

# *Anregungen zu einer verbesserten live-Interpretation des Verlaufs der SARS-CoV-2-Pandemie*

## *Suggestion of an Improved Live-Interpretation of the Progression of the SARS-CoV-2 Pandemic*

Horst Neunhöfer, Jena

Schlüsselworte: SARS-CoV-2-Pandemie, Seismologie, Prozess in Selbstorganisation, Linearisierung, Zeitreihenanalyse, Reproduktionsfaktor, Verdopplung, Halbierung, Chaos.

Key words: SARS-CoV-2 pandemic, seismology, process of self-organisation, linearization, time series analysis, reproduction factor, doubling, halving, chaos.

### *Zusammenfassung*

Die Ausbreitung von SARS-CoV-2 in Deutschland als ein sich selbstorganisierender Prozess wird im Kontext mit anderen Prozessen dieser Art, insbesondere mit dem Auftreten von Erdbeben, betrachtet. Es wird diskutiert, inwieweit mathematische Methoden, die bei der Interpretation von Erdbeben üblich sind, auch auf die Beobachtungen von SARS-CoV-2 nutzbringend angewendet werden können. Zugrunde liegen die Daten der bekannten täglichen Anzahl von Infektionen während der ersten 200 Tage der Pandemie. Im Ergebnis zeigte sich, dass mitunter schneller sogar etwas schärfere Aussagen getroffen werden können, als in öffentlichen virologischen Bulletins verbreitet wird. Ein weiterer Vorteil entsteht, wenn die Methoden der Bearbeitung von Zeitreihen auf die Daten angewendet werden.

### *Summary*

The proliferation of SARS-CoV-2 in Germany is a process of self-organisation. It is discussed and put into context of other similar processes of this kind, especially the occurrence of earthquakes. It is discussed, to what extent mathematical methods related to interpretation of earthquakes can be usefully applied to the observations of SARS-CoV-2. The data base consists of the daily number of known infections throughout the first 200 days of the pandemic. The finding is that occasionally, a statement regarding the „process flow“ can be found a little bit quicker and even more precise than communicated currently in public by virological bulletins. The implementation of methods for the calculation of time series yields an additional improvement.

## **1 Einleitung**

Angeregt durch eigene seismologische Untersuchungen (Neunhöfer & Hemmann, 2005), wird ein Versuch unternommen, das unmittelbare zeitliche Erscheinungsbild der Corona-Pandemie zu interpretieren. Beide Erscheinungen, Erdbeben und Corona-Pandemie, sind

Vorgänge in Selbstorganisation, oder auch dissipative Prozesse. Sie brauchen zu ihrem Fortbestehen *Energie*-Nachschub. Das bewirken einerseits die aktuellen plattentektonischen Vorgänge und andererseits die Weitergabe der Erreger durch Tröpfchen-, Aerosol- oder Schmierübertragung. Für solche Prozesse gelten exponentielle Gesetze. In der Seismologie wird das in der Häufigkeit-Magnituden-Verteilung deutlich, wo in einem Herdgebiet die Zahl der Erdbeben von großen zu kleinen Magnituden hin exponentiell zunimmt (s. u. a. Neunhöfer & Hemmann, 2005). Ein weiteres Beispiel aus der Geophysik, eingeordnet in das übergreifende Gebiet des dynamischen Verhaltens von Flüssigkeiten, ist der Ablauf von Konvektion im Erdmantel. Als ein drittes Beispiel kann man bei Tropfsteinen die Entstehung von Stalaktiten anführen, wenn man einen Stalaktiten als *tropfenden Wasserhahn* abstrahiert.

Die Daten der Corona-Pandemie in Deutschland werden vor allem Radtke (2020) entnommen, so wie sie dort in täglicher Aktualisierung der Öffentlichkeit bekannt gegeben werden. Radtke beruft sich als Quelle auf die Johns-Hopkins-University (USA, Maryland). Auf eine zweite Quelle, das Robert-Koch-Institut (RKI), speziell RKI (2020), die nach eigenen Angaben die täglichen Meldungen der Gesundheitsämter in Deutschland zusammenfasst und weiter verarbeitet, wird ergänzend Bezug genommen. Aufbauend auf diesen kontinuierlichen Datensatz wird der Verlauf der Infektionszahlen der Corona-Pandemie vom Beginn der Pandemie an verfolgt und interpretiert. Unsere Interpretation unterscheidet sich von der des Robert-Koch-Instituts (2020), wo man, im Unterschied zu hier, bestrebt ist, letztendlich die tägliche Zahl jener Personen zu interpretieren, bei denen gerade Symptome erstmalig auftreten. Die Unterschiede zwischen beiden Betrachtungsweisen werden in einem speziellen Abschnitt kommentiert.

Die laufende Phase der Pandemie neigte sich im Untersuchungsgebiet Deutschland einem erträglichen Maße zu, ehe sie sich ab der zweiten Julidekade wieder nahezu kontinuierlich verschärft. Es erscheint deshalb geboten, die nachfolgenden methodischen, ausdrücklich betont *nicht virologischen* Betrachtungen zur Diskussion zu stellen.

## **2 Mathematik und die Corona-Pandemie**

Die kumulative Anzahl der infizierten Personen  $N$  in einem definierten Gebiet, wie z.B. Deutschland, sei

$$N = \exp(a+b*t), \quad (1)$$

und logarithmiert

$$\ln(N) = a + b*t, \quad (1a)$$

wobei  $t$  die Zeit in Tagen bedeutet,  $a$  fixiert die Gerade in (1a) vertikal in der  $\{\ln(N), t\}$ -Ebene und  $b$  bestimmt ihren Anstieg.

Die Logarithmierung macht die Aufgabe linear. Es empfiehlt sich, den gesamten Vorgang halblogarithmisch darzustellen.

Die Zahl  $n$  der pro Zeiteinheit neu infizierten Personen ist dann

$$n = dN/dt = b \cdot \exp(a + b \cdot t) \quad (2)$$

und logarithmisch ausgedrückt.

$$\ln(n) = \ln(b) + a + b \cdot t \quad (2a)$$

oder

$$\ln(n) = \ln(b) + \ln(N). \quad (3)$$

Durch das Logarithmieren werden die Vorteile, die ein Rechenschieber für eine Multiplikation oder Division bietet, in die  $\{\ln(N), t\}$ -Fläche übertragen, wie die Abb. 1 verdeutlicht. Zum Zeitpunkt  $t_2$  werde eine Maßnahme zur Dämpfung der Pandemie in den N-Werten wirksam. Wäre sie um  $t_2 - t_1$  Tage früher erfolgt, so wäre ein Verlauf eingetreten, die einer Verschiebung des oberen grauen Rechteckes in das untere entspräche. Die Pandemie spielte sich dann bei einer niedrigeren Zahl von Infizierten ab.

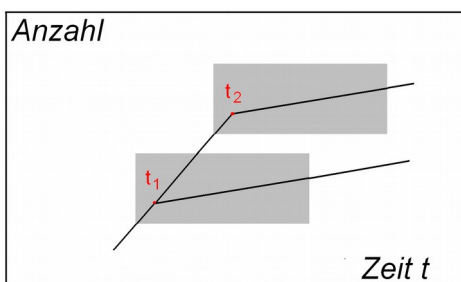


Abb. 1: Verschiebung eines  $\{\ln(N), t\}$ -Verlaufs nach einer früheren Zeit. Schematisch.

Wegen (1a) ist die Doppelwertzeit  $\Delta$ , die Zeit in der sich  $n$  verdoppelt,

$$\Delta = \log(2) / b. \quad (4)$$

Weil  $N(t)$  systematische Abweichungen teilweise ausmittelt, infolgedessen weniger streut als  $n(t)$ , hat es sich in der Praxis eingebürgert, die Parameter  $a$  und  $b$  aus (1a) mittels linearer Regression zu bestimmen. Allerdings wird dabei vorausgesetzt, dass sich der dissipative Prozess im Verlaufe der Zeit nicht verändert. Das ist, wie später gezeigt wird, im Falle der Pandemie nicht der Fall. Die Substitution von  $n$  durch  $N$  ist dann nur für

$$v(t) \approx N(t) \quad (5)$$

erlaubt. Dadurch wird auch dem Widerspruch genüge getan, dass einerseits bei einer Abnahme der täglichen Infektionen  $dn/dt < 0$  möglich sein muss, andererseits generell  $dN/dt \geq 0$  gilt.  $v(t)$  wird durch (6) definiert, wobei  $D$  die Zeitdauer sei, während der ein Erkrankter andere Personen anstecken kann, also virulent ist.

$$v(t) = N(t) - N(t-D) \quad (6)$$

$v(t)$  ist eine *formale* Größe, schon weil es üblich ist, Personen, die als erkrankt diagnostiziert werden, sofort durch Quarantäne dem Alltag zu entziehen. Ihr steht  $v_0(t)$  gegenüber, die Zahl der vorhandenen Virusträger, die *prinzipiell* andere Personen anstecken können:

$$v_0(t) = v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) \quad (7)$$

$v_1(t)$  ist die Anzahl jener Personen, bei denen auftretende Symptome auf eine Erkrankung hingewiesen haben. In  $v_2(t)$  werden jene Personen vereint, die durch vorsorgliche Testung im Labor als infiziert bekannt geworden sind. Beide Gruppen werden, sobald die Krankheit bekannt wird, der Öffentlichkeit durch Quarantäne vorenthalten und sind bis dahin zeitlich verkürzt in der Öffentlichkeit virulent. Schließlich umfasst  $v_3(t)$  eine Personengruppe, welche die Infektion ohne davon zu bemerken durchläuft. Je mehr auf das Virus prophylaktisch getestet wird, desto größer wird  $v_2(t)$  auf Kosten von  $v_3(t)$ .

Für den Übergang vom natürlichen zum 10er-Logarithmus, letzterer von uns benutzt, gilt die Beziehung  $\log_{10}(x) = \ln(x)/\ln(10)$ .

Die Gefahr, an Covid-19 zu erkranken, unterliegt vor allem zwei Einflüssen: der Aggressivität des Virus einerseits und den existierenden Möglichkeiten für eine Ansteckung andererseits. In praxi werden Maßnahmen, wie eine gute Hygiene, genügend Abstand zu anderen Personen, Mund-Nasen-Schutz und andere, empfohlen bzw. durchgesetzt, um Ansteckungen einzuschränken und die Ausbreitung der Pandemie abzuschwächen. Unabhängig davon: *Eine Selbstorganisation bleibt in jedem Fall bestehen, jedoch zu sich ändernden Konditionen für das Virus. Entsprechend werden Änderungen der Parameter  $a$  und  $b$  im Verlaufe der Pandemie erzwungen.*  $\Delta$ , die *Doppelwertzeit*, wird größer, wenn eine Gegenmaßnahme erfolgreich war. Schon bald nach dem Anfang der Pandemie wird die Bedingung (5) verletzt. Weitere Untersuchungen müssen nun mit  $n(t)$  erfolgen. Letztlich sollte das Ziel angestrebt werden,  $b < 0$  zu erreichen. In diesem Fall ist  $\Delta$  die *Halbwertzeit*. Sie gibt jenes Zeitintervall an, in der sich die Anzahl der aktiven Virusträger halbiert.

Die Beobachtungen werden in einer linearen Skala gezählt, die lineare Regression erfolgt nach einer Transformation in die logarithmische Skala. Die Ergebnisse werden dadurch verzerrt, weil schon für den einfachen Mittelwerte zweier Werte,  $n_1$  und  $n_2$ , durch den Überstrich gekennzeichnet,

$$\overline{n_1, n_2} > \exp(\ln(n_1), \ln(n_2))$$

gilt. Ebenso gilt auch für die kumulative Häufigkeit über das gesamte Intervall der Regression vor (Index obs) und nach (adj) der Ausgleichung  $N_{obs} > N_{adj}$ . Diese Verzerrung ist methodisch begründet. Sie wird empirisch korrigiert, indem man den Parameter  $a$  um einen kleinen, für jedes Beispiel neu zu bestimmenden Betrag  $\epsilon$  so vergrößert, dass  $N_{obs} = N_{adj}$  erhalten bleibt.

### 3 Beispiel Deutschland

Die Ausführungen im vorigen Kapitel werden auf die Daten für Deutschland, wie sie Radtke (2020) angibt, angewendet. Daraus folgt für die ersten 155 Tage der Pandemie die Abb. 2. Die horizontale, linear unterteilte Achse beginnt mit dem Tag 0, dem 26. Februar, dem Tag, bevor der erste exponentielle Anstieg von  $N$  in Deutschland startet. Die vertikale Achse zählt die Häufigkeiten und ist logarithmisch unterteilt. Originäre Daten sind die Zahl  $n$  der täglichen Neuerkrankungen (rote Kreuze) und die Zahl  $K$  der täglich an Covid 19 verstorbenen Personen (blaue Punkte). Davon abgeleitet sind die kumulative Häufigkeit  $N$  der Krankheitsfälle (rote Punkte) und nach (6) die Anzahl  $v$  der virulenten Personen. Als Zeit der Virulenz  $D$  wird zum einen die anfangs verordnete Länge der Quarantäne von 14 Tagen (braune Kreuze) und verkürzt auf 10 Tage (grüne Punkte) angenommen.

Über die gesamte Zeit betrachtet erscheint der Verlauf der Pandemie, konzentriert man sich auf die tägliche Zahl der Neuerkrankungen  $n$ , zunächst verwirrend, obwohl sich eine

Systematik darin verbirgt. Um diese zu erkennen, werden als erstes durch vertikale Linien Zeiten markiert, zu denen durch verordnete Maßnahmen versucht wurde, den Verlauf der Pandemie zu beeinflussen. Die erste Maßnahme, M1, verfügte die Schließung von Schulen und Kindergärten und die Absage großer Ansammlungen, die nächste, M2, den *lock down*, der für ganz Deutschland nahezu gleichermaßen galt. Er wurde später in den einzelnen Bundesländern uneinheitlich um M3 herum gelockert und schließlich wurde mit M4 die allgemeine Maskenpflicht eingeführt, mit der Absicht, Lockerungen zu kompensieren. Zu späterer Zeit werden zwei Ereignisse markiert: E1, das Superspreading *Tönnies*, und E2, bei dem ein Wechsel von einer Abnahme zur einer Zunahme der Infektionszahlen erfolgte, wohl auch hervorgerufen durch die Erlaubnis zu Urlaubstourismus und durch die Duldung persönlicher Nachlässigkeit bei der Vorbeugung.

Der bisherige Verlauf der Pandemie kann, berücksichtigt man den geschilderten Rahmen, als eine Folge von Abschnitten interpretiert werden. Jeder Abschnitt für sich ist ein spezieller exponentieller Prozess, der in den Abb. 2 bis 4 durch den Anstieg der entsprechenden Geraden, ihren Wert  $b$ , charakterisiert wird. Für  $n$  sind es neun Abschnitte und für  $K$  vier. Die Interpretation beginnt mit den ersten 23 Tagen der Pandemie, in Gänze dargestellt ganz links in Abb. 2. In Deutschland wurde schon relativ früh ganz allgemein darauf hingewiesen, sich vor einer Infektion durch das Virus vorzusehen. Der Verlauf der Pandemie zu jener frühen Zeit entspricht im Mittel den Geraden 2a und 2b. Beide haben nahezu den selben Anstieg, so dass es nahe liegt, den Sprung zwischen ihnen möglicherweise durch einen Fehler in der zeitlichen Zuordnung von Ereignissen zu erklären. Die Doppelwertzeit  $\Delta$  betrug 2,35 Tage.

Das Zeitintervall, in dem die Bedingung (5) erfüllt ist, wird als Kopie aus der Abb. 2 herausgelöst, in Abb. 3 separat dargestellt. In ihr sind ergänzend die Marken  $m_1$  und  $m_2$  eingetragen, die den Beginn der Geraden 3 bzw. 4 anzeigen, welche den Erfolg der Maßnahmen M1 bzw. M2 dokumentieren. Durch M1 und M2 wurde die Doppelwertzeit vergrößert, und zwar auf 5,38 bzw. 9,2 Tage. Dieser Erfolg wird nicht sofort, sondern erst nach  $6\frac{1}{2}$  bzw.  $5\frac{1}{2}$  Tagen sichtbar. Nebenbei zeigt die Abb. 3, die, wie oben bereits erwähnt, geringe Streuung der Werte  $N$  im Vergleich mit der viel größeren von  $n$ .

Im weiteren zeitlichen Ablauf wird die Bedingung (6) verletzt, so dass die weiteren Berechnungen auf den originären Werten  $n$  basieren müssen. Dieser Teil der Pandemie wird bis zum Tag 200 in Abb. 4 dargestellt. Man kann feststellen, dass M2 den Anstieg von  $n$  nicht nur gebremst hat, sondern die Phase 5, einen kontinuierlichen mittleren Rückgang entlang der Geraden 5 mit einer Halbwertzeit von 10,8 Tagen initiiert hat. Diese Gerade beginnt etwa am 1. April, dauert etwa drei Wochen und wird im Kapitel 4 detailliert betrachtet. Der *lock down* galt für ganz Deutschland nahezu gleichermaßen. Er wurde später etwa bei M3 in den einzelnen Bundesländern uneinheitlich gelockert. Die Halbwertzeit hat sich dadurch etwa auf das Doppelte vergrößert (s. Gerade 6). Wenig später wurde in M4 die allgemeine Maskenpflicht beim Einkaufen und in öffentlichen Verkehrsmitteln eingeführt, die vermutlich diverse weitere Lockerungen kompensiert hat. Nach geraumer Zeit kam das Ereignis E1, das Superspreading in der Firma *Tönnies*. Die Infektionsrate schnellte plötzlich in die Höhe. Es wurde der Personenkreis, welcher vom Superspreading betroffenen war, isoliert, in der Absicht, ihre Auswirkung im günstigen Fall zu minimieren. Das ist, wie Gerade 7 zeigt, nur insoweit gelungen, als sich die Halbwertzeit danach wieder auf einen Wert einstellte, der für die Zeit zuvor (Gerade 6) galt. Das Niveau blieb jedoch erhöht. Ab der Zeit E2 erfolgte ein Wechsel zur Zunahme der Infektionszahlen, wohl auch hervorgerufen durch die Erlaubnis zu Urlaubstourismus und durch Nachlässigkeit bei der

Vorbeugung. Die damit verbundene Anhebung des Niveaus von  $n$  wird uns wohl ebenso erhalten bleiben und muss durch zukünftige Maßnahmen wieder rückgängig gemacht werden.

Am Anfang der Pandemie, die Zeit des ersten Maximums der Infektionsrate inbegriffen, wurde eine Erkrankung wohl ausschließlich durch das Auftreten von Symptomen festgestellt. Die Größe  $v_2(t)$  blieb klein. Im Verlaufe der Pandemie kam, sich kontinuierlich verstärkend, der Nachweis durch Testung auf das Virus hinzu, wodurch auch symptomfreie Personen als erkrankt erkannt wurden. Die Wahrscheinlichkeit, eine Infektion zu erkennen, und damit auch der Anteil von  $v_2(t)$  an der Gesamtzahl, ist gestiegen. Vom Rat der Stadt Jena (2020) werden die Jenaer Infektionsfälle in einem Bulletin detailliert dokumentiert. Danach betrug in den letzten zehn Tagen der hier betrachteten Zeit der Anteil von  $v_2(t)$  etwa ein Drittel, wobei darauf hinzuweisen ist, dass der Datenumfang von 15 Personen ziemlich klein ist.

Abb. 2: Gesamtbild zur Entwicklung der Pandemie in Deutschland in den ersten 155 Tagen.

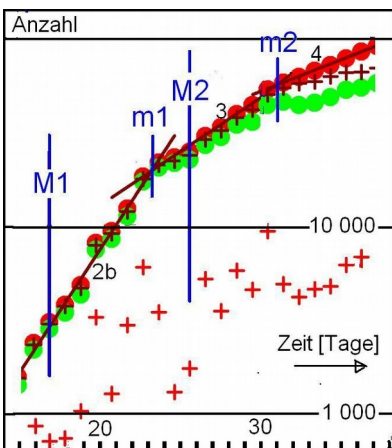
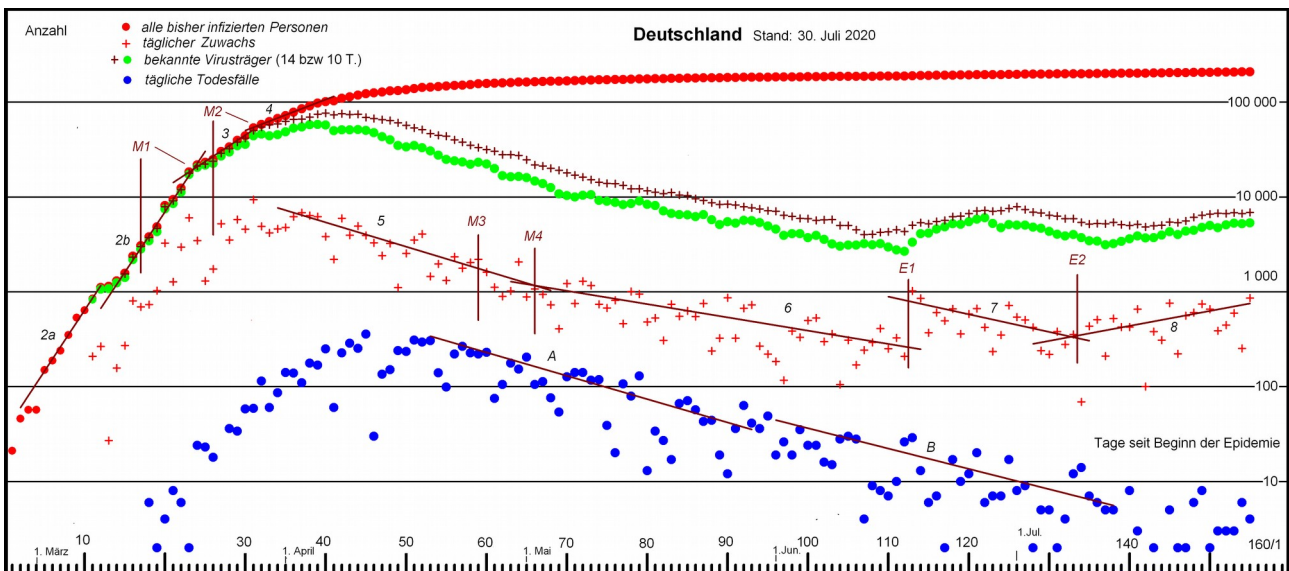


Abb. 3: Detail aus Abb. 2 für die Tage 15 bis 38. Die verwendeten Symbole wurden beibehalten.

Tab. 1 beschreibt den Verlauf der Epidemie in Deutschland bis dato 12. September 2020, wie sie in den Abb. 2 und 3. dargestellt ist. Es werden 9 Abschnitte unterschieden.

Schon bei früher bekannten Viren, die dem aktuellen Sars-Cov-2 ähnlich waren, wie auch bei Sars-Cov-2 selbst wurde ein sog. Superspreading-Effekt beobachtet wird. Das heißt, es gibt Beispiele, wo ausgehend von einer einzelnen Person relativ viele andere Personen infiziert werden, während bei der Mehrzahl der üblichen Fälle wenige Ansteckungen erfolgen. Verfolgen wir den anfangs geäußerten Gedanken über die Verwandtschaft von Erdbeben und Sars-Cov-2-Erkrankungen weiter, dann ist ein mögliches Pendant zum Superspreading-Effekt das Auftreten von Schwarmbeben, wie es zum Beispiel aus dem Vogtland (s. Vavryčuk & Abramavá, 2018, Neunhöfer & Hemmann, 2005) bekannt ist. Spezielle Voraussetzungen müssen gegeben sein, die zu einem solchen Effekt führen: Einerseits vermutet man mit Sars-Cov-2 behafteten Aerosole als Ursache, andererseits das Vorhandensein von Fluiden in bevorzugten Bereichen des Untergrunds. In beiden Fällen ist die Erscheinung örtlich begrenzt. Schwarmbeben haben eher eine sehr schwache Wechselwirkungen zu den übrigen Beben, während Superspreading ohne Gegenmaßnahme die Ausbreitung der Pandemie insgesamt sehr befördern kann. In der Seismologie versucht man, Bebenschwärme und übrige Beben voneinander getrennt zu interpretieren. Ein Vorgehen, das auch für Ausbrüche von Superspreading angebracht erscheint; vorausgesetzt, seine Infektionszahlen liegen deutlich über denen im normalen Ablauf der Pandemie.

Tab. 1: Die bisherigen neun Phasen der Epidemie (1 bis 9), ergänzt durch vier Phasen der Todesfälle (A bis D). Dazu die mittleren b-Werte, die mittleren Doppelwert- bzw. Halbwertzeiten  $\Delta$  der täglichen Zahl der Neuinfektionen und die ursächlichen Zusammenhänge.

Nr.	b	$\Delta$	ursächliche Zusammenhänge
1	»0.128801		Epidemie im Ausbruch
2a	0,128801	2,34	allgemeine Warnung zur Vorsicht (Geraden 2)
2b	0,1218	2,37	
3	0,055939	5,38	Schulschließung, Versammlungsbeschränkungen M1 (3)
4	0,032670	9,20	Lock down M2 (4)
5	-0,025590	-12	lock down (5)
6	-0,014014	-22	Maskenpflicht, vorsichtiges Rückfahren des Lock down unter der Ägide der Bundesländer (6)
7	-0,018624	-16	Superspreading bei „Tönnies“
8	0,015286	20	Hauptreisezeit
9	-0.000386	-780	Nachreisezeit
A	-0,024311	-12	erster Abschnitt Sterberate
B	-0,021375	-14	zweiter Abschnitt Sterberate
C	0,007193	42	dritter Abschnitt Sterberate
D	-0,005042	-60	vierter Abschnitt Sterberate

Die Abb. 4 zeigt in einen Ausschnitt aus der Abb. 2, beginnend am Tag 51 und über den „Tönnies“-Ausbruch hinaus bis dato 12. September 2020 erweitert, den Verlauf der Pandemie in Deutschland. Am Tag 113



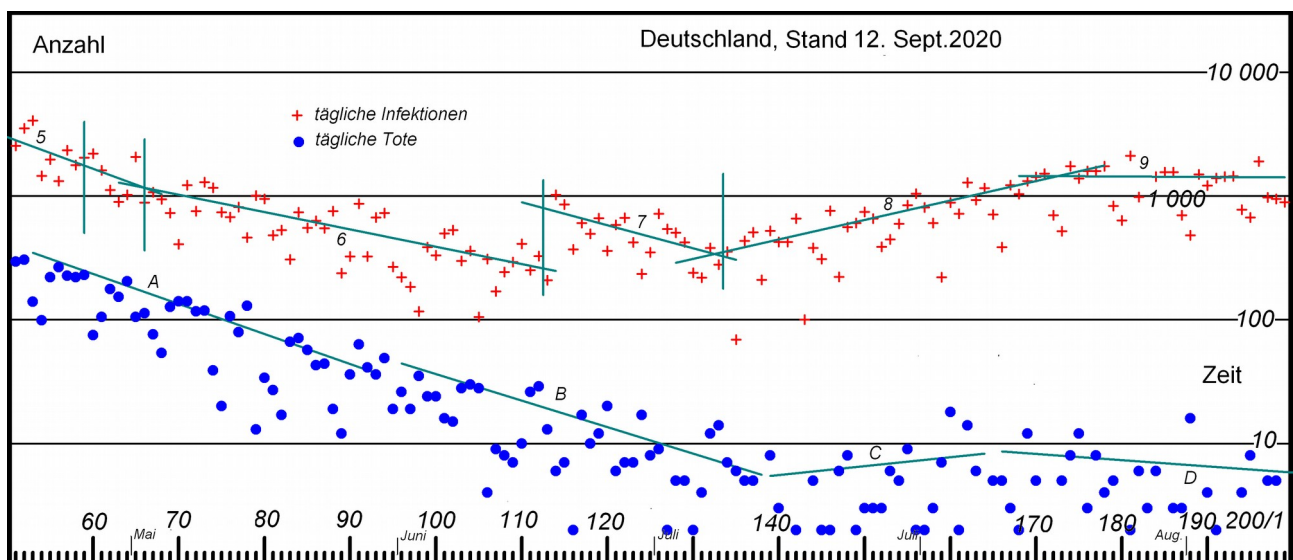
erfolgte der erwähnte Ausbruch, die Infektionsrate schnellte zu höheren Werten, um danach wieder abzunehmen. Falls die Extrapolation der vorangegangenen Zeit wieder erreicht wird, wären die ausgelösten Maßnahmen gegen den Ausbruch erfolgreich gewesen. Das scheint so nicht der Fall zu sein. Realiter bleibt eine sprunghafte Erhöhung der Infektionsrate zurück, die etwa im gleichen Maße abgebaut wird, wie vor dem Ausbruch. Das Infektionsgeschehens änderte sich etwa am Tag 130 (Mitte Juni) der Pandemie signifikant von Abnahme zu Zunahme, vermutlich synchron mit der Lockerung der Beschränkung für Urlaubsreisen in Deutschland und Europa. Seitdem nimmt die Infektionsrate wieder zu, und zwar mit einer Doppelwertzeit der Infektionen von etwa 20 Tagen. Mit dem Abklingen der urlaubsbedingten Reisezeit stellt sich der Abschnitt 9 ein, ein zunächst nahezu konstantes Infektionsgeschehen.

Eine möglicherweise für die Interpretation der Pandemie unterschätzte Größe ist die Sterberate  $\sigma$  der an COVID 19 erkrankten Personen. In den Abb. 2 und 3 sind als blauer Punkt die Zahlen  $K(t)$  der täglich daran verstorbenen Personen eingezeichnet. Der Verlauf hat eine deutliche Periodizität von 7 Tagen, verursacht durch eine verzögerte Weitermeldung eines Teiles der Todesfälle an Wochenenden. Angenommen, die mittlere Zeit zwischen den ersten Symptomen der Krankheit und dem Tod von Personen betrage  $\tau$ , dann gilt

$$\sigma \approx K(t)/n_R(t-\tau) \quad (8)$$

Der zeitliche Verlauf von  $K(t)$  lässt sich in die vier Abschnitte A bis D unterteilen, jede durch eine lineare Regression ausgleichbar. Die beiden ersten haben eine Halbwertszeit von etwa 12 bzw. 14 Tagen, sind miteinander vergleichbar und unterscheiden sich nur durch einen kleinen Versatz in der Höhe der Werte. Etwa am 140. Tag ändert sich das Vorzeichen des Anstiegs, die Zahl der Todesfälle nimmt wieder sehr leicht zu, mit einer Doppelwertzeit von etwa 42 Tagen. Danach scheint die Mortalität wieder leicht zu sinken mit einer Halbwertszeit von etwa zwei Monaten. Der Verlauf der Todesfälle folgt zeitlich verschoben dem Verlauf der Infektionen. Die Verschiebung wird für Deutschland, wenn wir den Zeitmarken M4 und E1 eine auslösende Wirkung zuordnen, grob zu etwa 30 bzw. 25 Tagen geschätzt. (Nach DPA in OTZ, 2020, gilt in Schottland eine mittlere Frist von 28 Tagen zwischen einem positiven Test und dem Todeszeitpunkt.)

Abb. 4: Ausschnitt aus Abb. 2 für die Zeit nach dem 15. April, erweitert bis zum 12. September. Tägliche neue Infektionen und Zahl der Verstorbenen pro Tag über der Zeit. Am Tag 113 begann der „Tönnies“-Ausbruch.



#### 4 Coronapandemie und Theorie vom Chaos

Die folgenden Überlegungen stellen einen Versuch dar, die Corona-Pandemie mit Blick auf die Theorie vom Chaos zu betrachten. Sie folgen den von Peitgen et al. (1994), Kapitel 2, beschriebenen Grundlagen.



Ausgangspunkt dort ist der *quadratische Iterator* einer Zeitreihe  $x$

$$x_{n+1} = \alpha x_n (1 - x_n), \quad (9)$$

mit dem frei wählbaren Parameter  $\alpha$ . Wiederholt man die Iteration (1) als Funktion von  $\alpha$  genügend oft, dann wechselt das Ergebnis mit steigendem  $\alpha$  von einem einzigen festen Endwert  $X$  im Abschnitt  $Z$  zu 2, danach zu 4, danach 8, ... möglichen Endwerten. Die Kurve der möglichen  $X$ -Werte gabelt sich bei bestimmten  $\alpha$  auf (Bifurkation), oder wie man sagt, verdoppelt ihre Periode. In der Abb. 5 wird dieses Verhalten in der  $(X, \alpha)$ -Ebene, im sog. Feigenbaumdiagramm, dargestellt. Das Diagramm enthält abhängig von  $\alpha$  drei Bereiche:

1. Für  $\alpha < 3,0$  gibt es zu jedem  $\alpha$  nur einen festen Endwert.
2. Zwischen  $3,0 < \alpha < s$  finden die Verdopplungen der Perioden statt.  $s = 3,5699\dots$  ist der sog. Feigenbaumpunkt, in dem die Grenze zum Chaos überschritten wird.
3. Für  $\alpha > s$  herrscht Chaos.

Abb. 5: Feigenbaumdiagramm nach

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/LogisticMap\\_BifurcationDiagram.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/LogisticMap_BifurcationDiagram.png), ergänzt.

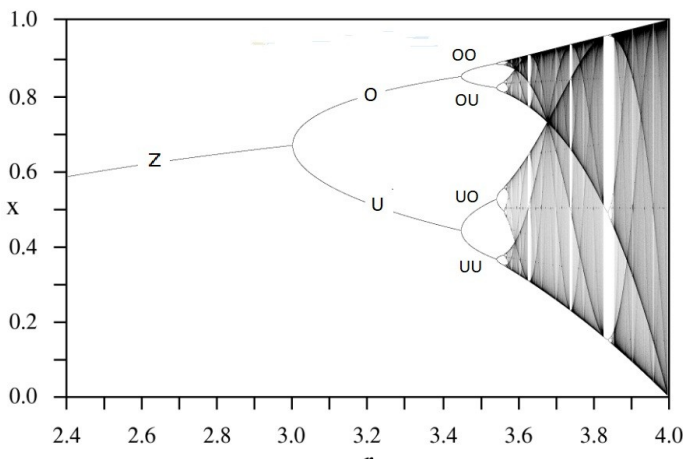
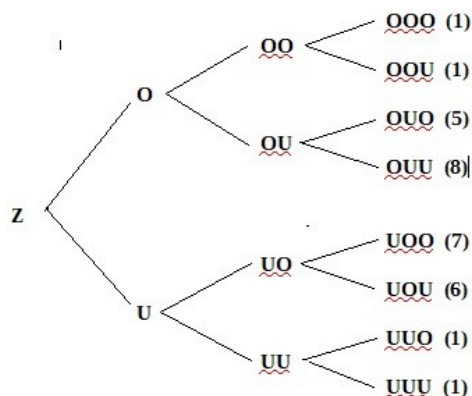


Abb. 6: Schematische Darstellung des Feigenbaum-Diagramms bis zur 3. Bifurkation. In Klammern die beobachteten Häufigkeiten.



Wichtig ist die sog. Feigenbaumkonstante  $\delta = 4,6692\dots$ . Sie entspricht in etwa dem Quotienten der Länge einer Periodenverdopplung zur Länge der nächsten höheren. Ihr wird in der Natur eine vergleichbare universelle Bedeutung zugesprochen wie der Zahl  $\pi$  in der Geometrie.

In der Abb. 5 wird das Feigenbaumdiagramm schematisiert dargestellt. Es wird eine Nomenklatur definiert, indem nach jeder Verdopplung ein oberer Zweig O und ein unterer U entsteht.

Der Zeitabschnitt 5 der Pandemie scheint besonders homogen zu sein, weil das Virus in ganz Deutschland relativ einheitliche Bedingungen vorgefunden hat. Die entsprechen Gerade in Abb. 2,  $\log_{10}(n_5) = a_5 + b_5 \cdot t$ , wurde durch lineare Regression im Zeitintervall 38 bis 60 erhalten. Ihre seitliche Extrapolation auf ein Intervall von 35 bis 65 scheint, vertraut man einer visuellen Einschätzung, erlaubt zu sein. Es fällt auf, die Abstände von ihr,

$n_5 - n$ , scheinen ungewöhnlich verteilt zu sein, insbesondere werden einige besonders starke und miteinander vergleichbare Abstände, positive wie negative, beobachtet. Zur Überprüfung dieses Befundes wird ein Histogramm der beobachteten Abweichungen hergestellt und in Abb. 7 gezeigt. Die Größe der Abweichung ist über ihrer Häufigkeit aufgetragen. Die Gesamtzahl der Punkte ist verglichen mit der Unterteilung relativ klein. Weil man eine Symmetrie der Häufigkeiten um den Wert Null annehmen darf, wird die negative Seite auf die positive umgeklappt und die Summe beider dargestellt und interpretiert. In der unteren Hälfte des Bildes, im Teil Z, wo bei einer Normalverteilung die größten Häufigkeiten zu erwarten sind, bleiben drei Klassen unbesetzt. Nach einer Lücke folgt ein Cluster von 11 Werten, ehe wieder eine Lücke beobachtet wird. Diese Aufteilung ist für eine Normalverteilung untypisch, könnte aber, bei aller Vorsicht, auf ein Feigenbaumdiagramm mit zwei Gabelungen hinweisen. Weit vom Z entfernt, im oberen Teil des Histogramms, liegen vier weitere Punkte. Darf unter noch größerem Vorbehalt spekuliert werden, dass diese wegen einer dritten Gabelung auftreten? Bis zum Ende des betrachteten Intervalls waren die Maßnahmen gegen das Virus deutschlandweit ziemlich einheitlich koordiniert. Später erfuhren sie eine merkliche Diversifizierung durch die Bundesländer, wodurch eine Ausdehnung des Histogramms auf eine spätere Zeit leider nicht zu empfehlen ist.

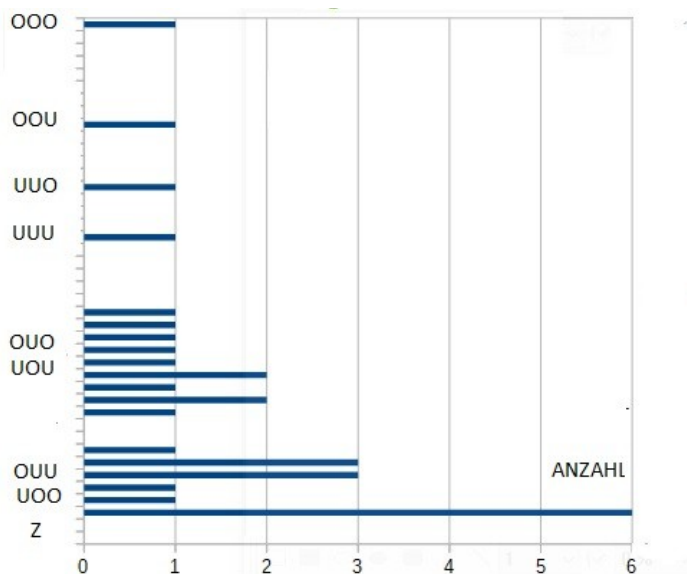


Abb. 7: Histogramm der Abweichungen von der Geraden 5, die negative Seite ist auf die positive umgeklappt.

## 5 Kurzer Vergleich mit der Interpretation des RKI

Die in dieser Abhandlung dargestellte Interpretation der Infektionsdaten unterscheidet sich in einigen Punkten von jener, die von an der Heiden & Hamouda. (2020) aus dem RKI berichtet wird. Hier werden die Zahlen  $n$  der täglichen gemeldeten neuen Infektionen direkt untersucht, da bilden ebendiese Zahlen die Basis, um die Anzahl  $n_R$  der Personen abzuleiten, die an einem bestimmten Tag erste Symptome einer COVID 19 -Erkrankung gezeigt haben. Dazu werden im RKI zwei Schritte empfohlen: Imputieren und Nowcasting. Imputieren ist der Versuch, unvollständige Daten auf Vollständigkeit zu ergänzen. Im Speziellen bedeutet das: für jene Fälle, bei denen der Tag, an dem erste Symptome auftraten, nicht bekannt ist, diesen zu schätzen. Nowcasting bedeutet eine Berücksichtigung der Zeit des Verzugs, der durch Erstellung einer Diagnose, bis zur Weitermeldung und die Übermittlung der Meldung entsteht. Das RKI versucht so, den *wahren* Verlauf der Pandemie, das soll heißen ohne Verzerrung durch die Prozedur des Nachweises einer Erkrankung, anzunähern. Das ist nützlich, wenn nicht gar notwendig, wenn man verschiedene Epidemien miteinander vergleichen will. Im Unterschied dazu verzichten die vorliegenden Untersuchungen auf die genannten Korrekturen und beschränken sich auf die *unbereinigten* Beobachtungswerte. Verglichen mit der Aufzeichnung von Erdbeben bedeutet dies, als wäre das RKI an der wirklichen Bodenbewegung, die von einem Erdbeben erzeugt wird, interessiert, während hier das Seismogramm, so wie es ein Seismograph systematisch verfälscht aufzeichnet, zur weiteren Bearbeitung verwendet wird.

Das RKI betrachtet die Reproduktionszahl  $R$  als eine von mehreren herausragenden Größen bei der Einschätzung der Pandemie.  $R$  basiert auf der imputierten Zahl  $n_R$  und kann allein schon deshalb nur rückwirkend berechnet werden, und zwar für eine Zeit  $t_0$  und einer Intervalllänge  $l$

$$R(t_0) = \Sigma_1 n_R(t) / \Sigma_2 n_R(t), \quad (9)$$

die Summe  $\Sigma_1$  läuft von  $t_0$  bis  $t_{0+l+1}$  und die Summe  $\Sigma_2$  von  $t_{0-l}$  bis  $t_{0-2l+1}$ . Jede der beiden Summen ist de facto eine low-pass-Filterung. Das RKI definiert  $l$  zu 4, neigt aber zu Versuchszwecken zu  $l = 7$ , um die wöchentlichen Einflüsse zu mindern. Der zeitliche Verlauf von  $R$  oszilliert, wie man Radtke (2020) entnehmen kann, relativ stark mit einer 7-tägigen, wöchentlichen, Periode, um den Wert Eins herum. Per definitionem bedeutet  $R=1$   $n=\text{const}$ ,  $R<1$  entspräche einem Abklingen der Pandemie,  $R>1$  einem Anwachsen. Jedoch: Die Pandemie hat keine wöchentliche Periode! Der z.Z. täglich publizierte Wert  $R$  ist für die Einschätzung der Pandemie nahezu wertlos. Im streng statistischen Sinne ist zudem nur jeder  $l$ -te Wert  $R(t_0)$  voneinander unabhängig, was eine zusätzliche Einschränkung ist. Die Abtastrate für voneinander unabhängige  $R$  beträgt  $l$ .

Allgemein gesprochen sind  $N(t)$  und  $n(t)$  wie auch Seismogramme Zeitreihen, die in einem Intervall von einem Tag abgetastet werden und als solche behandelt werden können. Dazu existiert ein gut entwickeltes Spezialgebiet, auf das von Neunhöfer (1985) unter 2.2.2.3 eingegangen und auf Seismogramme in Form sog. rekursiver Filter diskutiert und angewendet wurde. Es wäre einen Versuch wert, den Zeitreihenaspekt bei der Interpretation des Verlaufs der Pandemie mehr in den Vordergrund zu stellen.

Die Summierung über 4 Werte wirkt wie eine Tiefpassfilterung der Zeitreihe. Tiefpass bedeutet, kleine Frequenzen (das sind lange Perioden) werden hindurchgelassen, hohe Frequenzen (kleine Perioden) werden gedämpft. In Abb. 8 ist die Übertragungsfunktion des 4-Werte-Mittel-Tiefpasses für  $l = 4$  eingezeichnet worden. Ein Filter hat eine Grenzperiode, für die allgemein angenommen wird, dass der Durchlass auf  $1/\sqrt{2}$  zurückgegangen ist. Sie wird bei etwa 9 Tagen erreicht, das bedeutet, in der Summe werden Perioden herausgefiltert, die darunter liegen. Das ist beabsichtigt, jedoch nicht in der Schärfe, wie es die Wahl von  $l$  suggeriert. Perioden unter 2 Tagen sind wegen des Abtasttheorems auszuschließen. Den Pandemie-Verlauf als Zeitreihe betrachtend, könnte man das 4-Werte-Mittel-Filter durch einen Butterworth-Tiefpass 2. Ordnung ersetzen. Die Durchlass-Kurven beider Filter sind in Abb. 6 eingezeichnet. Der Butterworth-Tiefpass ist sogar noch etwas vorteilhafter, weil er für größeren Perioden etwas durchlässiger ist und bei kleinen Perioden einen glatten Verlauf hat.

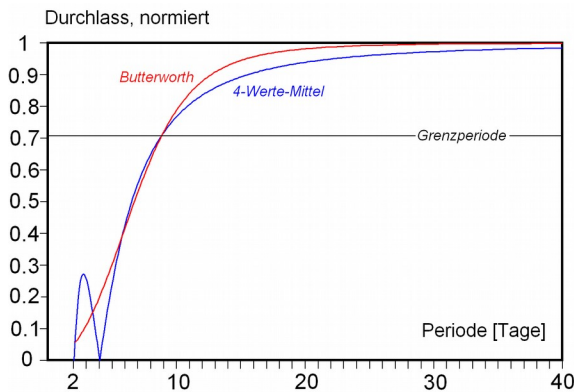


Abb. 8: Übertragungsfunktion des RKI-low-pass-Filters für  $l = 4$  (blau) im Vergleich zu einem vergleichbaren Butterworth-Filter zweiter Ordnung (rot).

## 6 Schlussfolgerungen

(1) Der Vorläufer der Corona-Pandemie beginnt in den meisten Ländern häufig mit einzelnen Ereignissen, um dann an einem Tag beginnend explosionsartig in den exponentiellen Status überzugehen. Dieser Tag sei auch der eigentliche Beginn, der *Tag Null* der Pandemie für jedes der drei in Abb. 9 miteinander verglichenen Länder, Deutschland, Japan und Südkorea. Für jedes dieser Länder ist ein anderer Verlauf der Pandemie typisch: Japan spielte und spielt in der offiziellen Wahrnehmung zu Unrecht kaum eine Rolle, obwohl schon von Zastrow (2020) am Tag 29 unserer Zählung darauf hingewiesen wurde. Von ihm wird vor allem die Bedeutung des Mund-Nasen-Schutzes (MNS) betont, der für den sehr moderaten Verlauf der Pandemie dort als ursächlich anzunehmen ist. Die Entwicklung der Pandemie in Japan bis heute zeigt aber auch, dass MNS allein auf eine lange Dauer nicht ausreicht. Südkorea, als zweites zu diskutierendes Land, hat bereits nach knapp 20 Tagen begonnen, geeignete Maßnahmen zu treffen und damit die ungebremste exponentielle Ausbreitung der Pandemie gebrochen. Deutschland folgte später mit der zu Abb. 2 diskutierten Abfolge von Maßnahmen. Zwei wesentliche Aspekte gegen die Pandemie, die aus dem drei-Länder-Vergleich folgen, sind: Das *Tragen des MNS* und die zu fordernde *Eile*, Gegenmaßnahmen einzuleiten. Rückblickend kann man vermuten, dass das Verbot von Großveranstaltungen und das Schließen der Schulen und Kitas (M1), wäre es 5 Tage früher erfolgt, ebenso wie der lock-down (M2) die Zahlen der Pandemie in Deutschland etwa um den Faktor 2 bis 8 vermindert hätte.

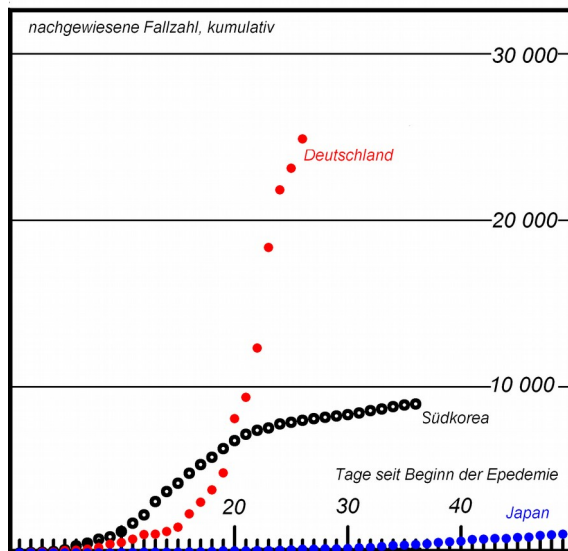


Abb. 9: Anfangsphase der Corona-Pandemie in Deutschland, Südkorea und Japan. Die Zeitskala ist identisch mit der in Abb. 1 verwendeten. Die Anzahl der Fälle ist linear aufgetragen. Um die Werte für Japan besser auflösen zu können, mussten sie verdoppelt werden.

(2) Die Corona-Pandemie und das Auftreten von Erdbeben gehören (mit einer Vielzahl von anderen Erscheinungen) in die Gruppe sich selbstorganisierender Prozesse, und unter diesen wegen der Möglichkeit des Auftretens von Superspreading bzw. von Schwarmbeben in ein und dieselbe Untergruppe. Die tägliche Zahl neuer Infektionen könnte möglicherweise den Regeln, die das Feigenbaumdiagramm beschreibt und die im mathematischen Sinne zu Chaos führen können, gehorchen. Der obige Versuch, dies nachzuweisen, ist wegen der Kürze der Beobachtungsreihe extrem ambivalent.

(3) Erfolgversprechend ist die Linearisierung durch die Einführung des logarithmischen Maßstabes für die Zahl  $n$  der täglichen Neuinfektionen. Das eröffnet die Möglichkeit, in der  $\{\ln(n), t\}$ -Ebene Verschiebungen wie mit einem Rechenschieber vorzunehmen und exponentielle Verläufe durch Geraden, zu berechnen mittels linearer Regression, zu approximieren.

Die Anwendung der logarithmischen Skala bewährt sich, um den Ablauf einer Epi-/Pandemie in vivo besser zu verstehen. Auf diese Weise ist es möglich, die Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen und besonderen Ereignissen (M1, M2, M4, E1) gut zu erkennen. Bedingt durch die Dauer notwendiger Tests und deren administrativen Bearbeitung wird die Wirksamkeit einer Gegenmaßnahme etwa 5,5 bis 6,5 Tage verzögert nachweisbar.

(4) Je nach dem, ob der Anstieg der Ausgleichsgeraden positiv oder negativ ist, entspricht ihm ein Zeitintervall, in dem sich die Zahl der Neuinfektionen verdoppelt oder halbiert (Doppelwertzeit und Halbwertzeit). Die Größe des Anstieges spiegelt die Bedingung wieder, die das Virus vorfindet. Die Ausgleichsgeraden sind extrapolierbar. Die Extrapolation ist mit der später eintretenden Realität zu vergleichen und kontinuierlich durch nach-gewonnene Beobachtungen zu verbessern.

(5) Die Reproduktionszahl  $R$  mag eine Größe sein, die angewendet auf eine abgeschlossene Epi-/Pandemie deren Interpretierbarkeit fördert. Im akuten Verlauf verwirrt der Wert von  $R$  nicht nur, u. a. weil er relativ stark retrospektiv definiert ist. Es bedarf zu vieler Kommentierungen, um mitunter einen einzelnen Wert verstehen zu können. Mehr noch: Ein einzelner Wert  $R$  bleibt nahezu ohne Aussage. Dieses Manko fehlt bei der hier angewen-

deten Interpretation im logarithmischen Maßstab.  $R$  wird anschaulich ersetzt durch die Doppelwert- bzw. Halbwertzeit der Neuinfektionen.

(6) Als Folge des einheitlichen lockdown, dato, 20. Mai 2020, betrug die Halbwertzeit in Deutschland 10,83 Tage. Nach der Lockerung des lockdown dato 31. Mai, etwa 20 bis 25 Tage später und nach Bundesländern uneinheitlich, hat sie sich in etwa verdoppelt.

(7) Am Tag 113 beginnt ein starkes Ereignis von Superspreading. Ohne staatliche Gegenmaßnahmen hätte sich daraus eine neue Pandemie-'Welle' entwickeln können. Eine Gegenmaßnahme, ein befristeter *lokaler* lockdown, wurde eingeleitet. Erfolgreich, mit einer Einschränkung: Die unmittelbare Virulenz des Ausbruchs konnte zwar gestoppt werden, aber die vor seinem Bekanntwerden erfolgte Weitergabe hat zu einer Erhöhung des Niveaus der Zahl der Infizierten geführt, das sich dann in vergleichbarem Maße wie zuvor verringerte (s. ähnlicher Anstieg der Geraden 6 und 7).

Anders als zur Zeit E2, als wieder eine Zunahme der Erkrankungszahlen begann. Wohl auch hervorgerufen durch die Erlaubnis zum Urlaubstourismus, durch persönliche Nachlässigkeit bei der Vorbeugung und mangelnde Logistik bei der Auswertung von Tests. Die dadurch entstandene Anhebung des Niveaus von  $n$  muss später wieder abgetragen werden.

(8) Der Verlauf der Zahl der täglich Verstorbenen folgt mit etwa 25- bis 30-tägiger Verspätung auf niedrigem Niveau der Zahl der aktiven Virusträger.

#### Liste der verwendeten Symbole

$N$	Anzahl von nachgewiesenen Infizierten, kumulativ
$n$	Anzahl von nachgewiesenen Infizierten, täglich
$t$	Zeit in Tagen
$a$	Niveau nach linearer Regression
$b$	Anstieg der Geraden nach Regression
$\Delta$	Doppelwertzeit oder Halbwertzeit
$v$	Anzahl der virulenten Personen
$D$	Dauer der Ansteckungsfähigkeit einer Personen
$n_R$	Anzahl von Personen, die an einem bestimmten Tag erste Symptome hatten.
$K$	Anzahl der täglich verstorbenen Personen
$\sigma$	Sterberate
$\alpha$	Parameter des quadratischen Iterators
$\delta$	Feigenbaumkonstante
$s$	Feigenbaumpunkt
$R$	Reproduktionszahl
$I$	benutztes Intervall zur Reproduktionszahl

#### Dank

Bei der finalen Abfassung des vorliegenden Textes hat mir Prof. Dr. Peter Malischewsky, Jena, wertvolle Hinweise gegeben, deren Befolgung u. a. der Verständlichkeit gut getan hat. Dafür sei ihm herzlich gedankt.

## Quellen

an der Heiden, M. & Hamouda, O. (2020): Schätzung der aktuellen Entwicklung der SARS-CoV-2-Epidemie in Deutschland – Nowcasting. - *Epid Bull* 2020;17:10–16 | DOI 10.25646/6692.4.

Neunhöfer, H. (1985): Primär- und Sekundäreffekte bei der Ausbreitung seismischer Oberflächenwellen und ihre geophysikalischen Ursachen. - Veröff. des Zentralinstituts für Physik der Erde Nr. 85, 111 S., Potsdam.

Neunhöfer, H. & Hemmann, A (2005): Earthquake Swarms in the Vogtland/Western Bohemia Region: Spatial Distribution and Magnitude-Frequency Distribution as an Indication of the Genesis of Swarms?. - *J. of Geodynamics* 39, 361-385.

OTZ [Ostthüringer Zeitung] (2020) **30**, Nr. 189, 8.

Peitgen, H.-O., Jürgens, H. & Saupe, D. (1994): C\_H\_A\_O\_S, Bausteine der Ordnung. - Klett-Cotta/Springer Verlag.

Radtke (2020): Statistiken und Zahlen der Corona-Pandemie 2019/20. - [de.statista.com](https://de.statista.com).

Rat der Stadt Jena, Fachdienst Gesundheit (2020):  
<https://gesundheit.jena.de/de/coronavirus>

RKI (2020): Archiv der Situationsberichte des Robert-Koch-Instituts zu COVID-19 Mai :  
[https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges\\_Coronavirus/Situationsberichte/Archiv\\_\[xxx\].html](https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Situationsberichte/Archiv_[xxx].html),  
[xxx] = März, April ... September

Vavryčuk, V. & Adamová (2018): Detection of Stress Anomaly Produced by Interaction of Compressive Fault Steps in the West Bohemia Swarm Region, Czech Republic. - *Tectonics* 37, 1-14.  
[doi.org/10.1029/2018/TC005163](https://doi.org/10.1029/2018/TC005163).

Zastrow, K.-D. (2020): Interview. - <https://de.sputniknews.com/interviews/20200327326707086-schutzmasken-zastrow-interview/>