

Abstand halten!

Physikalische Modelle aus der Theorie der weichen Materie liefern neue Einblicke in die Ausbreitung von Infektionskrankheiten.

Hartmut Löwen

Die Ausbreitung des Coronavirus SARS-CoV-2 hat weltweit zu einer großen Anzahl von Erkrankungen und Todesopfern geführt. Gleichzeitig motivierte sie enorme wissenschaftliche Anstrengungen in der Pandemiebekämpfung, etwa bei der Entwicklung von Impfstoffen. In der Physik wurden Modelle erarbeitet, um die Ausbreitung des Coronavirus zu beschreiben. Ein bemerkenswertes neues Modell dieser Art stellten kürzlich Michael te Vrugt, Jens Bickmann und Raphael Wittkowski von der Universität Münster vor [1].

Viele in der Beschreibung von Infektionskrankheiten verwendete Theorien setzen auf großen Skalen an. Das wichtigste Beispiel ist das SIR-Modell [2], das die Bevölkerung in drei Gruppen einteilt: Infizierbare (Susceptibles, S), Infizierte (Infected, I) und Genesene (Recovered, R). Infizierbare können sich bei Kontakt mit Infizierten anstecken, nach überstandener Infektion sind sie immun. Das SIR-Modell betrachtet lediglich die Gesamtzahl der Personen in der jeweiligen Gruppe, nicht aber ihre räumliche Verteilung. Diese spielt je-



doch für die Infektionsdynamik eine wesentliche Rolle: Wenn sich die Infizierten an anderen Orten aufhalten als die nicht Infizierten (beispielsweise aufgrund von Quarantäne), nimmt bei gegebener Anzahl von Infizierten die Anzahl der Neuinfektionen ab. Das einfache SIR-Modell kann solche Phänomene nur indirekt über eine Veränderung der effektiven Ansteckungsrate modellieren, nicht jedoch explizit. Nur eine explizite

Modellierung erlaubt es, die Effekte verschiedener Maßnahmen zur Pandemiebekämpfung voneinander abzugrenzen.

Das andere Extrem bilden mikroskopische Modelle für Infektionsdynamik (individual-based oder agent-based models). Sie beschreiben das Verhalten einzelner Personen im Rahmen aufwändiger Computersimulationen und liefern ein sehr genaues Bild der Infektionsdynamik.

Ebenfalls als mikroskopisch zu klassifizieren sind die im Zuge der „Corona-Physik“ eingesetzten Modelle, die Abstand haltende (also Social Distancing betreibende) Personen als Teilchen mit abstoßenden Wechselwirkungen modellieren.

In der Statistischen Physik stehen erfolgreiche und gut erprobte Theorien zur Verfügung, um Systeme aus sehr vielen wechselwirkenden Teilchen zu beschreiben. In der Theorie der weichen Materie – insbesondere kolloidaler Fluide – hat die dynamische Dichtefunktionaltheorie (DDFT) große Bedeutung erlangt [3, 4]. Sie verallgemeinert einerseits die klassische Dichtefunktionaltheorie (DFT) auf Nichtgleichgewichtssysteme und andererseits die Diffusionsgleichung durch explizite Berücksichtigung von Teilchenwechselwirkungen.

Die gewöhnliche Diffusionsgleichung modelliert in Kombination mit dem SIR-Modell etwa die Ausbreitung der Pest im Europa des Mittelalters [6]. Das nun entwickelte SIR-DDFT-Modell [1] beschreibt mit Mitteln der Statistischen Physik eine Gesellschaft aus Social Distancing betreibenden Personen als ein System von Teilchen mit repulsiven Wechselwirkungen, die sich gegenseitig anstecken können. Mathematisch leistet dies eine Kombination der DDFT mit dem SIR-Modell. Eine frei verfügbare Software

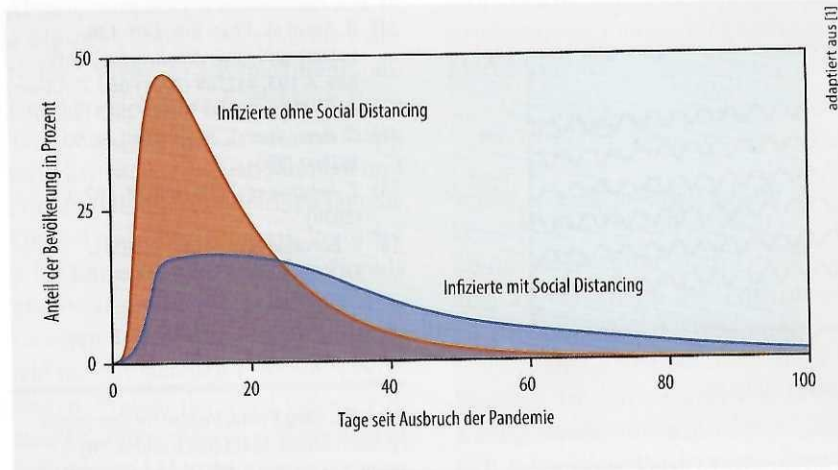


Abb. 1 Die Infektionszahlen entwickeln sich sehr unterschiedlich mit oder ohne Social Distancing.

berechnet numerische Lösungen der Modellgleichungen [7].

Im SIR-DDFT-Modell zeigt eine Variation der Modellparameter, wie sich die repulsive Wechselwirkung (also das Social Distancing) auf den Verlauf der Pandemie auswirkt. Bei schwachen repulsiven Wechselwirkungen ist in den Simulationen ein heftiger Ausbruch zu beobachten, während starke Wechselwirkungen zu einem deutlichen Rückgang der Infektionszahlen führen (Abb. 1). Das simulierte Abstandhalten hat also genau den gewünschten und fast schon sprichwörtlichen „Flatten-the-Curve-Effekt“.

Genau wie verwandte Modelle aus der Theorie der weichen Materie zeigt das SIR-DDFT-Modell auch Phasenseparationseffekte, die in diesem Fall die räumliche Verteilung der Infizierten beschreiben. Konkret sondern sich bei ausreichend starken repulsiven Wechselwirkungen die Infizierten von den Gesunden räumlich ab und sammeln sich in kleinen Punkten („infection spots“, Abb. 2a). Physikalisch lassen sich diese Punkte als Haushalte in Quarantäne interpretieren. Die räumliche Trennung von Infizierten und Gesunden verringert die Anzahl der Kontakte und damit die Anzahl der Neuinfektionen.

Kürzlich erweiterten die Forscher der Universität Münster ihr Modell um nicht zeitlich konstante Ansteckungsraten und Wechselwirkungen [5]. Dies berücksichtigt, dass soziale Restriktionen zur Pandemiebekämpfung nicht durchgängig gleich

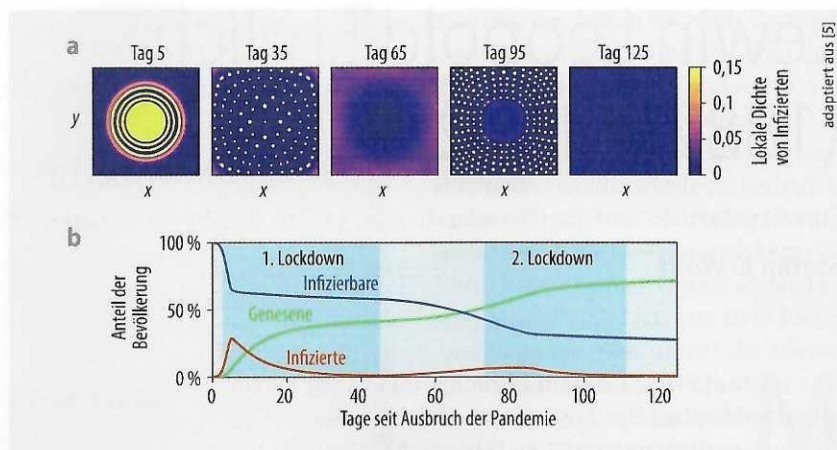


Abb. 2 Die Infizierten sammeln sich entweder in kleinen Punkten oder verteilen sich über größere Gebiete (a). Die Infektionszahlen in der hier modellierten Pandemie zeigen mehrere Wellen (b).

stark sind, sondern von der Politik basierend auf den aktuellen Infektionszahlen verschärft oder gelockert werden. Die Effekte solcher Maßnahmen sind gerade im Hinblick auf politische Diskussionen etwa um die Notbremse oder die Einrichtung von Modellregionen von besonderem Interesse.

Das erweiterte Modell basiert auf der Annahme, dass die Restriktionen bei Überschreitung eines bestimmten Grenzwertes eingeführt und bei Unterschreitung eines (anderen) Grenzwertes wieder aufgehoben werden. Abhängig von der Wahl dieser Grenzwerte variiert die Anzahl von Infektionswellen, was gegebenenfalls mehrere Lockdowns erforderlich macht. Dies ermöglicht eine systematische Untersuchung der Frage, wie diese Grenzwerte zu wählen sind, um beispielsweise die Anzahl der Toten

möglichst gering zu halten. Das erweiterte Modell simuliert eine Pandemie erfolgreich (Abb. 2b): Nach Rückgang der Infektionszahlen aufgrund des Lockdowns werden die Maßnahmen wieder aufgehoben. Dies führt zu einer zweiten Welle, die einen zweiten Lockdown erforderlich macht. Nach Ende des zweiten Lockdowns ist die Pandemie überstanden.

Das SIR-DDFT-Modell zeigt die Nützlichkeit physikalischer Modellierung bei der Bekämpfung der Corona-Pandemie. Diese half auch bei der Untersuchung der Effekte des Lockdowns in Deutschland [8] und bei der Entwicklung optimaler Impfstrategien [9]. Außerdem zeigt das SIR-DDFT-Modell die Nützlichkeit der DDFT auch außerhalb ihres ursprünglichen Einsatzgebiets in der Theorie kolloidaler Fluide.

- [1] M. te Vrugt et al., Nat. Commun. **11**, 5576 (2020)
- [2] W. O. Kermack und A. G. McKendrick, Proc. R. Soc. Lond. A **115**, 700 (1927)
- [3] R. Evans, Adv. Phys. **28**, 143 (1979)
- [4] M. te Vrugt et al., Adv. Phys. **69**, 121 (2020)
- [5] M. te Vrugt et al., J. Phys. Commun. **5**, 055008 (2021)
- [6] J. V. Noble, Nature **250**, 726 (1974)
- [7] J. Jeggle und R. Wittkowski, Zenodo (2021), DOI: 10.5281/zenodo.4702572
- [8] J. Dehning et al., Science **369**, eabb9789 (2020)
- [9] J. Grauer et al., Sci. Rep. **10**, 21594 (2020)

Der Autor

Prof. Dr. Hartmut Löwen, Institut für Theoretische Physik II: Weiche Materie, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 40225 Düsseldorf

Kurzgefasst

Optimierte Beschleunigung

Dem LUX-Team am Center for Free-Electron Science in Hamburg ist es gelungen, die Energieverteilung eines plasmabeschleunigten Elektronenstrahls zu minimieren. Dazu füllten die Forschenden den vorderen Teil der Plasmazelle mit einem Gemisch aus Wasserstoff und Stickstoff. Letzterer setzt Elektronen so frei, dass sie optimal von der Plasmawelle beschleunigt werden. Eine KI half dabei, die fünf Hauptparameter der Anlage automatisch zu steuern.

S. Jalas et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 104801 (2021), M. Kirchen et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 174801 (2021)

Den Farben auf der Spur

Gabriel Lippmann wurde 1908 für seine Farbfotografie mittels Interferenz mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet. Nun konnte ein Team der École Polytechnique Fédérale de Lausanne den zugrundeliegenden Prozess vollständig analysieren und Verzerrungen bei der Farbwiedergabe korrigieren. Dazu muss die Zusammensetzung der fotografischen Platten bekannt sein: Während der Algorithmus mit eigens hergestellten Platten gut funktioniert, verbleiben bei historischen Platten Fehler.

G. Baechler et al., PNAS **118**, e2008819118 (2021)