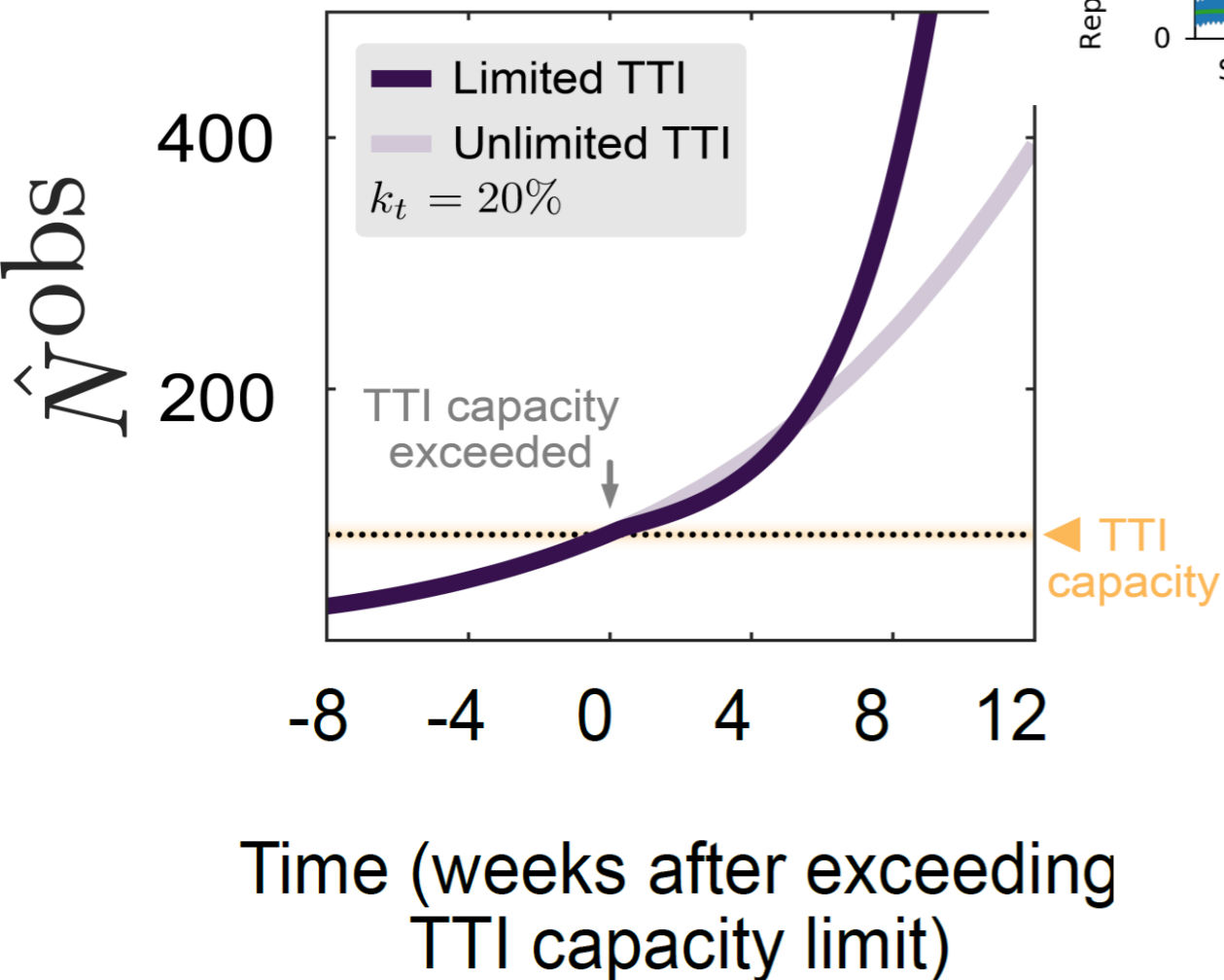
Überschreitung der TTI Kapazität: Die Fallzahlen steigen schneller als exponentiell



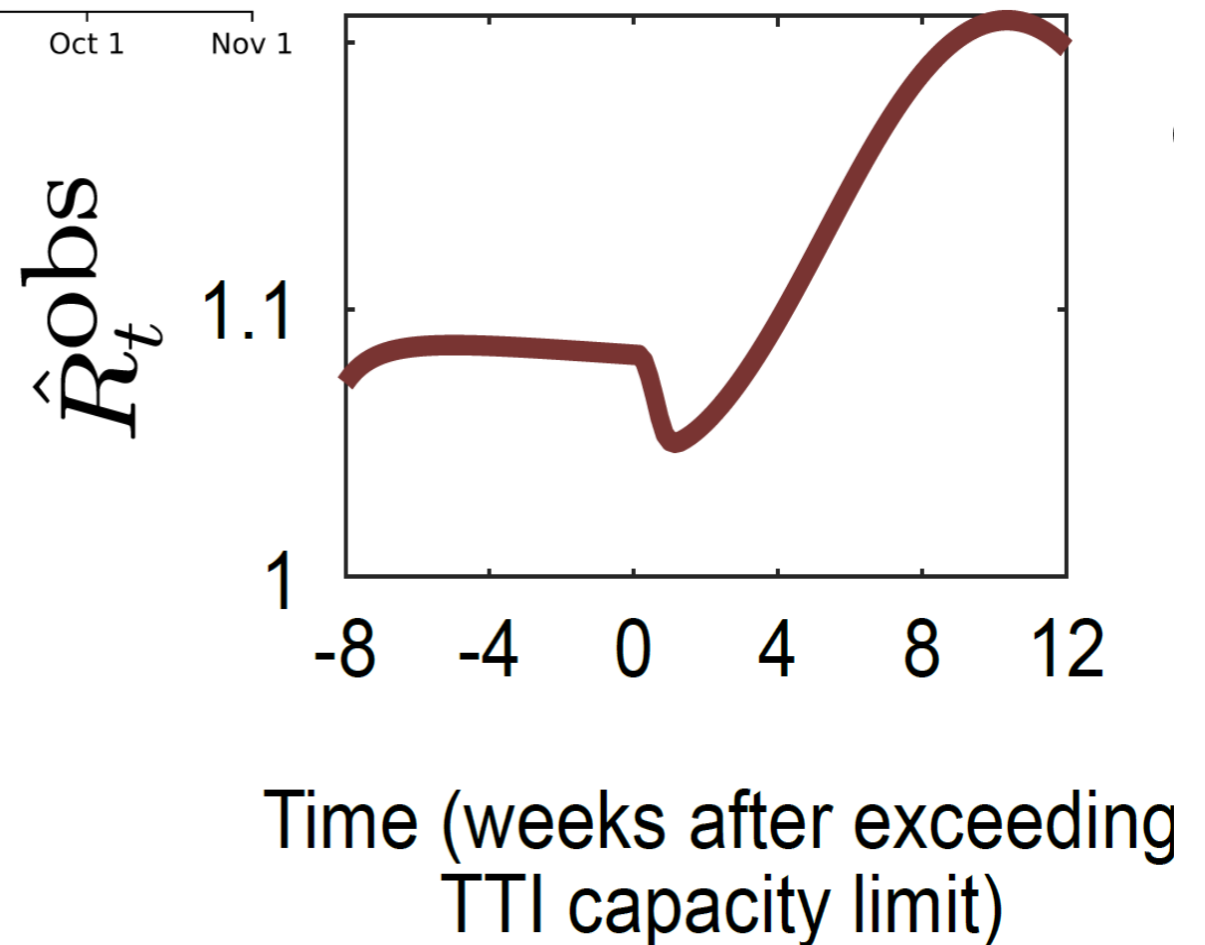
Neuinfektionen Deutschland



Daily observed new cases (per million)

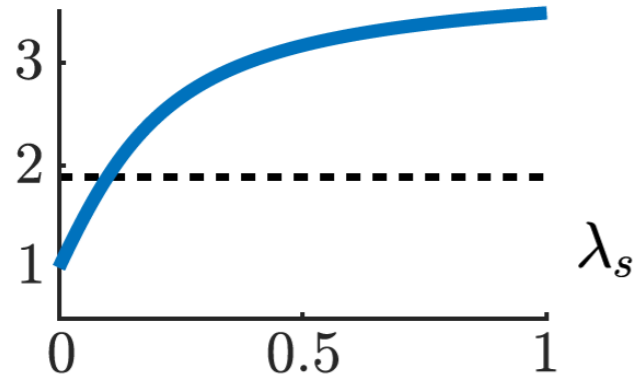
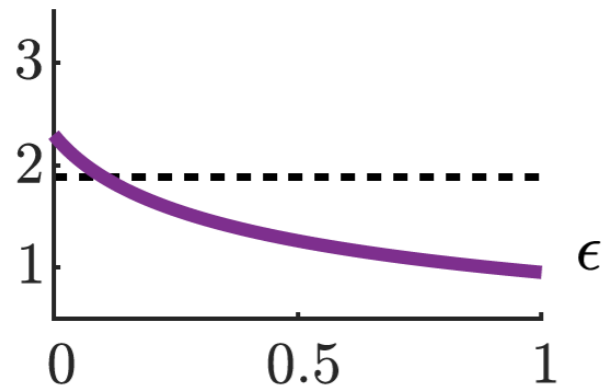
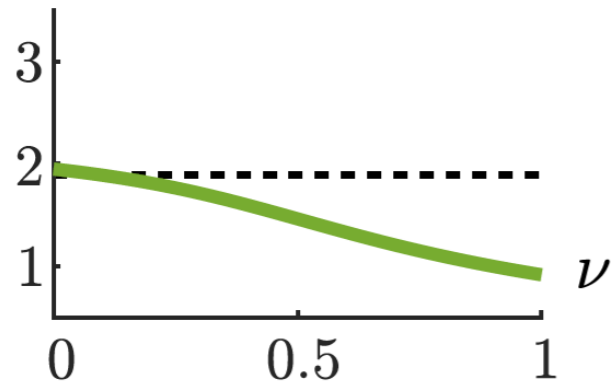


Observed reproduction number

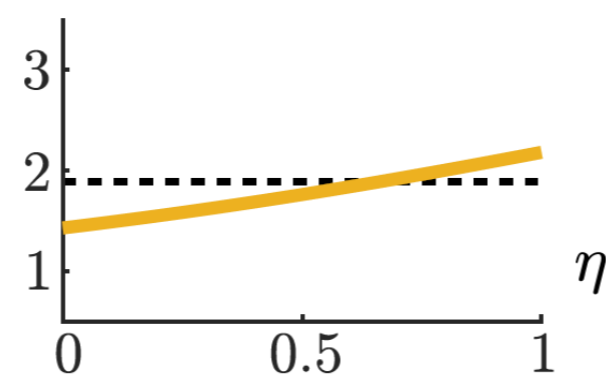
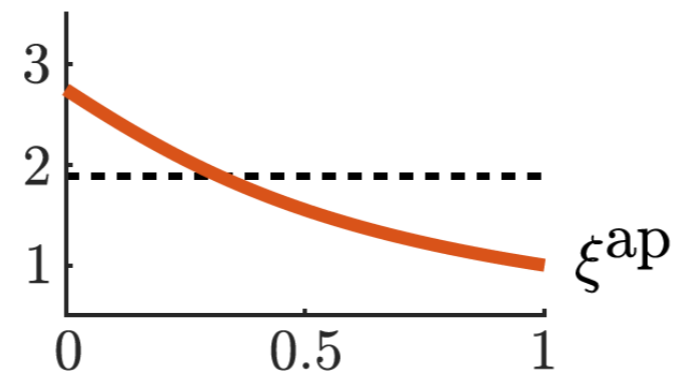
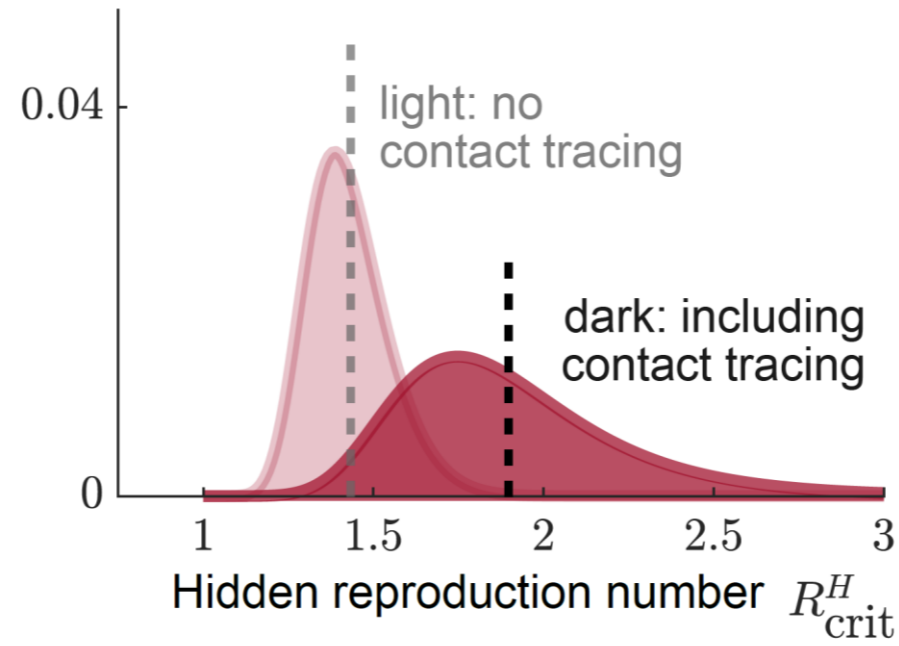


Sensitivitätsanalyse

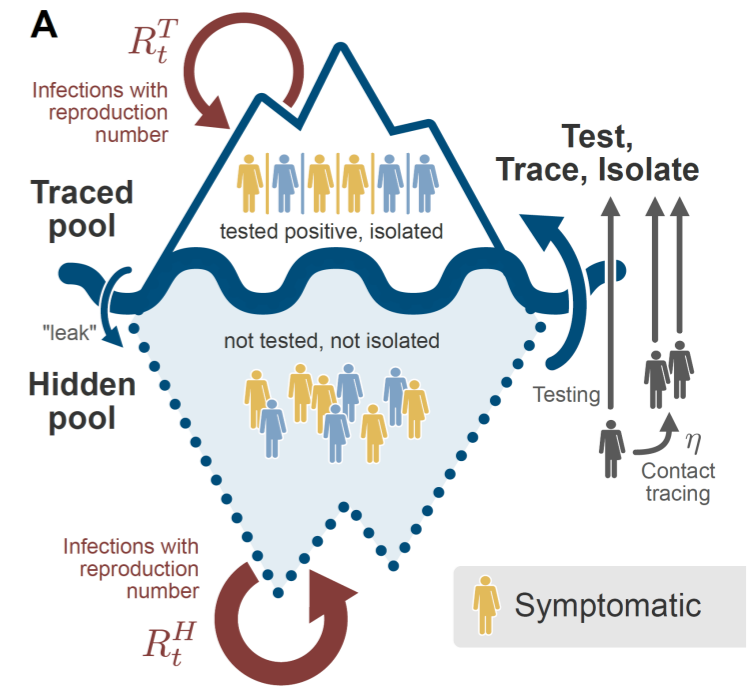
Stabilitätsgrenze R_H



Wahrscheinlichkeitsverteilung

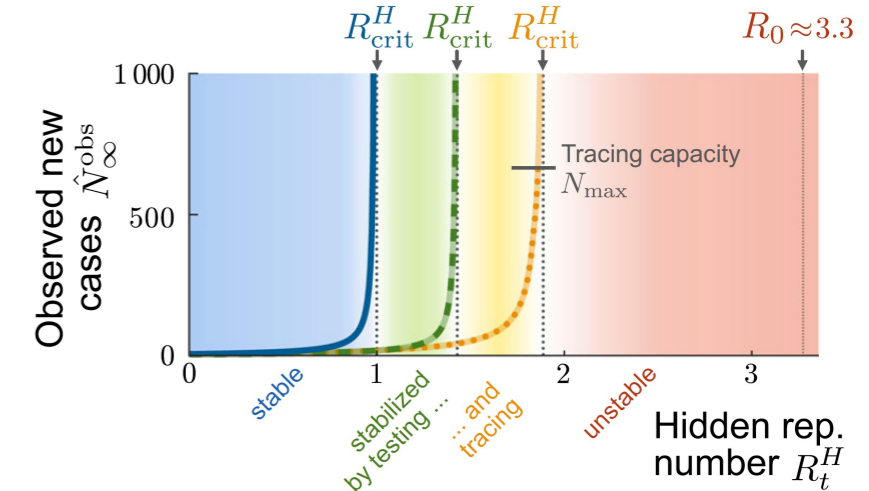
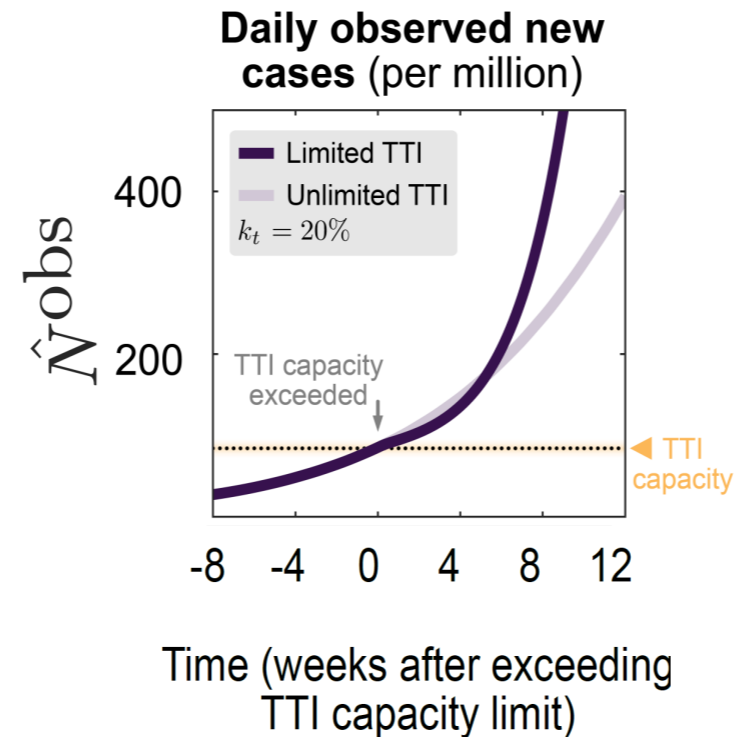
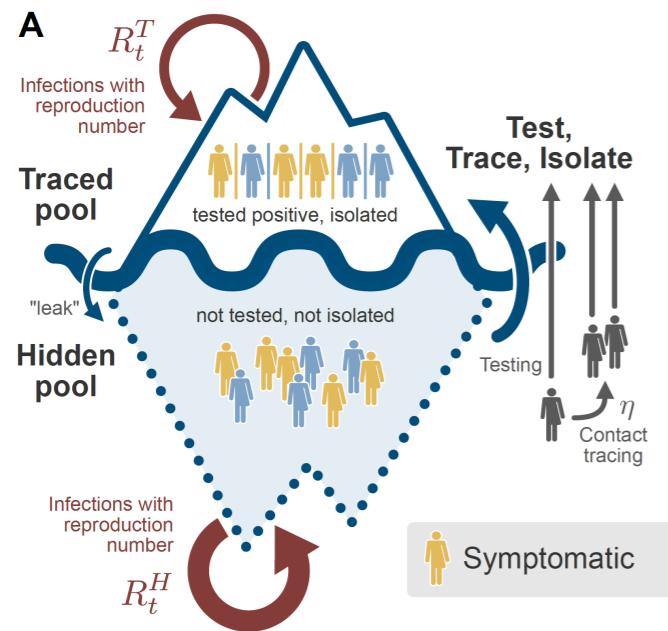


- ν Isolation factor
- ϵ "leak" factor
- λ_s Symptom-driven testing
- ξ^{ap} Apparent asymptomatic fraction
- η Tracing efficiency



Zusammenfassung

Test-Trace-Isolate (TTI) trägt zur Eindämmung von COVID-19 bei:



Die unentdeckten Fälle tragen besonders stark zur Ausbreitung bei.

Wird die TTI Kapazität überschritten, kommt es zu einer sich selbst beschleunigenden Ausbreitung (→ Kipppunkt).

TTI erlaubt jeder Person mehr Kontakte: Statt $R=1$ kann man fast zwei Personen "ausversehen" anstecken.

TOWARDS A LONG-TERM CONTROL OF COVID-19 AT LOW CASE NUMBERS

Sebastian Contreras¹, Jonas Dehning¹, Sebastian B. Mohr¹, F. Paul Spitzner¹, and Viola Priesemann^{1,2*}

¹Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Am Faßberg 17, 37077 Göttingen, Germany.

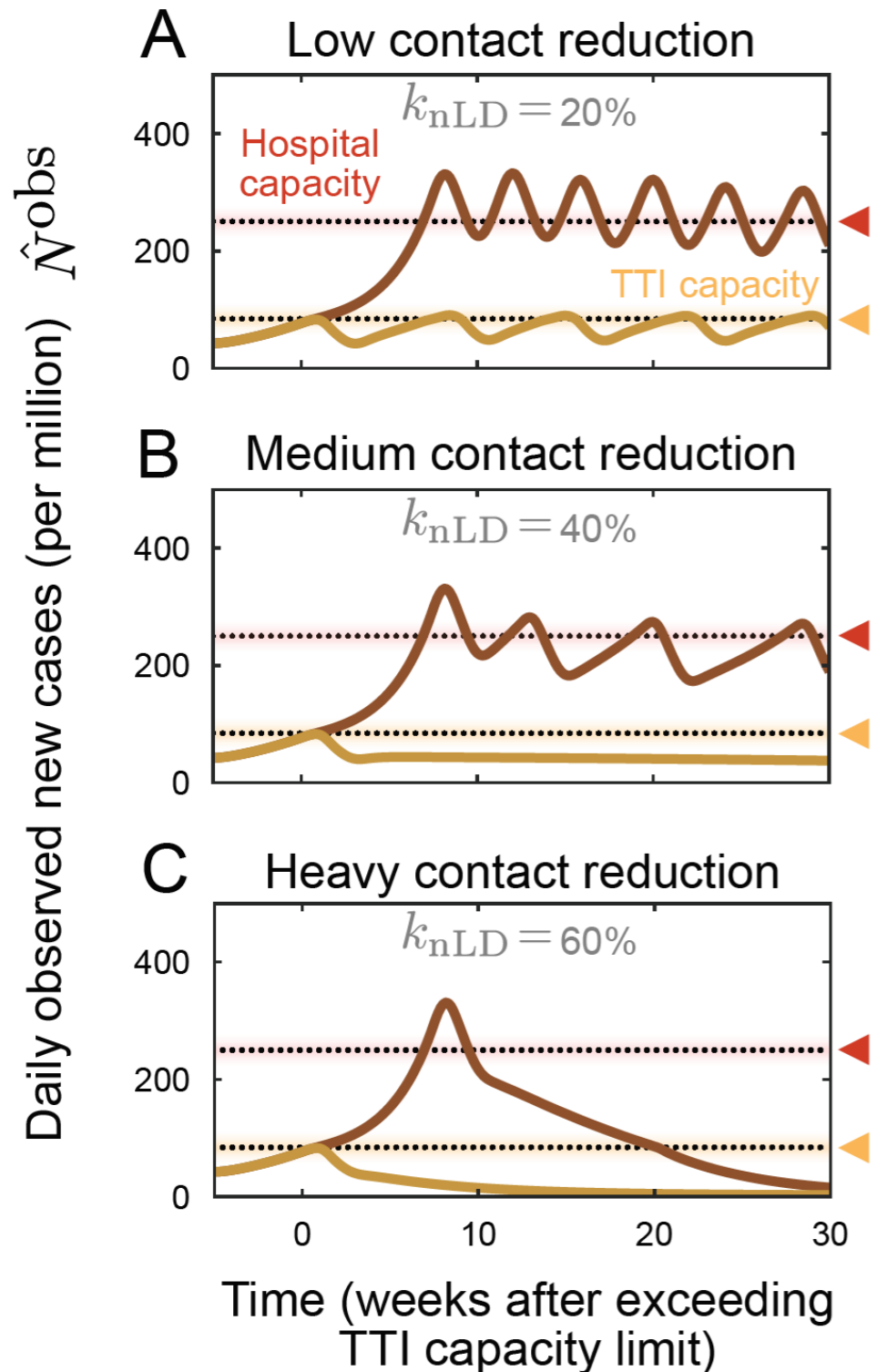
²Department of Physics, University of Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Germany.

All authors contributed equally.

Abstract

As SARS-CoV-2 is becoming endemic, a sustainable strategy to manage the pandemic is needed, especially when facing a steep wave. We identified a metastable regime at low case numbers, where test-trace-and-isolate (TTI) together with moderate contact reduction is sufficient to control the spread. However, this control is lost once case numbers overwhelm the limited TTI capacity. Beyond that tipping point, increasingly more infectious individuals remain undetected, generating a self-accelerating spread. To reestablish control, a lockdown (circuit breaker) has to strike a delicate balance between duration, stringency, and timeliness; otherwise, lockdowns are ineffective, or their effect is soon lost. However, once reestablishing control at low case numbers, no additional lockdowns are necessary. In the long-term, immunity and large-scale testing will further facilitate the control of COVID-19.

Lockdown an der Krankenhauskapazität oder an der TTI-Kapazität orientieren?



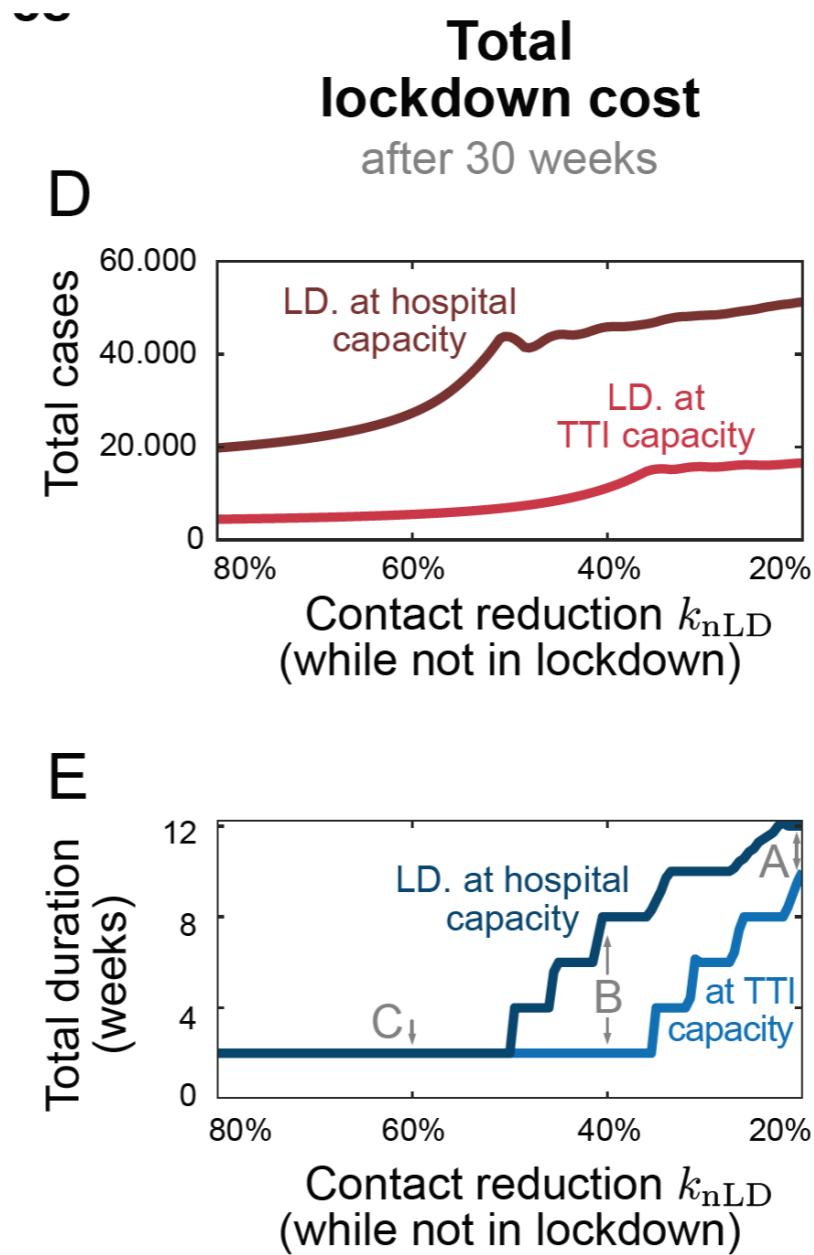
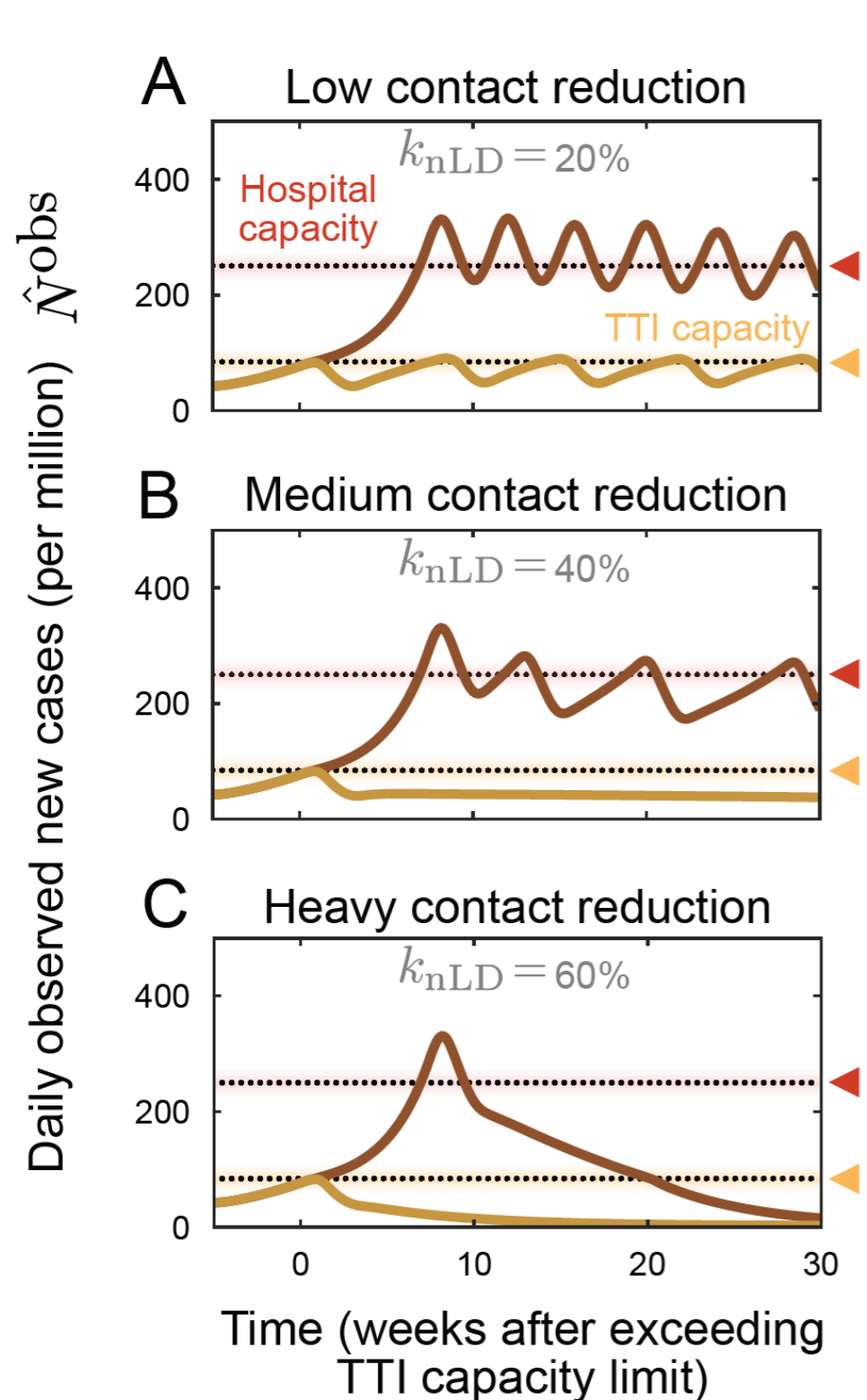
Milde Kontaktreduktion (**20%**)
nach Lockdown
→ Wiederholte Lockdowns

Moderate Kontaktreduktion (**40%**)
→ Wiederholte Lockdowns nur bei hohen Fallzahlen notwendig.

Starke Kontaktreduktion (**60%**)
→ Wiederholte Lockdowns nicht notwendig.

→ Kontrolle ist bei niedrigen Fallzahlen technisch gesehen einfacher.

Lockdown an der Krankenhauskapazität oder an der TTI-Kapazität orientieren?



Die Kosten der Lockdowns (Fallzahlen, Todeszahlen und Lockdown-Dauer) sind deutlich geringer, wenn man sich an der TTI-Kapazität orientiert.

TOWARDS A LONG-TERM CONTROL OF COVID-19 AT LOW CASE NUMBERS

Sebastian Contreras¹, Jonas Dehning¹, Sebastian B. Mohr¹, F. Paul Spitzner¹, and Viola Priesemann^{1,2*}

¹Max Planck Institute for Dynamics and Self-Organization, Am Faßberg 17, 37077 Göttingen, Germany.
²1, 37077 Göttingen, Germany.

Correspondence

120

Published Online
December 18, 2020
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32625-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32625-8)

Calling for pan-European commitment for rapid and sustained reduction in SARS-CoV-2 infections

Across Europe, the COVID-19 pandemic is causing excess deaths, placing a burden on societies and health systems and harming the economy. European governments have yet to develop a common vision to guide the management of the pandemic. Overwhelming evidence shows that not only public health, but also society and the economy benefit greatly from reducing cases of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) infection. Vaccines will help control the virus, but

to be
dam
and
acro
alon
COV
com
ther
for a
respo
the r
and
shou
goal
Fir
and
from
In a
not l
nee

www.containcovid-pan.eu

Contain COVID-19

A joint statement of scientists from all across Europe.

Statement ▾ Signatures ▾ Press coverage ▾ Background Information

Contain case numbers
Contain new variants

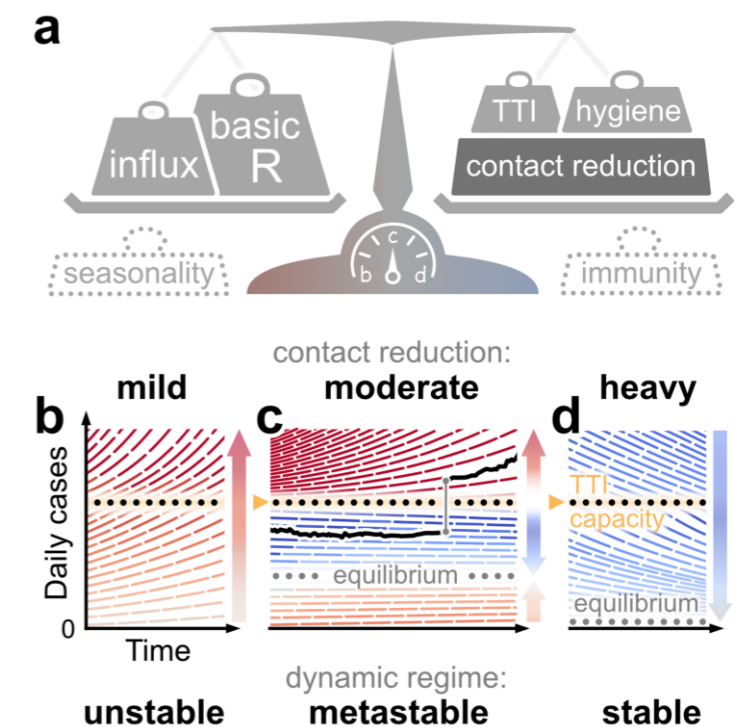
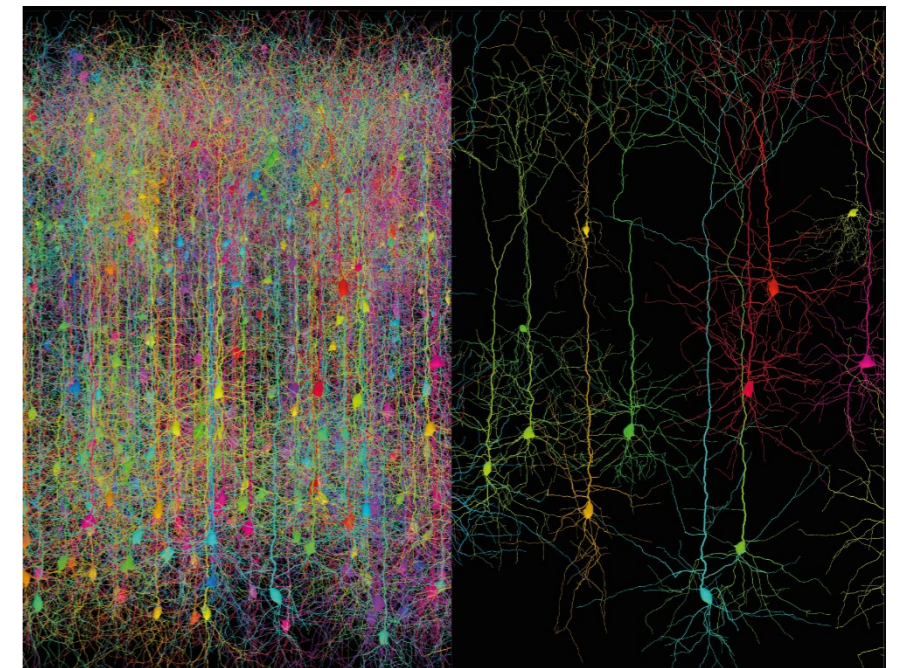
Panel: Core measures
Supplementary information

Please find our first statement here:

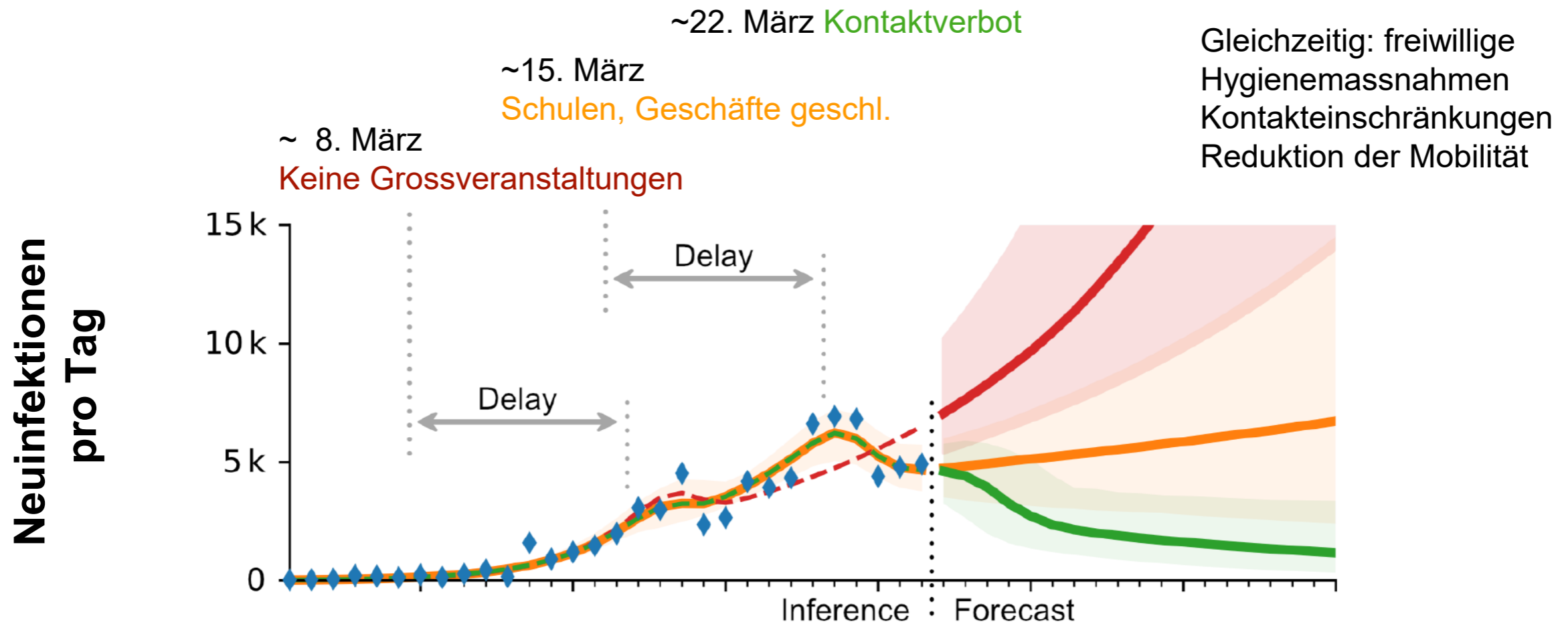
CALLING FOR PAN-EUROPEAN COMMITMENT FOR RAPID AND SUSTAINED REDUCTION IN SARS-COV-2 INFECTIONS

Inhalt

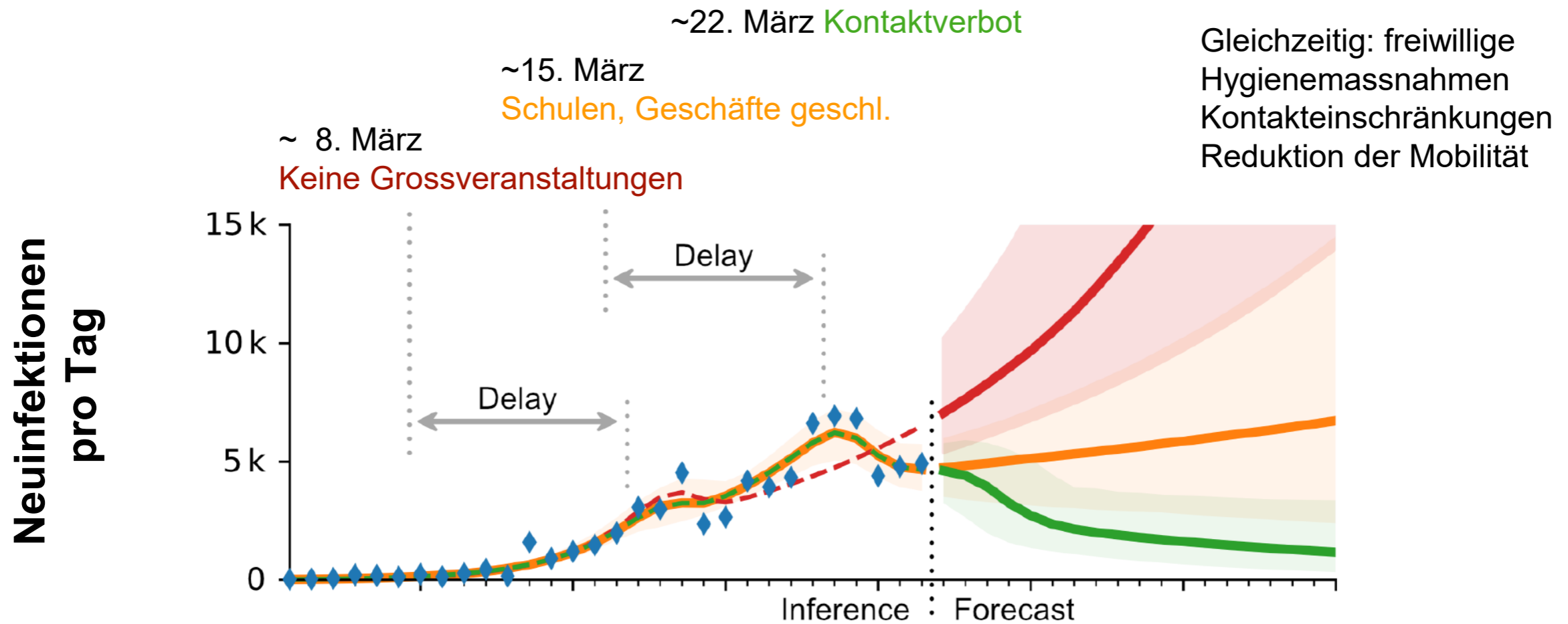
- **Ausbreitungsprozesse:**
Von der Theorie neuronaler Systeme zur Analyse von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen herleiten:**
Der Beitrag von Test-Trace-Isolate (TTI) – also von „Testen-Kontaktnachverfolgen-Isolieren“ – zur Eindämmung von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen abschätzen und vorhersagen:**
Wieviel tragen einzelne „Nicht-Pharmazeutische Interventionen“ (NPI) zur Eindämmung bei?
- Wo stehen wir, und was bringen die kommenden Monate?



Berichtete Neuinfektionen mit SARS-CoV-2 in Deutschland



Berichtete Neuinfektionen mit SARS-CoV-2 in Deutschland



- Erst nach dem 22. März sind ist R deutlich unter 1 gesunken
- Fallzahlen sind je 1-2 Woche um einen Faktor 2 gesunken – nach dem Kontaktverbot ($R \approx 0.8$)

Exponentielles Wachstum, und exponentieller Rückgang.

Exponentielles Wachstum:

25 → 50 → 100 → 200 → 400 → 800

Exponentieller Rückgang:

200 → 100 → 50 → 25 → 😊

Wie lange dauert der exponentielle Rückgang?

Wenn der R-Wert **0.7** erreicht,

dann braucht jeder der Schritte oben **1 Woche** (4 Wochen von 200 → 😊).

Wenn der R-Wert **0.9** erreicht,

dann braucht jeder der Schritte oben **1 Monat** (4 Monate von 200 → 😊).

→ **Je stärker der Lockdown, desto schneller ist er vorbei.**

Niedrige Fallzahlen halten:

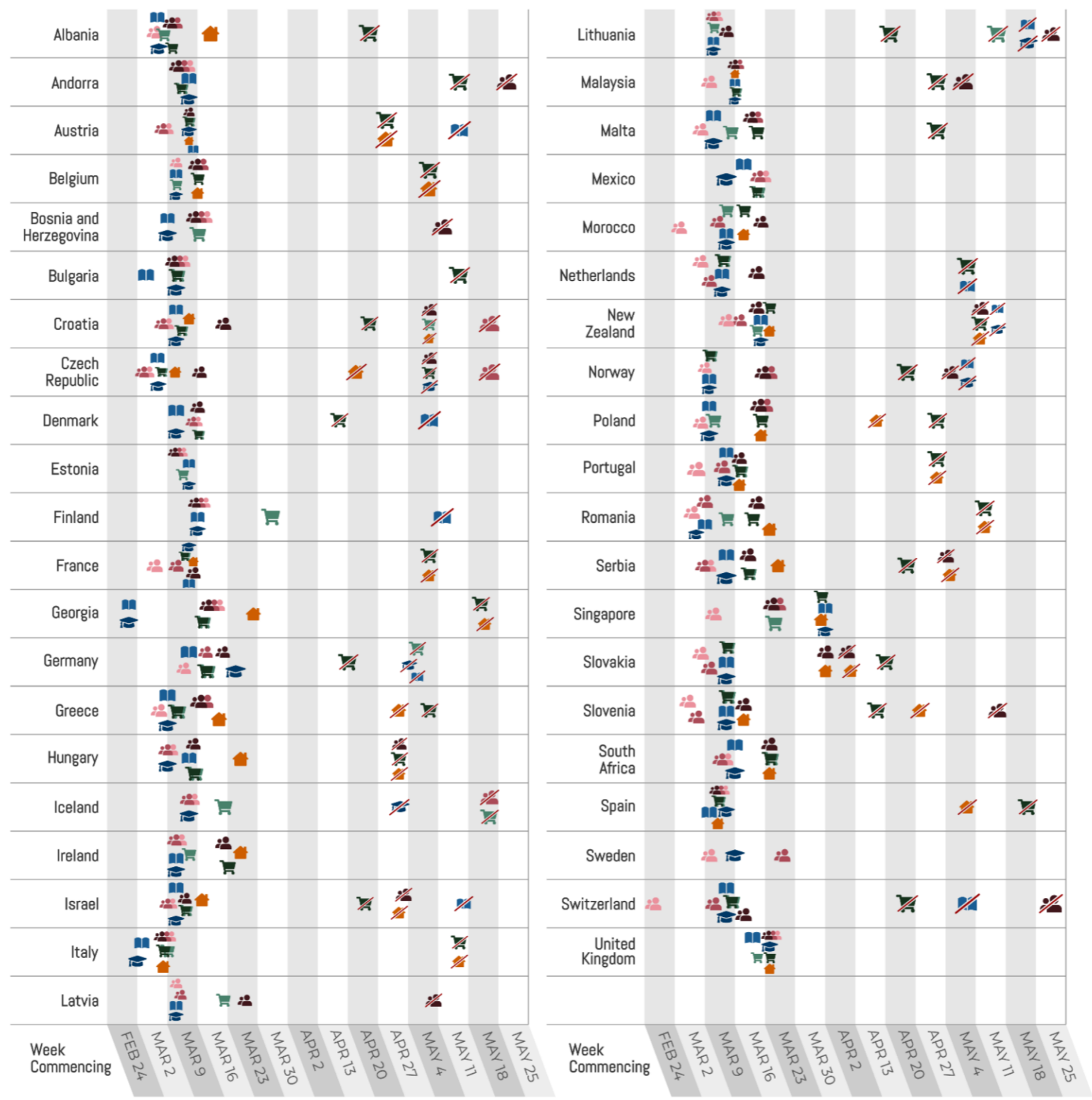
Wir brauchen rund 60 % für ein $R=1$ bei hohen Fallzahlen

Wir brauchen rund 40 % für ein $R=1$ bei niedrigen Fallzahlen

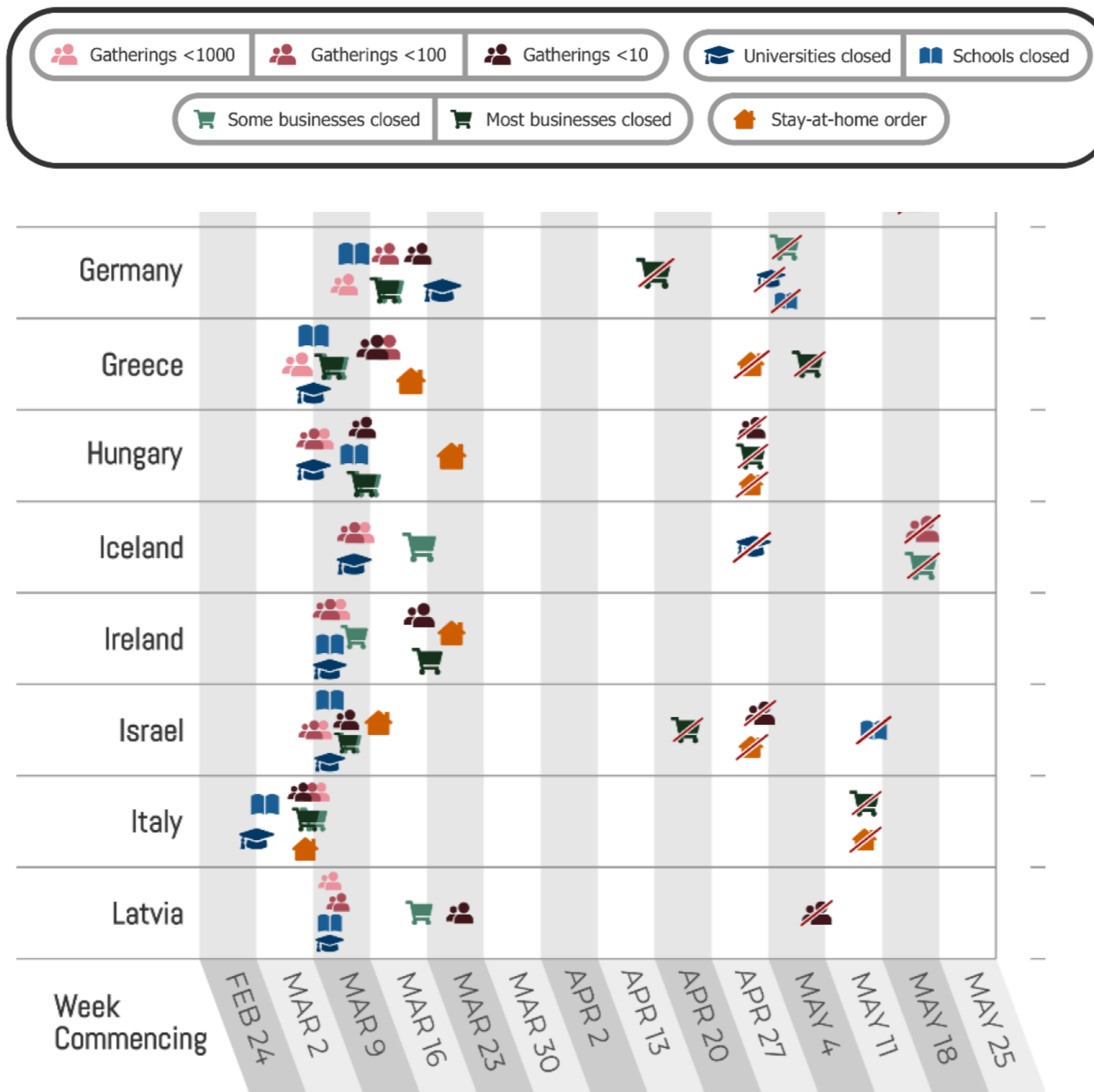
Die Wirkung der NPIs schätzen

Gatherings <1000
 Gatherings <100
 Gatherings <10
 Universities closed
 Schools closed

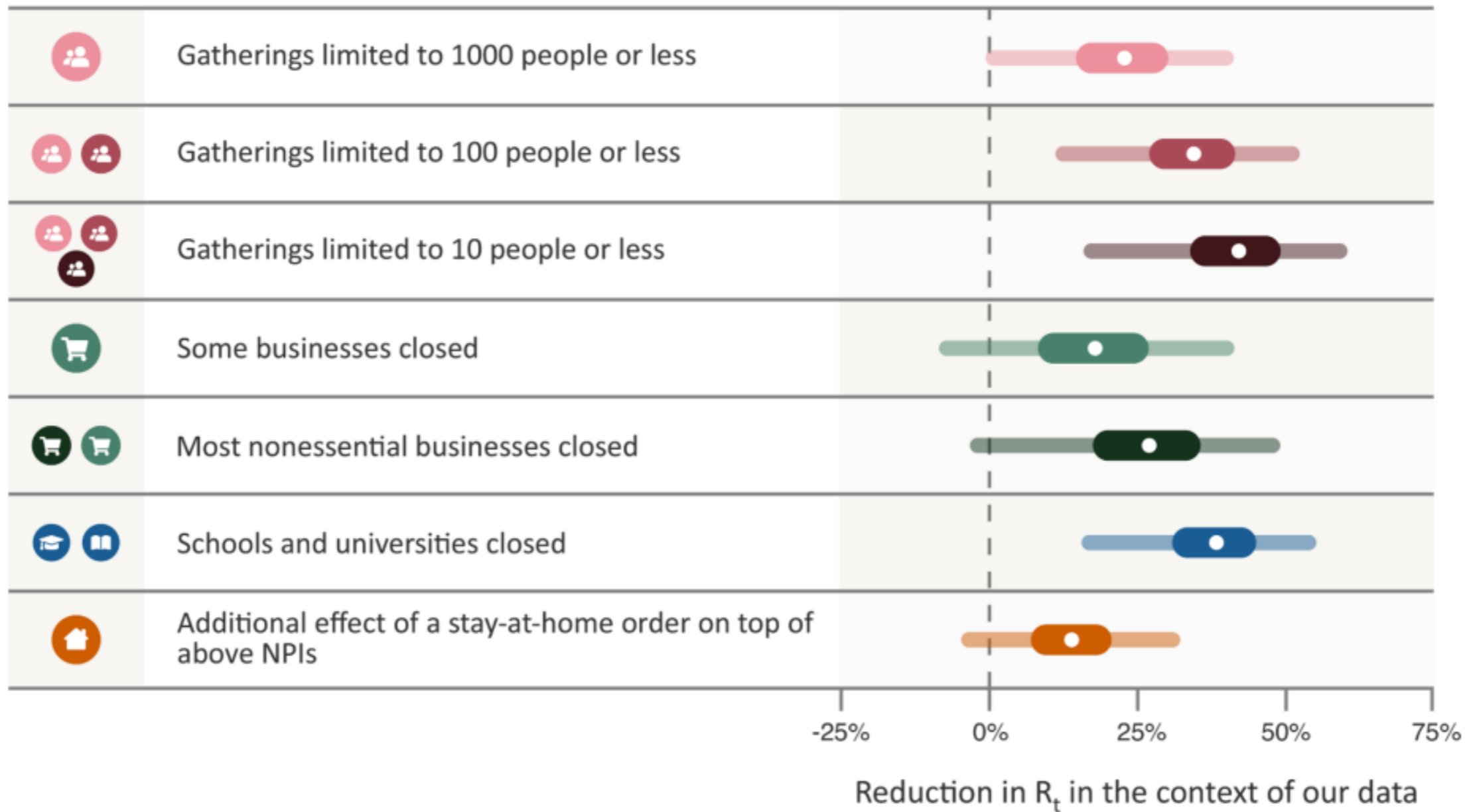
Some businesses closed
 Most businesses closed
 Stay-at-home order



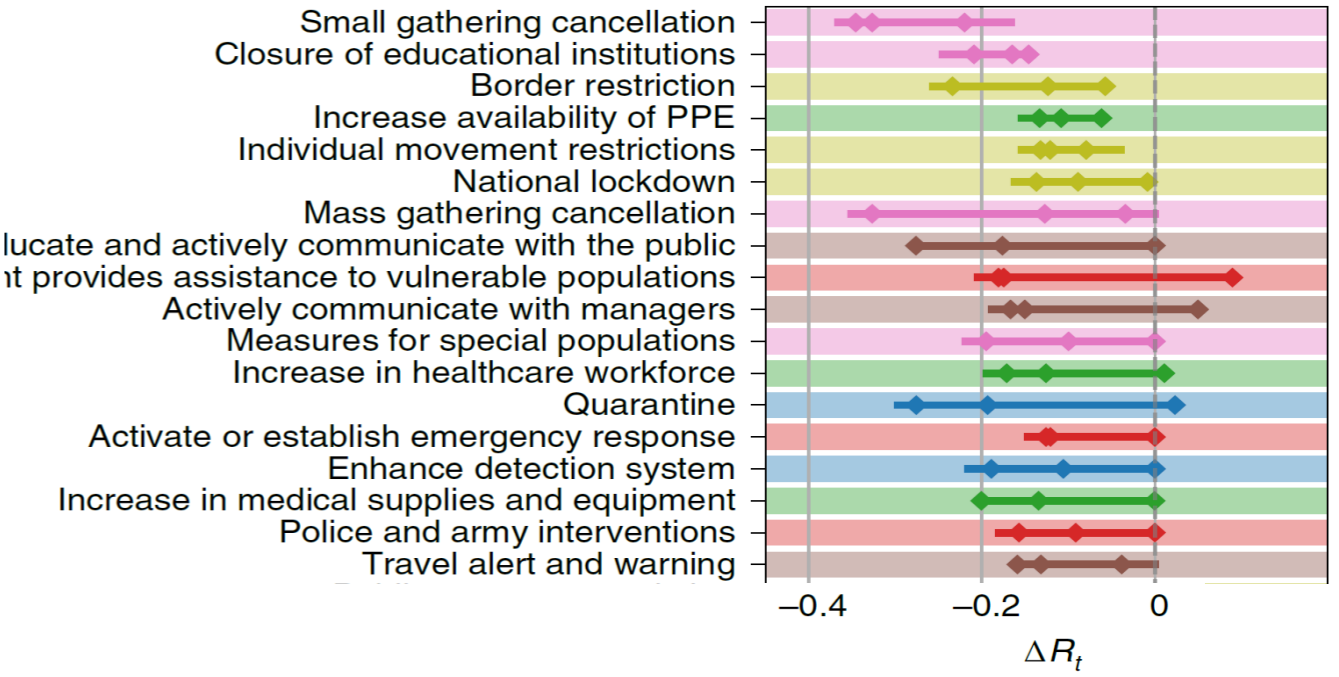
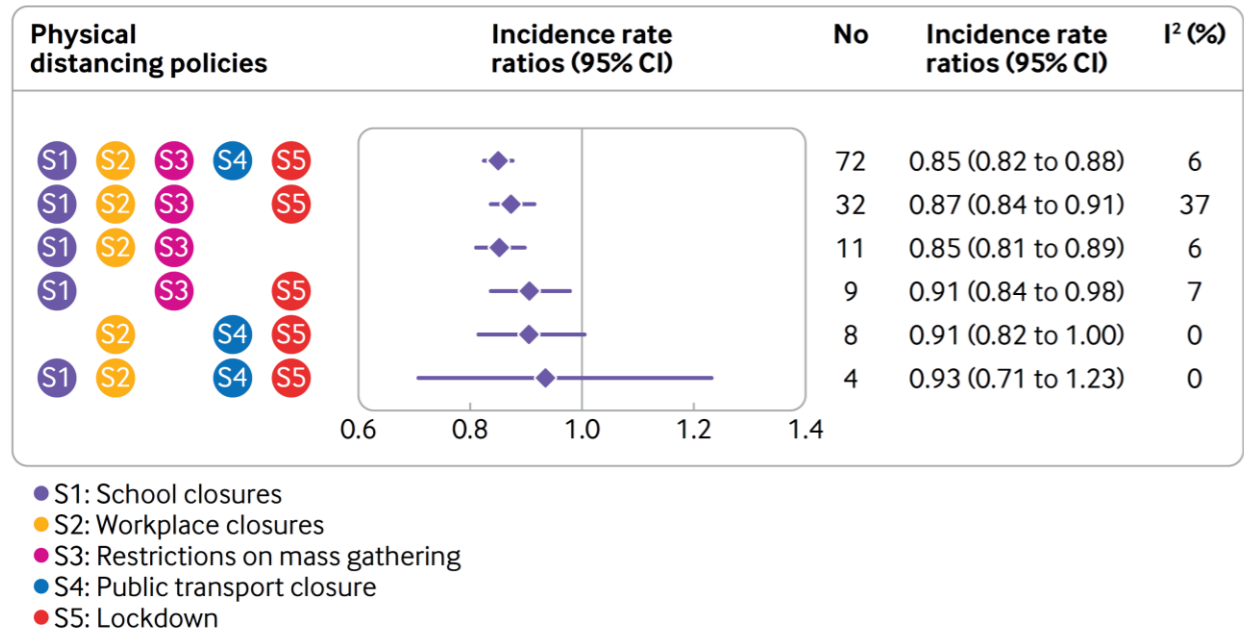
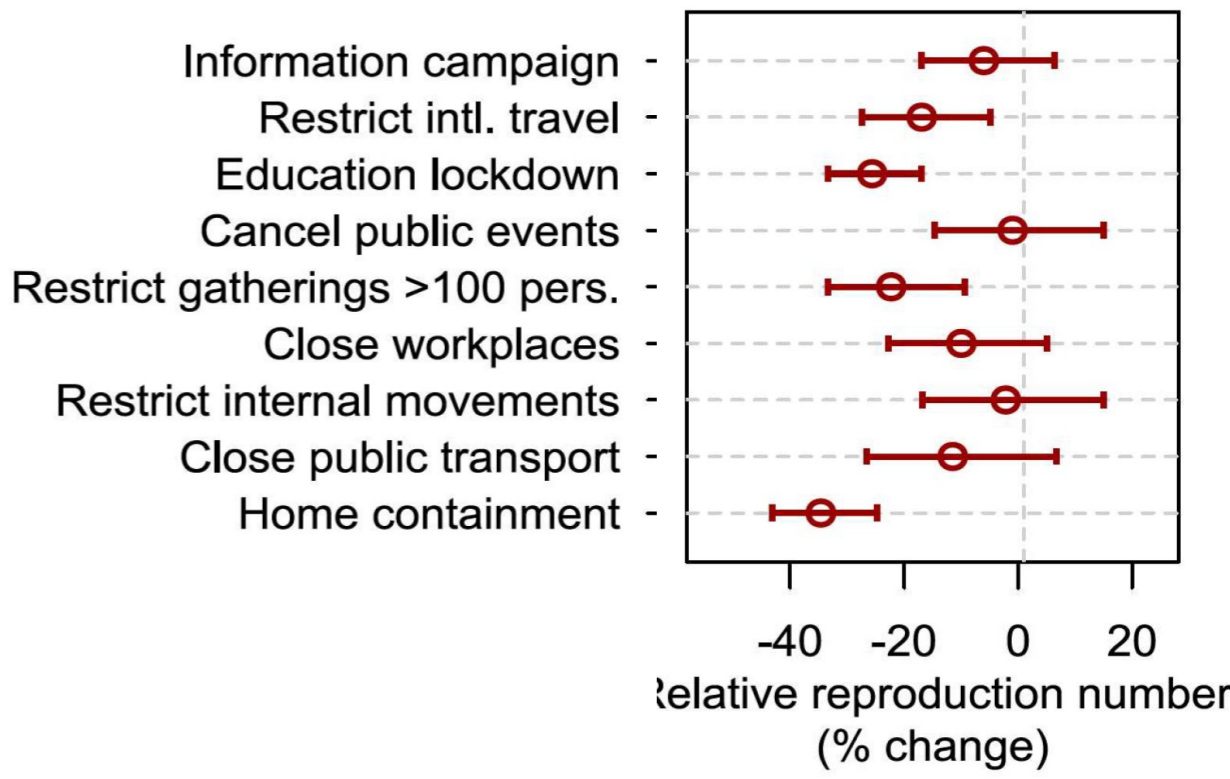
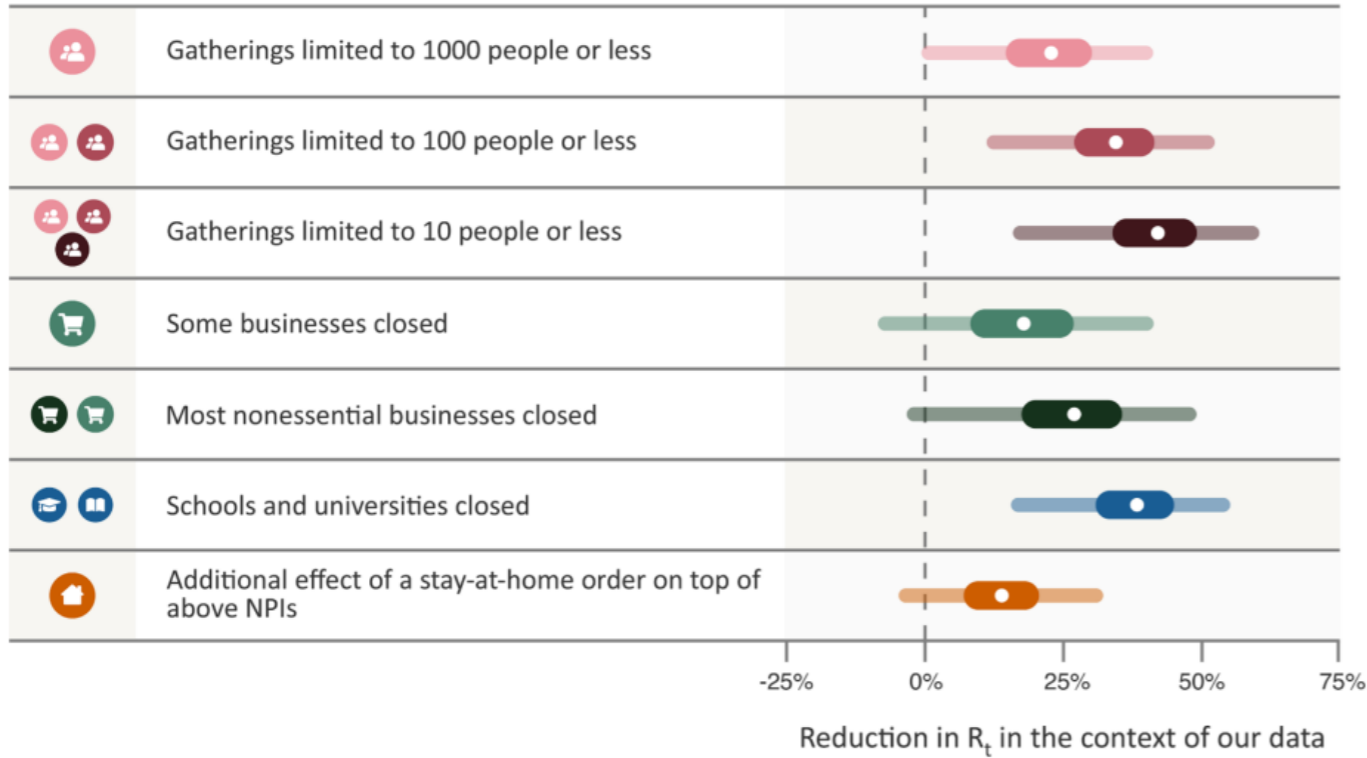
Die Wirkung der NPIs schätzen



Die Wirkung der NPIs schätzen

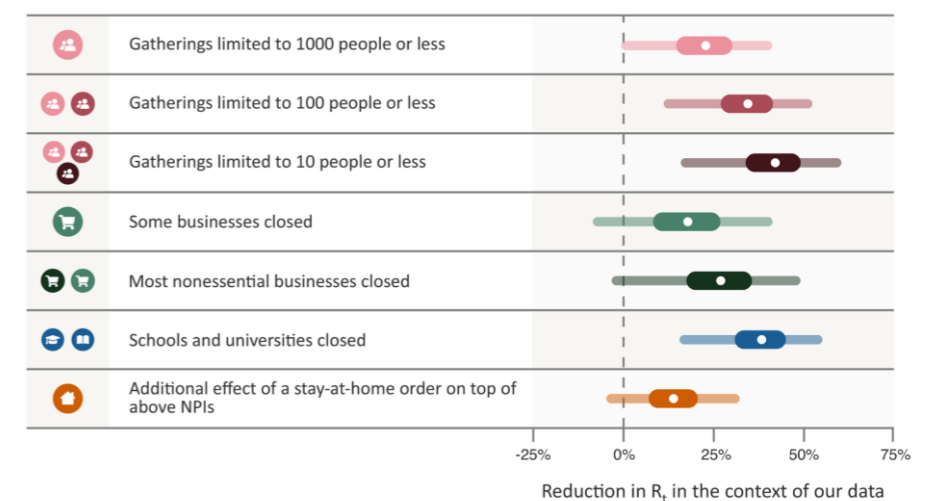
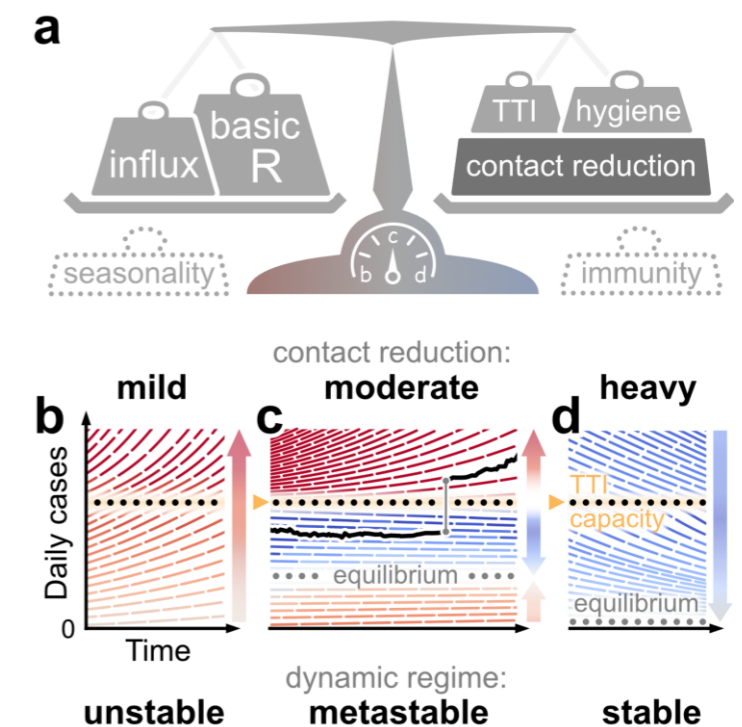
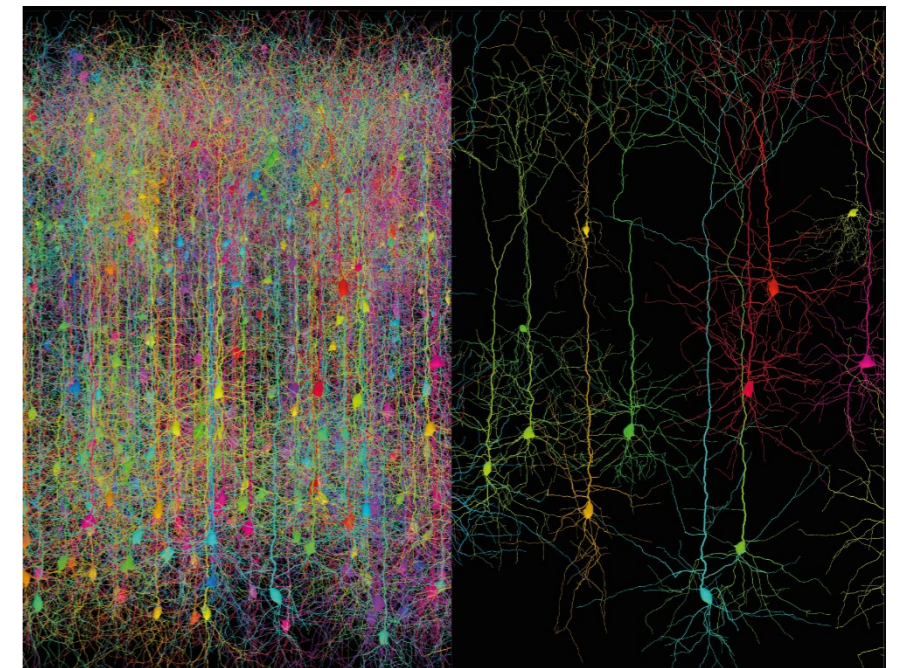


Die Wirkung der NPIs schätzen



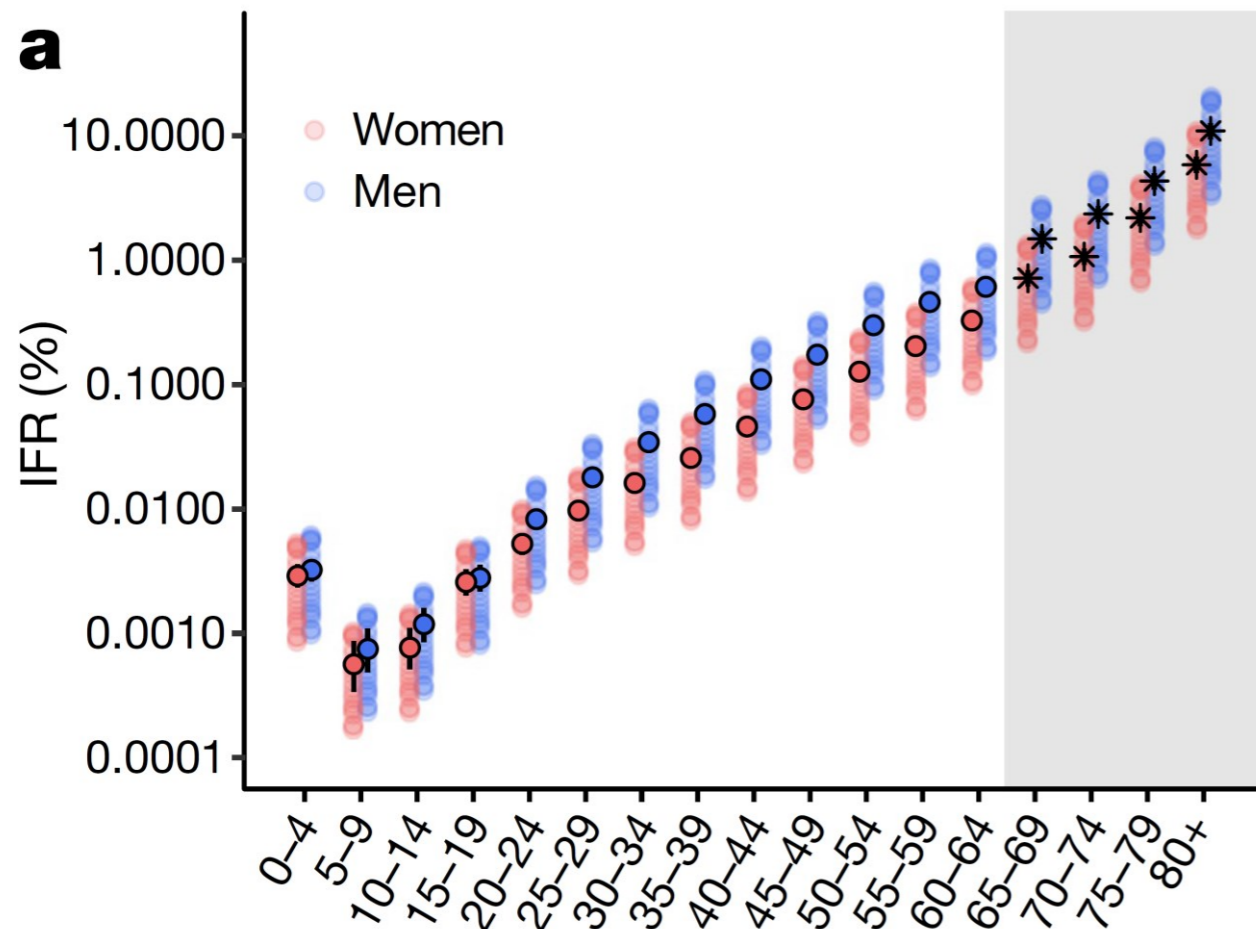
Inhalt

- **Ausbreitungsprozesse:**
Von der Theorie neuronaler Systeme zur Analyse von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen herleiten:**
Der Beitrag von Test-Trace-Isolate (TTI) – also von „Testen-Kontaktnachverfolgen-Isolieren“ – zur Eindämmung von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen abschätzen und vorhersagen:**
Wieviel tragen einzelne „Nicht-Pharmazeutische Interventionen“ (NPI) zur Eindämmung bei?
- **Wo stehen wir, und was bringen die kommenden Monate?**



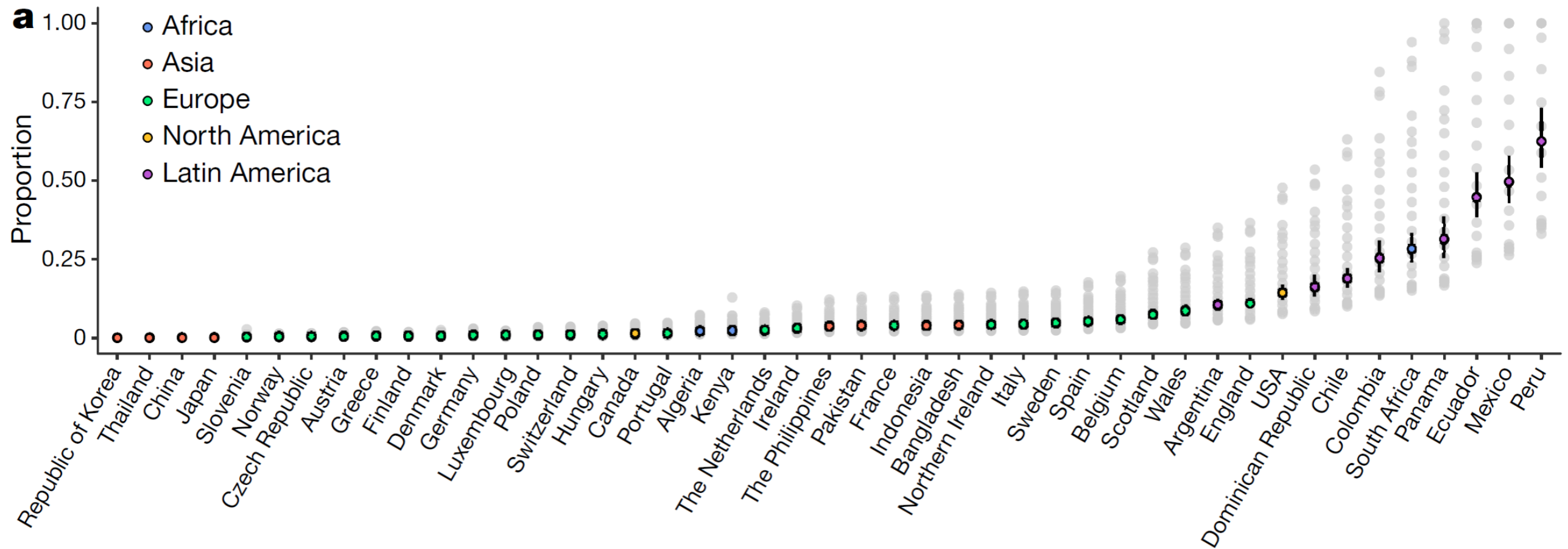
Infection fatality rate (IFR) – Infektionssterberate

IFR für SARS-CoV-2 ist altersabhängig



Age group	COVID-19 IFR (95% CI)	Automobile fatalities	
		England	USA
0–34	0.004 (0.003–0.005)	0.002	0.015
35–44	0.068 (0.058–0.078)	0.002	0.012
45–54	0.23 (0.20–0.26)	0.002	0.013
55–64	0.75 (0.66–0.87)	0.003	0.013
65–74	2.5 (2.1–3.0)	0.003	0.013
75–84	8.5 (6.9–10.4)	0.005	0.017
85 +	28.3 (21.8–36.6)	0.007	0.019

Anteil der Menschen, die bis Sommer 2020 COVID-19 hatten



Die kommenden Monate

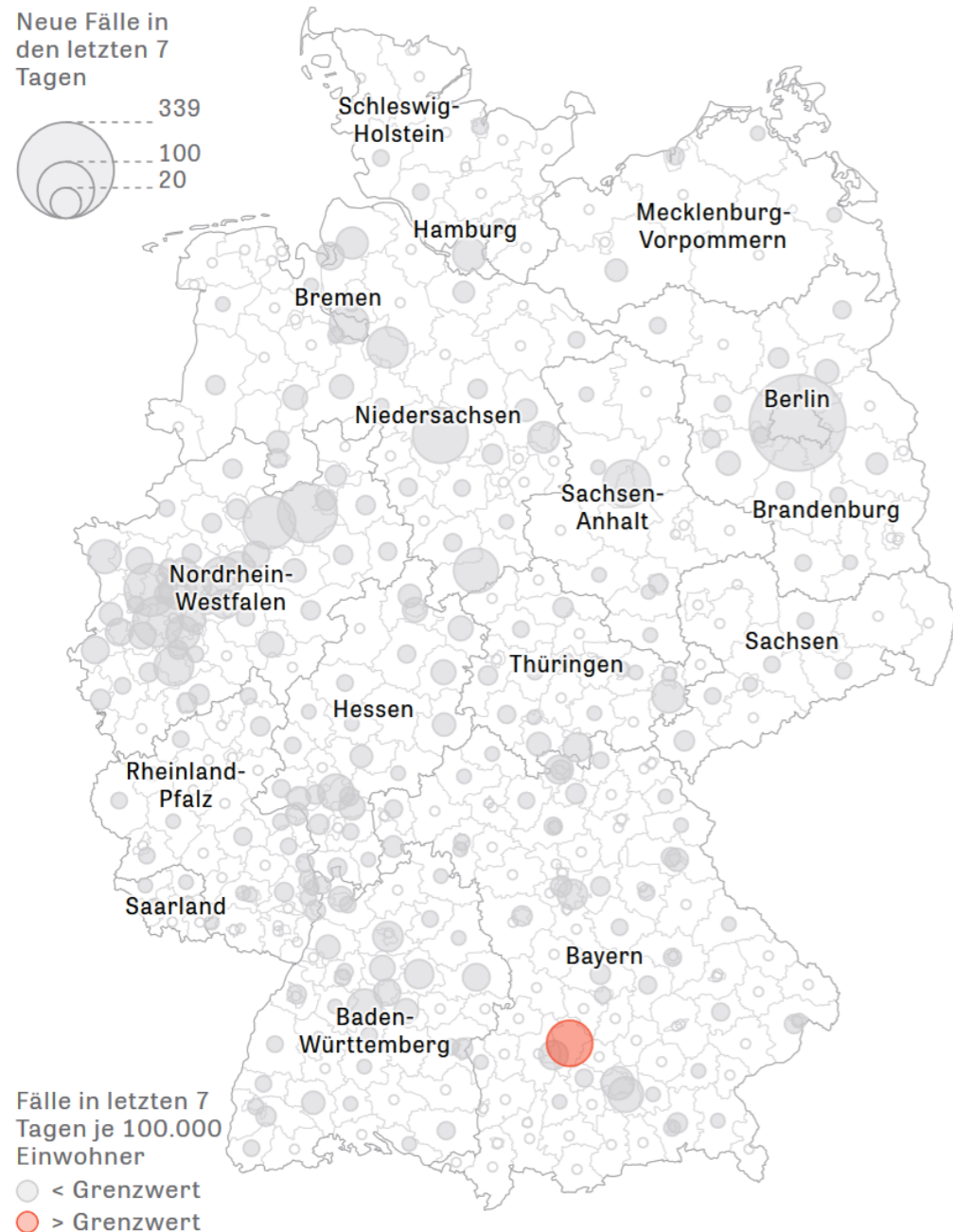
- **Impfstoffherstellung** dauert Zeit, wahrscheinlich nichtmal die Hälfte der Bevölkerung wird bis Sommer immun sein
- **PCR- und Schnelltests** reichen bisher nicht für eine engmaschige Testung (derzeit, ca. 1.4 Mio pro Woche bzw. 10 Mio pro Woche)
- **Saisonalität** bringt Erleichterung (geschätzt 20-30%) – jedoch nicht genug um die Welle ohne zusätzliche Massnahmen zu stoppen
- **Neue Varianten** wie z.B. B.1.1.7 sind zu erwarten
 - deutlich ansteckender ($R=1.3-1.7$ statt $R=1$)
 - oder können das Immunsystem umgehen
- **Der Übergang** von einer pandemischen in eine endemische Ausbreitung – oder Ausrottung - wird noch etwas dauern

Ein Plan für die kommenden Monate

Zwei Säulen zur Eindämmung:

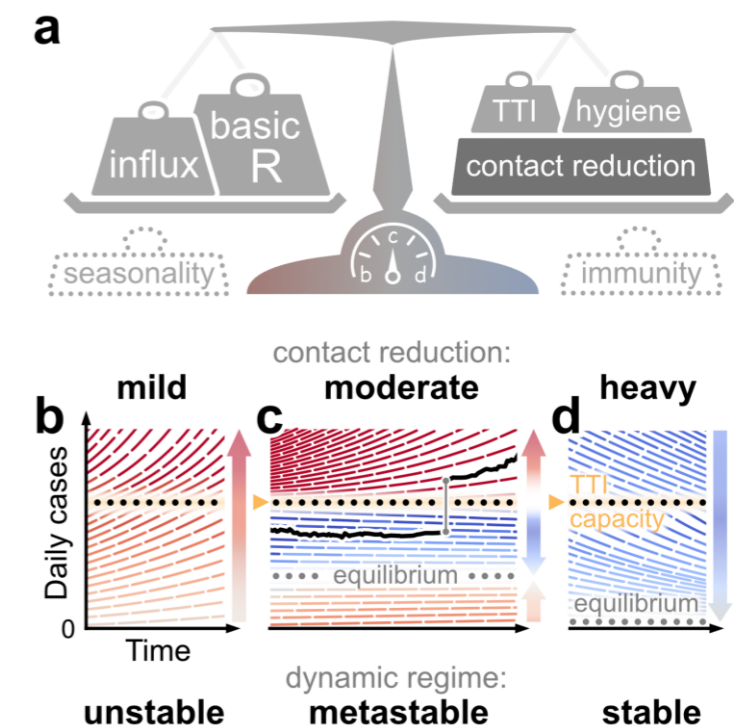
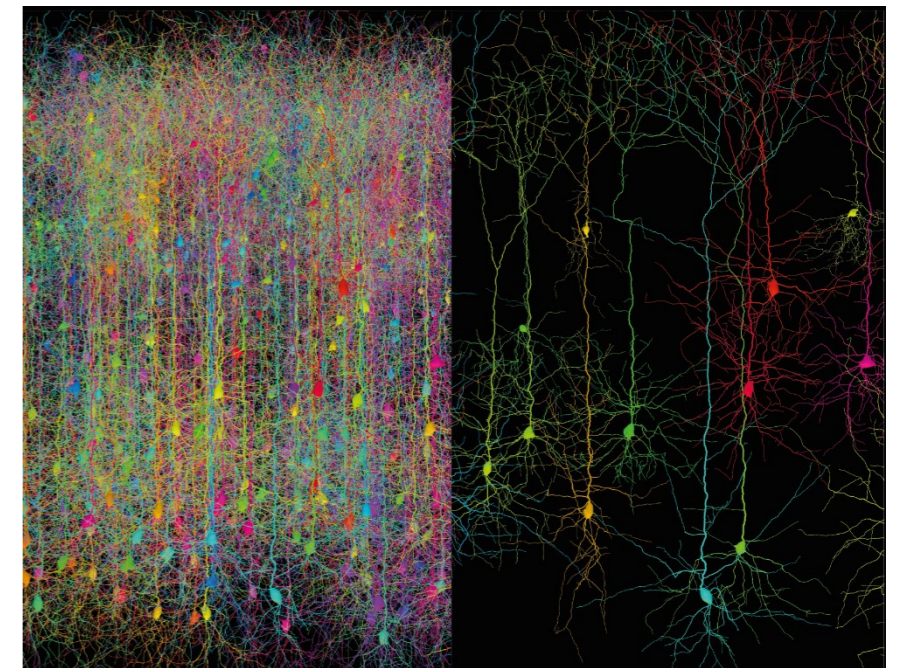
- 1. “Break the chain” via **Kontaktverfolgung**: Die Kontakte von infizierten Personen identifizieren und vorsorglich isolieren.
- 2. Neue Infektionen und Ausbrüche durch **Testen** frühzeitig entdecken

Niedrige Fallzahlen sind sowohl für die Gesundheit als auch für die Gesellschaft und Wirtschaft klar von Vorteil.



Zusammenfassung

- **Ausbreitungsprozesse:**
Von der Theorie neuronaler Systeme zur Analyse von COVID-19
- **Effektivität von Maßnahmen herleiten:**
 - TTI trägt zur Eindämmung
 - Bei Überschreitung der TTI-Kapazität → Kipppunkt
 - Bei niedrigen Fallzahlen, unterhalb der TTI-Kapazität → metastabiler Zustand, weniger Einschränkungen nötig.
- **Effektivität von Maßnahmen abschätzen**
NPIs wirken, aber ihre Wirksamkeit kann nur grob abgeschätzt werden
- **Wo stehen wir, und was bringen die kommenden Monate?**



Danke!

Priesemann Group

Sebastian Contreras
Jonas Dehning
David Ehrlich
Daniel Gonzalez Marx
Benedikt Grüger
Kira Herff
Emil Iftekhar
Matthias Linden
Matthias Loidolt
Fabian Mikulasch
Sebastian Mohr
Valentin Neuhaus
Lucas Rudelt
Alexander Schmidt
Andreas Schneider
Julian Schulz
Paul Spitzner
Patrick Vogt
Johannes Zierenberg
+ you?

External PhD students (co-supervised)

Benjamin Cramer (U Heidelberg)
Madhura Ketkar (ENI Göttingen)
Corentin Nelias (MPI-DS)

Alumni

Victor Brasch (EPFL)
Henrik von der Emde (Cambridge)
Jan Geisler (Max Planck School)
Jorge de Heuvel (U Mainz)
Annika Hagemann (Bosch)
Helge Heuer (U Göttingen)
Leonhard Leppin (MPI Garching)



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Diskussionen über COVID innerhalb und außerhalb des Göttingen Campus:

Heike Bickeböller, Philip Bittihn, Eberhard Bodenschatz, Wolfgang Brück, Alexander Ecker, Andreas Leha, Theo Geisel, Ramin Golestanian, Helmut Grubmüller, Stephan Herminghaus, Gerald Haug, Reinhard Jahn, Jürgen Jost, Norbert Lossau, Vladimir Zykov, Michael Meyer-Hermann, Iris Pigeot, Simone Scheithauer, Anita Schöbel, Ferdi Schüth, **Michael Wibrál & Michael Wilczek**



SPP 2205
Evolutionary optimization
of neuronal processing



Moritz Layer (Cambridge)
Joao Neto (MPI-DS)
Bruno del Papa (MERK)
Bettina Royen (Max Planck School)
Mathias Sogorski (PSI, Berlin)
Jens Wilting (Bosch)

[Dehning et al., Science, May 2020]
[Dehning et al., medRxiv 2020]
[Contreras et al., Nature Commun (2021) / arXiv:2009.05732]
[Contreras et al., arXiv:2011.11413]
[Alwan et al., The Lancet 2020]
[Linden et al., Dt. Aerzteblatt Int. / arXiv:2010.05850]
[Priesemann et al., The Lancet, 2021]
[Priesemann et al., The Lancet, in press]

Referenzen:

www.containcovid-pan.eu