6. Resilience Engineering – Hypothesen für die zivile Sicherheitsforschung

6.1. Diskussion von Resilience Engineering anhand von Leitfragen

Wie können die Ingenieurwissenschaften dazu beitragen, dass es manchmal besser kommt, als man denkt? Wie schaffen sie das, was als „ordinary magic" bezeichnet wurde? Zumal wenn, wie die vorangegangenen Kapitel deutlich gemacht haben, diese Magie wohl gar nicht so alltäglich, jedenfalls nicht banal oder ganz normal ist. Wenn sie im Gegenteil, voraussetzungsreich, selbst komplex und ganz und gar unsicher ist. Wenn sie von einer Reihe an Bedingungen abhängt, vielfältige, miteinander verknüpfte oder vernetzte Bestandteile enthält und in sich unter Umständen nicht einmal widerspruchsfrei daherkommt. Wenn a priori überhaupt nicht klar ist, ob sie überhaupt wünschenswert ist oder welchen Einfluss sie auf die Ausgestaltung einer Gesellschaft hat. Mit anderen Worten: Was heißt es für die Ingenieurwissenschaften, wenn sie sich damit beschäftigen, wie sie die Resilienz eines Systems zielgerichtet verändern – zumeist erhöhen – können? Oder noch spezifischer für die vorliegende Arbeit gefragt: Was heißt das für ingenieurwissenschaftliche zivile Sicherheitsforschung im Sinne eines *Resilience Engineering*? Die folgenden Ausführungen beziehen sich immer – äquivalent zur bisherigen Arbeit – auch da, wo es nicht explizit gemacht wird, auf die zivile SiFo.

Die Ingenieurwissenschaften beschäftigen sich schon länger mit Resilienz, das wurde in der Beschreibung des Stands der Forschung deutlich (siehe 2.6). Gleichzeitig wurden aber auch die Forschungslücken deutlich, die mit der bisherigen Ausrichtung ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung einhergingen. Neben der generellen, über die Ingenieurwissenschaften hinausweisenden Lücke im Hinblick auf die Nicht-Existenz eines eigenständigen Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo, waren dies das reduktionistische, stabilitätszentrierte Verständnis von Resilienz als engineering resilience, der Fokus auf Ansätze zur Quantifizierung, die mangelnde theoretische Fundierung der identifizierten Ideen und Mechanismen zur Umsetzung von Resilienz und die ungeeignete Verwendung des Begriffs Resilience Engineering in einem rein sozialwissenschaftlichen Sinne (siehe 3). Die erste und die vierte Forschungslücke hängen unmittelbar zusammen. Beide wurden in den letzten Kapiteln durch die detaillierte, theoretisch

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

anspruchsvolle und neuartige Entwicklung eines system- und komplexitätstheoretischen Konzepts von Resilienz mit gleichzeitiger normativer Einbettung ausführlich adressiert. Dieses Konzept bildet nun die Grundlage für die nächsten Schritte hin zur Entwicklung von Hypothesen für Resilience Engineering. Altherr et al. bezeichnen ein solches Vorgehen als nächsten logischen Schritt. Zunächst bedarf es eines Verständnisses dafür, was Resilienz konzeptionell ausmacht, um dann eine Vorstellung davon zu entwickeln, wie sie ingenieurwissenschaftlich umgesetzt werden soll (Altherr et al. 2018: 189).

Die vorliegende Arbeit sucht diesen logischen Schritt nun dazu zu nutzen, die verbleibenden drei Forschungslücken direkt zu adressieren. Am deutlichsten wird das unmittelbar für die fünfte Forschungslücke. Der Begriff des Resilience Engineering wird explizit und in scharfer Abgrenzung von seinen organisationswissenschaftlichen Ursprüngen in einem ingenieurwissenschaftlichen, auf Technologie fokussierten Sinn gebraucht. Er wird somit spezifiziert oder – wie der Autor der vorliegenden Arbeit es in einigen Veröffentlichungen ausdrückt – bewusst eingeschränkt (Hiermaier et al. 2019: 158, Scharte/Thoma 2016: 134, Thoma et al. 2016: 11). Erstmals von Scharte und Thoma so formuliert, gilt nach wie vor, dass „[d]iese bewusste Einschränkung […] eine – wenn auch notwendig unscharfe – Trennung zwischen verschiedenen Optionen" der Erhöhung von Resilienz erlaubt (Scharte/Thoma 2016: 134). Die Ingenieurwissenschaften und der Autor dieser Arbeit erheben zu keinem Zeitpunkt den Anspruch, Resilienz einzig und allein technologisch bzw. mittels ingenieurwissenschaftlicher Ideen und Ansätze schaffen zu können. Es geht immer darum, in Kombination und Kooperation mit anderen Disziplinen und Forschungsbereichen zu überlegen, wie die Gesellschaft und ihre relevanten Systeme, vor allem ihre kritischen Infrastrukturen, resilient(er) gegenüber plötzlichen, gravierenden und unerwartet eintretenden Störereignissen gestaltet werden können. Die bewusste Einschränkung bzw. Spezifizierung des Begriffs Resilience Engineering erlaubt es aber den Ingenieurwissenschaften, ihren Beitrag zur Erhöhung von Resilienz systematisch fassen und mit einer griffigen Überschrift versehen zu können. Engineering resilience kann diese Überschrift aufgrund der stabilitätszentrierten Bedeutung des Begriffs nicht lauten. Resilience Engineering bietet sich dagegen an, da der Begriff in den Ingenieurwissenschaften gerade noch nicht stark besetzt ist und nur in einigen wenigen Artikeln überhaupt explizit vorkommt. Und wenn er vorkommt, dann in einem systemischen Sinne, der dem Resilienz-Konzept der zivilen SiFo teilweise sehr nahekommt. Er ist dann anschlussfähig an die Erkenntnisse, die im Folgenden in Form von Hypothesen für Resilien-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ce Engineering dargestellt werden (siehe z.B. Attoh-Okine 2016, ENISA 2011, Ouyang/Wang 2015, Rahimi/Madni 2014, Sansavini 2016). Das Fehlen eines ingenieurwissenschaftlichen Verständnisses von Resilience Engineering als Forschungslücke zu bezeichnen, ist selbstverständlich nicht als Geringschätzung der unter diesem Begriff versammelten organisationswissenschaftlichen Resilienzforschung zu verstehen. Im Gegenteil, deren Ideen sind zu einem guten Teil in das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo geflossen. Mit den nun folgenden Ausführungen zu Resilience Engineering kann die dergestalt formulierte Forschungslücke aber als zumindest aus sozialwissenschaftlicher Sicht adressiert gelten. Für die Zukunft sollen darauf basierend natürlich auch konkrete, ingenieurwissenschaftliche Umsetzungen und Anwendungen erfolgen.

Die beiden verbleibenden Forschungslücken – unter den Stichworten engineering resilience und Dominanz von Quantifizierungsansätzen zusammenfassbar – werden ebenfalls durch die im nächsten Schritt entwickelten Hypothesen aus sozialwissenschaftlicher Sicht ein gutes Stück weit geschlossen. Darin liegt scheinbar ein Widerspruch in sich, wenn eine ingenieurwissenschaftliche Umsetzung sozialwissenschaftlich erfolgen soll. Der Widerspruch lässt sich aber dank der interdisziplinären Herangehensweise der Arbeit auflösen, deren Anspruch aufgrund ihrer sozialwissenschaftlichen Grundausrichtung nicht darin liegen kann, den Ingenieurwissenschaften mathematische Modelle oder technologische Methoden an die Hand zu geben. Vielmehr geht es darum, Wege, Bedingungen und Bestandteile aufzuzeigen, welche die Ingenieurwissenschaften berücksichtigen sollten, wenn sie versuchen, das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo praktisch umzusetzen.

Dieses Resilienz-Konzept wurde im vorangegangenen Kapitel zum einen mithilfe der Definition relevanter Begrifflichkeiten konkretisiert. Die Definitionen sollen auch für die Hypothesen für Resilience Engineering weiterhin ihre Gültigkeit behalten. Die damit unter Umständen verbundenen Schwierigkeiten im Hinblick auf inkonsistente Begriffsverständnisse zwischen Sozial- und Ingenieurwissenschaften lassen sich zwar so nicht a priori aus der Welt schaffen. Sie werden aber zumindest explizit adressierbar, wenn die Ingenieurwissenschaften bei einer Verwendung der Hypothesen für Resilience Engineering zunächst prüfen können – und müssen – inwiefern die zugrundeliegenden Begrifflichkeiten in ihrer Disziplin äquivalent anwendbar sind. Wo dies nicht möglich ist, wäre dann im nächsten Schritt die Frage, ob die Definitionen in die Ingenieurwissenschaften „übersetzt" werden können, ohne ihren wesentlichen Inhalt zu verlieren. Der wesentliche Inhalt ist ja für die einzelnen Bestandteile des Resilienz-Konzepts

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

der zivilen SiFo unabdingbar. Eine Veränderung wirkt sich entsprechend unmittelbar auf das Konzept aus. Insofern scheint es sinnvoll, an dieser Stelle bei Bedarf einen direkten Dialog zwischen Ingenieurwissenschaftlern und Sozialwissenschaftlern zu forcieren. Denn ein gemeinsames oder aber zumindest adaptierbares Verständnis der relevantesten Begrifflichkeiten ist eine Grundbedingung für eine sinnvolle Anwendung des Resilienz-Konzepts mithilfe der Hypothesen für Resilience Engineering. Diese Überlegungen führen bereits zu einer ersten und sicherlich auch besonders relevanten Hypothese für Resilience Engineering. Diese lautet wie folgt:

> *Hypothese H1: Resilience Engineering erfordert ex ante eine Verständigung über die Bedeutung relevanter Begrifflichkeiten im Resilienz-Konzept der zivilen SiFo.*

Nur wenn klar ist, wer mit welchem Begriff worüber redet, ist eine interdisziplinäre Verständigung möglich. Und ohne interdisziplinäre Verständigung lässt sich Resilienz nicht umsetzen, das hat die ausführliche Beschäftigung mit dem Konzept in der vorliegenden Arbeit mehr als deutlich gemacht.

Die Ergebnisse der bisherigen Analyse nutzend und auf die Ingenieurwissenschaften bezogen daraus Schlüsse ziehen. Mithilfe dieses gerade demonstrierten Vorgehens werden auch in den folgenden Unterkapiteln Hypothesen für Resilience Engineering abgeleitet. Neben der Definition relevanter Begrifflichkeiten, wurde das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo anhand der Beantwortung von sieben sogenannten Leitfragen konkretisiert. Die Leitfragen erlaubten eine systematische Zuordnung der aus den konzeptionellen Zugängen gewonnenen Erkenntnisse zu besonders relevanten Aspekten des Konzepts. Etwa den Fragen danach, um was für eine Art Konzept es sich überhaupt handelt, warum es notwendig ist oder was den normativen Gehalt des Konzepts ausmacht. Erst in der systematischen Zuordnung und analytischen Kombination der einzelnen Merksätze ergab sich ein zusammenhängendes Konzept. Aus Merksätzen wurden so Konzept-Bestandteile, inhaltlich geordnet mithilfe der erwähnten Leitfragen. Wenn auch nicht gänzlich unkritisch zu sehen (siehe dazu 5.4), so bietet das Konzept doch aufgrund seines umfassenden Anspruchs und der breiten, theoretischen Basis vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Die Generierung von Hypothesen für Resilience Engineering ist eine derartige Anwendungsmöglichkeit. Diese soll ebenfalls in einer systematischen Weise und insofern nicht quasi zufallsbasiert erfolgen. Dazu wurde über unterschiedliche Wege nachgedacht, das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo mit Hypothesen für Resilience Engineering zu verknüpfen. Ein Beispiel dafür

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

wäre die Nutzung einer Liste an Prinzipien zur Umsetzung von Resilienz, wie sie etwa von Lovins und Lovins, aber auch von einer Reihe anderer Autoren vorgeschlagen werden (Dinh et al. 2012: 235f, Goessling-Reisemann/Thier 2019: 127, Lovins/Lovins 2001: 213, Madni/Jackson 2009: 189, Ouedraogo et al. 2013: 25). Aber weder sind diese Listen deckungsgleich noch theoretisch begründet, so dass in dieser Richtung eine Verknüpfung mit dem Resilienz-Konzept relativ schwer umzusetzen wäre. Ein weiteres Beispiel dafür wäre die Orientierung an den unterschiedlichen Bereichen der zivilen Sicherheitsforschung, etwa basierend auf dem aktuellen Sicherheitsforschungsprogramm. Auch hier wäre die Verknüpfung mit dem Resilienz-Konzept nur schwerlich herzustellen. Vor allen Dingen aber wäre bei einer Neuauflage des Sicherheitsforschungsprogramms in einigen Jahren davon auszugehen, dass – selbst bei einer einigermaßen großen Deckungsgleichheit – die Hypothesen zum Teil ihre Bedeutung verlieren. Und der Anspruch der vorliegenden Arbeit besteht durchaus darin, mittel- und langfristig gültige Hypothesen zu entwickeln.

Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, sollen die Hypothesen für Resilience Engineering im Folgenden äquivalent zum Resilienz-Konzept der zivilen SiFo anhand von Leitfragen diskutiert werden. Sinnigerweise handelt es sich dabei um die gleichen Leitfragen, die auch im vorangegangenen Kapitel genutzt wurden. Innerhalb der einzelnen Unterkapitel werden die Leitfragen dann noch zu den Bestandteilen des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo ausdifferenziert und zu diesen jeweils Hypothesen für Resilience Engineering gebildet. Dabei gilt zum einen, dass einzelne Bestandteile durchaus auch mehrere Hypothesen begründen können. Das gilt vor allem in Bezug auf die Frage danach, worin Resilienz aus system- und komplexitätstheoretischer Sicht besteht. Zum anderen werden nicht zu allen Bestandteilen Hypothesen aufgestellt bzw. mehrere Bestandteile zusammengefasst und dazu jeweils übergreifend ableitbare Hypothesen gebildet. Die jeweilige Vorgehensweise wird an den entsprechenden Stellen begründet. An allen Stellen werden, sofern in der Literatur dazu passende Erkenntnisse vorliegen, diese mit den theoretischen Annahmen des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo verknüpft, um das bereits vorhandene Wissen der relevanten Experten mit aufnehmen zu können (Jackson/Ferris 2013: 2). Zu den folgenden vier Leitfragen gibt es einzelne Unterkapitel:

- Was für eine Art Konzept ist Resilienz?
- Wann wird Resilienz benötigt?

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

- Welche Bedingungen sind aus system- und komplexitätstheoretischer Sicht notwendig für Resilienz?
- Worin besteht Resilienz aus system- und komplexitätstheoretischer Sicht?

Die drei Leitfragen zu den normativ orientierten Bestandteilen des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo nach den Aspekten, auf die es bei Resilienz aus normativer Sicht zu achten gilt, sowie den Dingen, aus denen Resilienz aus normativer Sicht besteht und gerade nicht besteht, werden bewusst zu einem Unterkapitel zusammengefasst. Das soll nicht als eine Herabstufung hinsichtlich der Bedeutung normativer Fragen für Resilience Engineering missverstanden werden. Vielmehr bietet es die Möglichkeit, eine Reihe konsistenter Hypothesen aufzustellen, ohne der Gefahr einer Wiederholung und damit Verwässerung anheimzufallen. Nachdem die Hypothesen aufgestellt wurden, werden sie in einem weiteren Unterkapitel noch einmal zusammengefasst und übersichtlich dargestellt, da sie neben der Definition der relevanten Begrifflichkeiten in 5.2 und den Bestandteilen des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo in 5.3 den dritten zentralen Erkenntniskomplex der vorliegenden Arbeit bilden. Ähnlich wie im vorangegangenen Kapitel sind gleichzeitig auch Grenzen und mögliche Kritikpunkte in Bezug auf die Hypothesen sichtbar, die im abschließenden Unterkapitel noch kurz diskutiert werden.

6.2. *Art des Konzepts*

Resilienz ist ein systemtheoretisches Konzept.

Was für eine Art Konzept ist Resilienz? Der Beantwortung dieser Frage wurde in der vorliegenden Arbeit große Aufmerksamkeit geschenkt. Eine grundsätzliche Herausforderung bestand darin, unterschiedliche Erkenntnisse aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen nutzbar zu machen. Immerhin geht es hier um eine interdisziplinäre Analyse, die – wenn auch primär darin verortet – nicht nur für die Sozialwissenschaften hilfreich sein soll. Deshalb wurde der Systembegriff eingeführt und damit auch die Systemtheorie als theoretische Basis für die deskriptiv-analytische Diskussion des Resilienz-Konzepts. Systemtheoretische Ansätze gibt es nicht nur in den Sozial- sondern auch in den Ingenieur- und Naturwissenschaften. Die Systemtheorie ist selbst grundsätzlich interdisziplinär oder besser über-disziplinär zu verstehen. Diese Möglichkeit hat die vorliegende Arbeit genutzt, um die Resilienz-Diskussionen aus verschiedenen Disziplinen in einem eigenständigen Konzept für die zivile SiFo zusammenzufüh-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ren. Insbesondere durch die Verknüpfung der soziologischen Systemtheorie Luhmanns auf der einen Seite mit der sehr viel stärker ingenieur- bzw. naturwissenschaftlichen Theorie komplexer adaptiver Systeme auf der anderen Seite konnten so neuartige Erkenntnisse gewonnen und etablierte Ideen von Resilienz theoretisch noch stärker fundiert werden. So ließ sich dann insgesamt festhalten, dass Resilienz als systemtheoretisches Konzept verstanden werden kann. Welche Implikationen hat das für Resilience Engineering?

Zunächst sollten ingenieurwissenschaftliche Ansätze und Arbeiten in der zivilen SiFo von Anfang an berücksichtigen, um welche Art Konzept oder Definition von Resilienz es sich handelt. Dazu kann auf einen Artikel von Ayyub verwiesen werden, der zwischen „abstraktiven" (abstractive) und „interpretativen" (interpretive) Definitionen unterscheidet (Ayyub 2015: 2). Das Verständnis dessen, was eine Definition ausmacht und welche Arten es gibt, ist sozusagen eine Wissenschaft für sich. Für den Zweck, den die vorliegende Arbeit an dieser Stelle verfolgt, bieten Ayyubs Bezeichnungen aber eine gute Grundlage. Eine abstraktive Definition ist ihm zufolge eine, die keine Zweideutigkeiten zulässt und die nur durch den Nachweis eines logischen Widerspruchs widerlegt werden kann. Mathematische Definitionen fallen für ihn in diesen Bereich. Und auch Metriken sind abstraktive Definitionen. Interpretative Definitionen sind hingegen primär deskriptiv, für eine generischere Nutzung geeignet, mit unterschiedlichen Graden an Nützlichkeit und Wert verbunden (Ayyub 2015: 2). Übertragen auf wissenschaftliche Konzepte lassen sich abstraktive Definitionen mit quantitativen Konzepten vergleichen und interpretative Definitionen eher mit qualitativen. Für Resilience Engineering, das auf dem eigenständigen Resilienz-Konzept der zivilen SiFo beruht, ist es von Bedeutung, die Art dieses Konzepts explizit in Rechnung zu stellen und zu adressieren. Resilienz hängt in vielfacher Hinsicht mit Komplexität zusammen und das schlägt sich selbstverständlich auch in den Hypothesen für Resilience Engineering nieder. Zunächst ist Resilienz, wie als Ergebnis der Analyse in 5.1 dargestellt, selbst ein komplexes Konstrukt. Aufgrund der unterschiedlichen, aufeinander bezogenen und wechselseitig voneinander abhängigen Bestandteile, kann es nur in einer Gesamtbetrachtung verstanden werden. Deshalb wurde auch bewusst auf die Aufstellung einer (weiteren), knappen Definition von Resilienz verzichtet. Auch die unter der Leitfrage woraus Resilienz besteht aufgeführten Bestandteile sind für sich genommen – ohne die zugrundeliegenden Begrifflichkeiten, ohne die Darstellung der Notwendigkeit von und der notwendigen Bedingungen für Resilienz oder ohne die normative Einordnung – nicht dazu geeignet,

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

als Definition sozusagen alle weiteren Erkenntnisse zusammenzufassen (siehe 5.3). Bezogen auf die Frage nach der Art des Konzepts kann die Antwort also nur lauten, dass das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo notwendig qualitativ und interpretativ sein muss. Resilience Engineering im Verständnis der vorliegenden Arbeit erfordert eine explizite Berücksichtigung dieser Tatsache. Die Verwendung einer verkürzten Arbeitsdefinition wie etwa der des mit dem Begriff engineering resilience verbundenen bounce back in einen ursprünglichen Gleichgewichtszustand, als Grundlage für eine ingenieurwissenschaftliche Umsetzung ist sicher attraktiv, da sie im system- und komplexitätstheoretischen Sinn „einfacher" ist, also lineare Kausalitäten und deterministisches Systemverhalten als Annahmen möglich macht. Sie widerspricht aber allen Erkenntnissen der vorangegangenen Analyse. Insofern sollte für Resilience Engineering folgende Hypothese gelten:

> *Hypothese H2: Resilienz ist ein qualitatives weil komplexes Konzept, dessen ingenieurwissenschaftliche Umsetzung dies explizit zu berücksichtigen hat.*

Diese Überlegungen führen noch zu einer weiteren Hypothese. Wenn Resilienz sich nicht mittels einer einfachen Arbeitsdefinition fassen lässt. Wenn das Konzept komplex ist und demnach emergente, erst auf Konzeptebene wirksame Eigenschaften aufweist. Und wenn es in einer Verknüpfung deskriptiv-analytischer und normativer Bestandteile besteht. Dann lässt es sich nicht „einfach" messen oder quantifizieren. Die Dominanz von Artikeln, die versuchen, Resilienz zu quantifizieren, wurde für die Ingenieurwissenschaften deutlich nachgewiesen (siehe 2.6). All diese Ansätze verfolgen eine völlig nachvollziehbare Zielstellung. Um eine Systemeigenschaft zu verändern, müssen Ingenieure zunächst wissen, welche Ausprägung diese Eigenschaft aktuell annimmt. Wie hoch, tief, klein, groß, gut, schlecht, rot, grün oder gelb sie ist. Das gilt so auch für Resilienz. Die ingenieurwissenschaftliche Begründung ist, dass die Resilienz eines Systems erst dann zielgerichtet verändert, meist erhöht, werden kann, wenn sie auch messbar ist. Und daher entwickeln die Ingenieurwissenschaften die unterschiedlichsten Ansätze, um Resilienz zu messen. Wobei diese Ansätze trotz ihrer Unterschiedlichkeit in vielen Fällen darauf hinauslaufen, ein einzelnes Maß für Resilienz zu definieren, zum Beispiel *R*. Dann gilt es für sie herauszufinden, wie hoch die Resilienz *R* des Systems zu einem Zeitpunkt i ist: $R_i=X$. Wobei *X* eine natürliche Zahl sein kann, häufiger aber in Prozenten ausgedrückt wird. Ein solches Maß kann durchaus hilfreich sein, um Systeme bewertend zu vergleichen und daraufhin über Maßnahmen zu entscheiden, welche das Maß in eine gewünschte Rich-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

tung zu verändern in der Lage sind. So wie Resilienz in der vorliegenden Arbeit verstanden wird, kann sie so aber nicht gemessen werden. Dazu vernachlässigen derart einfache Maße zu viele Dimensionen des komplexen Resilienz-Konzepts und verunmöglichen so, dass Resilienz seinen eigentlichen Mehrwert, der ja unter anderem gerade in der Akzeptanz von Komplexität, Unsicherheit und Mehrdeutigkeit besteht, ausspielen kann. Selbstverständlich müssen Systemzustände auch weiter gemessen werden. Resilience Engineering im Sinne der vorliegenden Arbeit verzichtet aber bewusst darauf, einfache Maße für Resilienz zu suchen. Die zugehörige Hypothese lautet:

> *Hypothese H3: Es ist nicht möglich, die Resilienz der für die zivile SiFo relevanten, komplexen adaptiven, sozio-technischen Systeme mittels einfacher Maße zu quantifizieren. Nichtsdestoweniger werden Maße für einfacher zu erhebende Größen benötigt, um den Systemzustand einschätzen und Resilienz erhöhen zu können.*

Mit Blick auf diese Hypothese sowie die Annahme, dass Resilienz ein systemtheoretisches Konzept ist, stellt sich für die Ingenieurwissenschaften zudem noch eine weitere, entscheidende Frage: Um welches System geht es? Gegeben seine vielfältige, interdisziplinäre Verwendung, ist der Systembegriff an sich bereits ein recht schwammiges Konzept (Hollnagel/Fujita 2013: 14). Trotzdem basieren alle Analysen der vorliegenden Arbeit auf ihm. Komplexe adaptive Systeme haben bestimmte Bestandteile, die bestimmte Verhaltensregeln befolgen. Es gibt aber immer eine Systemumwelt, etwas, was nicht zum System gehört. Die Systemumwelt besteht ihrerseits wieder aus weiteren Systemen, für die das gerade betrachtete System Umwelt ist. Im Hinblick auf Resilienz geht es immer darum zu fragen, wessen Resilienz untersucht bzw. mithilfe zielgerichteter Maßnahmen erhöht werden soll. Es muss also immer ein interessierendes System definiert werden (Francis/Bekera 2014: 92). Mit der Definition des Systems geht gleichzeitig die Notwendigkeit einher, Systemgrenzen abzustecken (Connelly et al. 2017: 47). Nur, wenn ein System über eindeutig festgelegte Grenzen verfügt, ist Resilience Engineering möglich. Natürlich sind Systemgrenzen in den für die zivile SiFo relevanten Systemen im Wesentlichen als artifizielle Konstrukte anzusehen (IRGC 2018: 21). Ohne Systemgrenzen ist aber keine Analyse möglich. Die Herausforderung für Resilience Engineering besteht nun darin, die „richtigen" Systemgrenzen zu ziehen. Wird das System zu eng definiert, bleiben wichtige Einflussfaktoren außen vor und es können keine Erkenntnisse gewonnen werden, die dazu beitragen, seine Resilienz zu erhöhen. Werden die Systemgrenzen

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

aber zu weit gesteckt, überfordert die daraus resultierende Komplexität der Einflussfaktoren jede ingenieurwissenschaftliche Methode. Die Kunst besteht also in der Wahl geeigneter Systemgrenzen einerseits. Hier setzen die vorhandenen Methoden und Modelle den Ingenieurwissenschaften Grenzen, die sie aber durch beständige Neu- und Weiterentwicklung derselben verschieben können. Andererseits gehört zu Resilience Engineering aber auch das Eingeständnis, dass die Wahl der Systemgrenzen einen signifikanten Einfluss auf jede Analyse hat. Mit dem Setzen von Systemgrenzen sind also Entscheidungen verbunden. Diese Entscheidungen sollten bewusst getroffen werden. Und sie sollten transparent getroffen werden. Gleichzeitig sollten Systemgrenzen als analytisches Instrument verstanden und nicht mit der Wirklichkeit verwechselt werden. Beispielsweise ist die Forderung nach der Verkleinerung von Systemen, um das Ausmaß widriger Ereignisse zu begrenzen, angesichts zunehmender Vernetzung und steigender Komplexität kaum zu erfüllen (Helbing 2013: 55). Als Hypothese formuliert, kann für Resilience Engineering gesagt werden:

> *Hypothese H4: Die bewusste und transparente Definition von Systemgrenzen als analytisches Instrument ist eine Voraussetzung für Resilience Engineering.*

Sozio-technische Systeme sind die Träger von Resilienz.

Innerhalb der zivilen SiFo sind es vor allem sozio-technische Systeme, die von Interesse sind. Das wurde in der vorangegangenen Analyse deutlich. Diese sozio-technischen Systeme sind dann auch die Träger von Resilienz. Das hängt natürlich direkt mit der gerade geschilderten Notwendigkeit nach der Setzung geeigneter Systemgrenzen zusammen. Es ist ohne weiteres möglich, Systeme rein technisch – oder rein sozial – zu definieren. Ein augenfälliges Beispiel dafür sind Flugzeuge. Technisch betrachtet sind Flugzeuge äußerst komplizierte Systeme, mit einer Vielzahl an technischen Sicherheitsmechanismen, die das Flugzeug insgesamt zu einem der sichersten Verkehrsmittel haben werden lassen. Flugzeughersteller wie Boeing und Airbus arbeiten kontinuierlich daran, die Sicherheit mithilfe immer neuer Technologien noch weiter zu erhöhen und Abstürze, die zwar sehr selten vorkommen, dann aber fast immer den Tod aller Passagiere zur Konsequenz haben, zu verhindern. Ein rein technisches Verständnis des Systems kann allerdings auch zu unintendierten, negativen Konsequenzen führen, was darauf hinweist, dass die Systemgrenzen unter Umständen ungeeignet gewählt waren. Im Oktober 2018 und im März 2019 stürzten zwei Passagierflugzeuge vom Typ Boeing 737 Max ab. Dabei starben 346 Menschen. Die Ursachensuche liefert einen Hinweis darauf, dass die ver-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

antwortlichen Ingenieure bei Boeing beim Entwurf des Flugzeugs und seiner Sicherheitsmechanismen implizit ein rein technisches System vor Augen hatten und somit die menschliche Komponente, die Piloten, zu stark außer Acht ließen. Denn ersten Erkenntnissen zufolge, könnte eine Software namens „Maneuvering Characteristics Augmentation System" (MCAS), die eigentlich dazu gedacht ist, einen Strömungsabriss zu verhindern und um dies zu erreichen, aktiv in die Steuerung des Flugzeugs eingreift, mitverantwortlich für die Abstürze sein. Die Piloten wurden nach Medienberichten unzureichend oder sogar gar nicht im Hinblick auf die Charakteristika dieser Software geschult, so dass sie in den konkreten Notfällen nicht in der Lage waren, die Flugzeuge in der Luft zu halten.[40]

Unabhängig davon, was weitere Untersuchungen zu diesen beiden Unglücken ergeben, eignen sie sich als Argumentationsgrundlage für eine Hypothese zu Resilience Engineering, die explizit den sozio-technischen Charakter der interessierenden Systeme betont. Trotz zunehmender Automatisierung aufgrund des technischen Fortschritts ist es sowohl empirisch zutreffend, als auch theoretisch sinnvoll, dass es einen „human in the loop" gibt (Jackson/Ferris 2013: 5). Menschen sind grundsätzlich lern- und anpassungsfähig, sie können improvisieren und kreativ sowie flexibel auf Situationen reagieren, die sie zuvor noch nicht erlebt haben (Ouedraogo et al. 2013: 26). All das sind Eigenschaften, die für die Resilienz eines Systems förderlich sind. Schon allein aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, Menschen als Teil der interessierenden sozio-technischen Systeme in der SiFo zu begreifen. Zumal, wenn etwa die Anpassungsfähigkeit eines technischen Systems darin besteht, dass beschädigte Teile ersetzt werden (Altherr et al. 2018: 193). Aber auch unabhängig davon, ob es theoretisch zur Erhöhung der Resilienz von Systemen sinnvoll ist, wenn Menschen ein Teil davon sind, kann Resilience Engineering in der zivilen SiFo empirisch kaum davon absehen. Das Beispiel des Flugzeugs hat es gezeigt. Ohne Berücksichtigung der Piloten laufen Ingenieure Gefahr, Systeme im Hinblick auf eine vermeintlich technisch herstellbare Sicherheit hin zu optimieren, dabei aber gleichzeitig ihre Resilienz zu vermindern. Ein noch weit komplexeres Beispiel ist das Energiesystem. Dieses besteht natürlich zum einen aus rein technischen Bestandteilen, von Generatoren über Hochspannungsleitungen bis hin zu Steckdosen. Allerdings werden Kraftwerke von Menschen bedient, Strom von Menschen für unterschiedlichste Zwecke verbraucht und über die Ausgestaltung des Energiesystems

40 https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/boeing-737-max-von-ethiopian-airlines-erster-untersuchungsbericht-liegt-vor-a-1260637.html [Stand: 28.6.2019].

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

politisch durch Menschen entschieden. Das heißt nicht, dass Resilience Engineering immer dieses überkomplexe Gesamtsystem in den Blick nehmen sollte, um Mechanismen zur Erhöhung der Resilienz des Energiesystems zu entwickeln. Das ist durchaus auch auf kleineren Skalen möglich und sinnvoll. Es heißt aber doch, dass Resilience Engineering nicht sinnvollerweise rein technisch gedacht werden kann, bzw. zumindest immer mindestens näherungsweise in Form von Modellen auch menschliches Verhalten mitberücksichtigen sollte:

> *Hypothese H5: Dass die für die zivile SiFo relevanten Systeme sozio-technisch zu verstehen sind, macht es für Resilience Engineering notwendig, Menschen und menschliches Verhalten explizit mit zu berücksichtigen.*

Resilienz ist eine Nicht-Selbstverständlichkeit, sie ist nicht erwartbar.

Diese Erkenntnis stammte primär aus der Psychologie, ließ sich aber auch auf die zivile SiFo übertragen. Wenn etwas außergewöhnlich Schlimmes passiert, mit dem zuvor niemand gerechnet hatte und das die eigentlichen Belastungsgrenzen des Systems übersteigt, ist rein logisch von einem Zusammenbruch des Systems auszugehen. Exakt so ergeht es auch einfachen Systemen, wenn diese über ihre Belastungsgrenzen hinaus beansprucht werden. Sie haben keine Möglichkeit, sich derart außergewöhnlichen Belastungen anzupassen. Komplexe adaptive Systeme verfügen dagegen über Anpassungsfähigkeit und sind damit grundsätzlich in der Lage, auch mit solchen Ereignissen fertig zu werden. Trotzdem ist das nicht selbstverständlich. Kammenhuber et al. beschreiben das treffend am Beispiel des Internets: „Ein ‚resilientes' Internet würde uns demnach erlauben, noch Meldungen bei www.heise.de zu lesen, auch wenn der entsprechende Webserver gerade einen Denial-of-Service-Angriff erleidet, bei Baggerarbeiten versehentlich ein wichtiges Backbone-Kabel durchtrennt wird, unser WLAN von dem des Nachbarn gestört wird oder wenn all das gleichzeitig geschieht" (Kammenhuber et al. 2010: 132). Wenn all diese Störungen zeitgleich zutreffen, geht die intuitive Erwartung in Richtung einer Unerreichbarkeit der Webseite. Verfügt der Betroffene jedoch über ein Smartphone mit mobilem Internet über das Mobilfunknetz während die Betreiber der betreffenden Webseite gleichzeitig über eine redundante Serverarchitektur verfügen, die sowohl eine örtliche Trennung aufweist als auch funktional unterschiedliche Anfälligkeiten gegenüber einer Denial-of-Service-Attacke, steht einer weiteren Verfügbarkeit der Webseite nichts entgegen. Das kurze Beispiel zeigt aber: diese ist voraussetzungsreich und erfordert die Umsetzung unterschiedlicher technischer Maßnahmen. Welchen Prinzipien diese Maßnahmen folgen sollten, um die Resilienz des Systems zu

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

erhöhen, wird in 6.5 aus den system- und komplexitätstheoretischen Annahmen des Konzepts abgeleitet. Daraus ergeben sich dann entsprechend weitere Hypothesen für Resilience Engineering.

Resilienz ist nicht das Gegenteil von Vulnerabilität. Die beiden Konzepte sind unabhängig voneinander. Größere Resilienz führt nicht notwendigerweise zu im Zeitverlauf sinkender Vulnerabilität.

Vulnerabilität ist so, wie es in der vorliegenden Arbeit verstanden wurde, selbst ein multidimensionales Konzept. Nichtsdestotrotz existieren im Vergleich zu Resilienz für Vulnerabilität mehr und vor allen Dingen etabliertere Wege zur Messung und Quantifizierung (Fekete et al. 2014: 14). Es scheint insofern für ein Resilience Engineering sinnvoll, sich an derartigen Maßen, wie sie etwa Cutters SoVI darstellt, zu orientieren und sie für die eigene Arbeit zu nutzen und/oder weiterzuentwickeln. Dies trifft umso mehr mit Blick auf Hypothese H3 zu. Vulnerabilität als physische, soziale, ökonomische und umweltbezogene Ausgesetztheit eines Systems gegenüber widrigen Ereignissen könnte eines der Maße sein, mit deren Hilfe Resilience Engineering arbeiten kann, ohne Resilienz selbst messen zu müssen. Dabei gilt es stets zu beachten, dass Resilienz und Vulnerabilität den system- und komplexitätstheoretischen Erkenntnissen zufolge tatsächlich unabhängig voneinander in Systemen existieren können. Hohe Resilienz und niedrige Vulnerabilität können genauso gemeinsam auftreten wie niedrige Resilienz und niedrige Vulnerabilität und alle weiteren Kombinationen von Resilienz und Vulnerabilität, die durch eine Verknüpfung zweier Kontinuen denkbar sind. Daraus ergeben sich Überlegungen für eine weitere Hypothese zu Resilience Engineering, die im nächsten Unterkapitel weitergeführt werden. Dort geht es um die Frage, wie Resilienz und Vulnerabilität, trotz der theoretischen Unabhängigkeit voneinander, doch in Form einer Notwendigkeit zusammenhängen.

Resilienz ist kein neoliberales Paradigma.

Wenn Resilienz als neoliberales Paradigma bezeichnet wird, so ist damit in den meisten Fällen eine normativ negative Bewertung verknüpft. Dem Konzept wird sozusagen der Vorwurf gemacht, den – als negativ empfundenen – Neoliberalismus unter dem Deckmäntelchen eines attraktiven Begriffs in gesellschaftliche Bereiche einzuführen, nämlich die zivile Sicherheitsforschung bzw. den Bevölkerungs- und Katastrophenschutz, in denen er aus Sicht derjenigen, welche die Vorwürfe erheben, nichts zu suchen habe. Die ausführliche Analyse der vorliegenden Arbeit hat jedoch ergeben: Resilienz ist gerade kein neoliberales Paradigma. Der Vorwurf

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

geht bereits in dieser Hinsicht fehl. Welche detaillierteren normativen Konsequenzen das für Resilience Engineering hat, wird in 6.6 diskutiert. Grundsätzlich lässt sich aber festhalten, dass ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung den Vorwurf, sie leiste einer impliziten Verbreitung des Neoliberalismus Vorschub, mit Verweis auf das Resilienz-Konzept der vorliegenden Arbeit kontern kann. Darin findet sie eine fundierte Begründung, warum es keinen Sinn ergibt, Resilienz als neoliberales Paradigma zu verstehen. Insofern liefert die vorliegende Arbeit den Ingenieurwissenschaften an dieser Stelle eine Art theoretisches Rüstzeug, um eine Debatte mit sozialwissenschaftlichen Argumenten zu bestreiten. Im Fokus von Resilience Engineering steht dies allerdings nicht und eine Hypothese soll insofern an dieser Stelle nicht abgeleitet werden.

Resilienz ist nicht notwendigerweise normativ wünschenswert.

Diese Erkenntnis ist eine Grundlage, derer sich Resilience Engineering immer bewusst sein sollte. Gleichzeitig kann es nicht die Aufgabe der Ingenieurwissenschaften sein, über die normative Erwünschtheit der Resilienz des analysierten Systems zu urteilen. Weder liegt das in ihrem Erkenntnisinteresse noch sind ihre Methoden und Ansätze dazu geeignet, eine solche Bewertung vorzunehmen. Gleichwohl enthält das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo eine ganze Reihe an normativen Bestandteilen, ohne deren Beachtung nicht von Resilienz gesprochen werden kann. Deshalb werden diese im Einzelnen in 6.6 näher diskutiert und wo geboten daraus auch Hypothesen für Resilience Engineering abgeleitet.

6.3. Notwendigkeit für Resilience Engineering

Das Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein von Resilienz lässt sich nur beobachten, wenn Systeme von einem disruptiven, in der Systemumwelt verorteten, gravierenden und häufig extrem unwahrscheinlichen Reiz (bzw. Ereignis) getroffen werden. Der Theorie komplexer adaptiver Systeme folgend, wird die Welt immer komplexer. Je komplexer die Welt, desto wahrscheinlicher wird das Auftreten eigentlich extrem unwahrscheinlicher, disruptiver Ereignisse. Die steigende Komplexität der Welt macht deshalb Resilienz als Eigenschaft komplexer adaptiver Systeme immer notwendiger.
&
Neben Ereignissen, die aus der Systemumwelt resultieren, müssen komplexe adaptive Systeme auch mit dem Auftreten unsicherer interner, durch die Entscheidungen von Agenten ausgelöster, von diesen unintendierter oder intendier-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ter Störungen umgehen können. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher Störungen sowie ihre potentiellen Auswirkungen steigen mit der Eigenkomplexität der Systeme. Denn zum einen können Agenten die Konsequenzen ihrer eigenen Handlungen mit zunehmender Komplexität schlechter überblicken, was die Wahrscheinlichkeit für Unfälle steigert. Zudem steigt mit der Diversität des Systems die Wahrscheinlichkeit, dass Agenten auftreten, deren Ziele konträr zu denen des Systems laufen. Zum anderen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kaskadeneffekten, die beim Eintreten widriger Ereignisse zu großflächigen und häufig langfristigen Schäden am System führen. Um diese verhindern zu können, benötigt das System Resilienz. Auch die steigende Eigenkomplexität komplexer adaptiver Systeme macht Resilienz als Systemeigenschaft also immer notwendiger.

Die beiden gerade geschilderten Bestandteile des Resilienz-Konzepts, die eine zunehmende Notwendigkeit aufgrund der steigenden Komplexität der relevanten Systeme und ihrer Umwelt – die ja wieder aus Systemen besteht – kontastiert, können in Bezug auf Hypothesen für Resilience Engineering gemeinsam untersucht werden. Prinzipiell ist es egal, ob ein disruptives Ereignis seinen Ausgangspunkt außer- oder innerhalb des Systems hat. Unterschiedliche Entwicklungen führen für beide Fälle zu einer steigenden Wahrscheinlichkeit – auch wenn diese nicht quantitativ erfasst werden kann – für das Auftreten disruptiver Ereignisse. Und das ist der durch zunehmende Vernetzung der Systeme und wahrscheinlicher werdenden Kaskadeneffekten steigenden Komplexität geschuldet. Für Resilience Engineering ergibt sich daraus zunächst lediglich eine immer weiter steigende Notwendigkeit. Wenn Resilienz immer wichtiger wird, wird es auch immer wichtiger, geeignete ingenieurwissenschaftliche Ideen und Methoden zu entwickeln, mit deren Hilfe Resilienz gesteigert werden kann. Dieser Zusammenhang ist wichtig, er muss aber nicht in Form einer Hypothese verschriftlicht werden, da er auch bereits unmittelbar aus dem Resilienz-Konzept selbst ersichtlich wird.

Anders verhält es sich mit einer weiteren Annahme, die sich auf Basis des system- und komplexitätstheoretischen Verständnisses von Resilienz ergibt. Resilienz wurde und wird immer wieder als holistisches Konzept verstanden, dass in einem zyklischen Ansatz alle unterschiedlichen Phasen im Hinblick auf ein disruptives Ereignis umfasst. Das hat seinen Ursprung in klassischen Kreisläufen aus dem Bereich des Katastrophen-Managements und wurde auch und gerade vom Autor der vorliegenden Arbeit immer wieder in eigenen Veröffentlichungen aufgeführt (Hiermaier/Scharte 2018: 302, Scharte et al. 2014: 17, Scharte/Thoma 2016: 128, 2015: 32, Thoma et al. 2016: 6). Demnach besteht Resilienz aus den fünf

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Phasen „prepare“, „prevent“, „protect“, „respond“ und „recover“ (siehe Abbildung 4). In jeder dieser Phasen sollen Maßnahmen ergriffen werden, um die Resilienz von Systemen zu erhöhen. „Zunächst geht es um eine ernsthafte Vorbereitung auf Katastrophen, vor allem im Hinblick auf Frühwarnsysteme (prepare). *Durch eine Reduzierung der zugrundeliegenden Risikofaktoren soll zudem – sofern möglich – das Eintreten des Ereignisses an sich verhindert werden (prevent).* Tritt es trotzdem ein, kommt es darauf an, dass physische und virtuelle Schutzsysteme fehlerfrei funktionieren und die negativen Auswirkungen gering halten (protect). Zudem wird schnelle, gut organisierte und effektive Katastrophenhilfe benötigt. Hierbei muss das System – soweit möglich – seine essenzielle Funktionsfähigkeit aufrechterhalten können (respond). Nach dem Ende des unmittelbaren Schadensereignisses ist es wichtig, dass das System in der Lage ist, sich zu erholen und entsprechende Lehren aus dem Geschehen zu ziehen, um für künftige Bedrohungen besser gerüstet zu sein (recover)“ (Scharte et al. 2014: 17f, eigene Hervorhebung). Ein dergestalt holistischer Charakter wurde von Scharte et al. in und anderen Artikeln des Autors sogar als der „zentrale Mehrwert, den die Verwendung des Begriffs der deutschen Gesellschaft langfristig bieten kann“ bezeichnet. Sein „Kern besteht demnach darin, dass resiliente Gesellschaften in der Lage sind, die menschlichen, ökonomischen und ökologischen Schäden, die durch widrige Ereignisse verursacht werden, so gering wie irgend möglich zu halten. Sie schaffen das, indem sie sich jedweder denk- und durchführbarer Lösungen bedienen“ (Scharte et al. 2014c: 123).

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Abbildung 4: Der Resilienz-Zyklus

Quelle: eigene Darstellung nach Scharte et al. 2014.

Diese Aussage lässt sich nach der system- und komplexitätstheoretischen Analyse von Resilienz in der vorliegenden Arbeit nicht länger aufrechterhalten. Der zentrale Mehrwert von Resilienz besteht vielmehr in der theoretischen und praktischen Akzeptanz von Komplexität und Unsicherheit und den darauf basierenden Annahmen im Hinblick darauf, wann Resilienz notwendig ist, was für Resilienz notwendig ist und worin Resilienz besteht. Und als Situation, in der Resilienz notwendig wird, wurde gerade das Eintreten eines disruptiven Ereignisses bezeichnet. Nur wenn und erst nachdem ein derartiges Ereignis eintritt, kann sich Resilienz zeigen. Das führt ganz unmittelbar dazu, dass Prävention und präventive Maßnahmen kein Teil von Resilienz und damit auch nicht Teil von Resilience Engineering sein können. Der Hintergrund dessen ist nicht etwa ein Unwillen, widrige Ereignisse und Störungen zu verhindern. Wo immer dies möglich ist, sollte es unbedingt geschehen. Es geht lediglich darum, für das Konzept der Resilienz ein Mindestmaß an Trennschärfe zu entwickeln. Und diese besteht unter anderem darin, explizit zu akzeptieren: Prävention ist nicht immer und in allen Fällen möglich (Connelly et al. 2017: 46). Überraschungen, schwarze Schwäne, unexampled events treten auf und Systeme müssen damit umzugehen lernen. Genau dabei kann Resilienz helfen. Für Resilience Engineering ergibt sich folgende Hypothese:

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Hypothese H6: Prävention und präventive Maßnahmen sind kein Bestandteil von Resilience Engineering.

Diese Hypothese soll keinesfalls die Nutzlosigkeit präventiver Maßnahmen implizieren. Sie sind lediglich nicht als Teil von Resilience Engineering zu sehen, wie der Begriff im Rahmen der vorliegenden Arbeit verstanden wird. Mit der Hypothese H6 ist zudem ebensowenig verbunden, dass Resilience Engineering immer erst nach Eintreten eines disruptiven Ereignisses erfolgen kann. Das glatte Gegenteil ist der Fall. Zumal zunächst festzuhalten ist: komplexe adaptive Systeme sind dynamische Systeme. Sie entwickeln sich ständig in Anpassung an veränderte Umweltbedingungen weiter und erleben im Lauf ihrer Existenz teilweise multiple, ähnliche oder völlig unterschiedliche, gravierende oder weniger gravierende, überraschende oder erwartete, widrige Ereignisse und Störungen. Das gilt definitiv auch für die sozio-technischen Systeme, die in der zivilen SiFo eine Rolle spielen. Diese sind ja gerade komplexe adaptive Systeme und in vielen Fällen auf eine kontinuierliche Existenz ausgelegt, um gesellschaftlich relevante Funktionen auszufüllen. Dazu kommt noch die Komplexität, Unvorhersehbarkeit und Dynamik der Umwelt der betreffenden Systeme. All das zusammengenommen lässt sich häufig nur schwerlich zwischen einem Zeitpunkt vor einem disruptiven Ereignis und einem Zeitpunkt danach unterscheiden. Das davor eines Ereignisses, stellt häufig auch das danach eines zeitlich früher gelagerten Ereignisses dar. Schaffer und Schneider sprechen hier von einem Verwischen der Differenzierung (Schaffer/Schneider 2019: 23). Wenn es keine eindeutige Trennung zwischen davor und danach gibt, kann auch nicht zwischen proaktiven und reaktiven Maßnahmen zur Erhöhung von Resilienz unterschieden werden. Resilience Engineering kann also schon alleine aus diesem Grund auch und gerade vor dem Eintreten widriger Ereignisse erfolgen.

Dieser Gedanke ist auch konsistent mit dem Resilienz-Verständnis von ingenieurwissenschaftlichen Forschern wie Bruneau. Als Erdbebenforscher beschäftigt er sich mit einer Art disruptiver Ereignisse, die nach menschlichem Ermessen tatsächlich nicht verhindert werden kann. Trotzdem dürfen die Ingenieurwissenschaften Bruneau et al. zufolge nicht einfach abwarten, bis ein disruptives Ereignis eintritt und dann nach Wegen suchen, die Resilienz der betroffenen Systeme zu erhöhen. Die entsprechend ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung, das Resilience Engineering, muss vielmehr vor Eintreten eines widrigen Ereignisses erfolgen (Bruneau et al. 2003: 744). Die erforschten Maßnahmen unterscheiden sich dann lediglich bezüglich des Zeitraums in dem bzw. für den sie wirksam werden oder in dem sie angewendet werden. Auch wenn das von Bruneau et al.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

genannte Beispiel erhöhter Erdbebensicherheit mithilfe bauphysikalischer Maßnahmen (seismic retrofit) aufgrund seiner Verhaftung im Bereich spezialisierter Anpassungsfähigkeit nicht unter das Resilienz-Verständnis der vorliegenden Arbeit fällt, ist sein Gedanke passend (Bruneau et al. 2003: 744). Resilience Engineering besteht aus Maßnahmen, die unabhängig vom konkreten disruptiven Ereignis wirken sollen. Und der Zeitpunkt wie auch die Ausprägung des nächsten disruptiven Ereignisses sind inhärent unsicher. Somit befinden sich komplexe adaptive Systeme qua definitionem immer vor einem nächsten, disruptiven Ereignis. Es besteht demzufolge immer die Notwendigkeit für Resilience Engineering. Gleichzeitig besteht aber auch immer die Möglichkeit für Resilience Engineering. Von der Unmöglichkeit zur Prävention aller disruptiven Ereignisse abgesehen, kann Resilience Engineering zu allen Phasen des Resilienz-Zyklus beitragen, von prepare und protect zu respond und recover. Der Beitrag besteht dann allerdings weniger etwa in der Umsetzung klassischer Schutzmaßnahmen gegen spezifische Bedrohungen in der protect-Phase, sondern stärker in der Frage, welche generischen Schutzmaßnahmen gegen alle Arten von Bedrohungen helfen könnten. Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz in diesen unterschiedlichen Phasen können und müssen alle bereits vor dem nächsten widrigen Ereignis umgesetzt werden. Ihnen kann theoretisch eine Resilienz erhöhende Wirkung zugewiesen werden. Inwiefern sie tatsächlich auch empirisch zur Erhöhung der Resilienz beigetragen haben, lässt sich aber erst ex post feststellen. Für Resilience Engineering ergibt diese Diskussion folgende Hypothese:

> *Hypothese H7: Resilience Engineering erfolgt bereits vor dem Eintreten eines disruptiven Ereignisses und trägt zur Erhöhung von Resilienz in den Phasen prepare, protect, respond und recover bei.*

Um Risiken zu bewältigen, benötigen Systeme keine Resilienz. Das Ereignis an sich, die Wahrscheinlichkeit seines Auftretens und seine Auswirkungen auf das System sind bekannt, so dass spezifische Maßnahmen zum Umgang mit dem Risiko ausreichen.

Risiko ist eine der zentralen Begrifflichkeiten der vorliegenden Arbeit. Wie die kurzen Erläuterungen des jeweiligen Stands der Forschung in den Sozial- wie Ingenieurwissenschaften gezeigt haben, gibt es dabei durchaus unterschiedliche Verständnisse mit einer unterschiedlichen Reichweite (siehe 2.4 und 2.6). Gerade Forscher wie Helbing oder Renn, die von systemischen und global vernetzten Risiken sprechen, oder Steen und Aven, die Unsicherheit statt Wahrscheinlichkeit als Schlüsselkonzept von Risiko bezeichnen, verstehen unter Risiko sehr viel mehr und etwas dezidiert

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

anderes, als es in der klassischen, quantitativen Risikoanalyse der Fall ist (Helbing 2013: 51, Renn 2016: 30f, Steen/Aven 2011: 293). Nichtsdestoweniger dominieren die Ideen, die der quantitativen Risikoanalyse zugrunde liegen, in der ingenieurwissenschaftlichen SiFo immer noch an vielen Stellen. Genau aus diesem Grund, um den Unterschied zwischen einem klassischen, ingenieurwissenschaftlichen Verständnis von Risiko auf der einen Seite und einem systemischen Verständnis von Resilienz auf der anderen Seite herausarbeiten zu können, bedient sich die vorliegende Arbeit einer derart klassischen Definition von Risiko. Basierend auf Unterscheidungen aus den Wirtschaftswissenschaften wird Risiko als eine von drei Arten von Unsicherheit charakterisiert und sozusagen als vergleichsweise geringe Unsicherheit verstanden. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Ereignissen, die in die Kategorie Risiko fallen, ist ebenso bekannt wie ihre Auswirkungen. Davon zu unterscheiden sind ungewisse und echt unsichere Ereignisse, die zusammenfassend als unerwartete Ereignisse bezeichnet wurden. In Übereinstimmung beispielsweise mit Linkov et al. wurde dann in der system- und komplexitätstheoretischen Analyse deutlich, dass Systeme zur Bewältigung von Risiken gerade keine Resilienz benötigen (Linkov et al. 2014: 407ff). Aufgrund von deren determinierter Erwartbarkeit und den ebenfalls determinierten Auswirkungen, lassen sich Risiken a priori mithilfe spezifischer Vorbereitungsmaßnahmen adressieren. Und spezifische Vorbereitungsmaßnahmen sind nicht Bestandteil von Resilienz.

Für Resilience Engineering ergibt sich daraus, dass Methoden zur Entwicklung spezifischer Schutzmaßnahmen nicht berücksichtigt werden. Äquivalent zum Thema Prävention ist damit in keiner Weise eine Geringschätzung spezifischer Schutzmaßnahmen verbunden. Im Gegenteil, wenn sich Risiken – in komplexen adaptiven Systemen immer nur näherungsweise – bestimmen lassen und gesellschaftlich als inakzeptabel eingeschätzt werden, gebietet sich ein klassisches Risikomanagement, bei dem das spezifische Risiko mittels spezifischer wirkender Maßnahmen zu minimieren versucht wird. Das gilt für viele Bedrohungen, deren Wahrscheinlichkeiten und mögliche Auswirkungen aufgrund historischer Erfahrungen gut bekannt sind, beispielsweise wiederkehrende Hochwasser an Flüssen. Ein geeigneter Hochwasserschutz in Form von Dämmen und Deichen ist hier ohne jeden Zweifel geboten. Es ist aber weder notwendig noch theoretisch vertretbar, derartiges Risikomanagement als Teil von Resilience Engineering zu verstehen. Selbiges gilt auch für andere Methoden, die ähnlich wie die quantitative Risikoanalyse auf einem linearen und deterministischen Systemverständnis beruhen. Sie als Teil von Resilience Engineering zu verstehen, kann dazu führen, relevante Faktoren und Un-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

sicherheiten zu vernachlässigen und so eine scheinbare Sicherheit auf Kosten der Resilienz zu produzieren (Rahimi/Madni 2014: 813, Steen/Aven 2011: 296). Ähnlich wie von Linkov et al. gefordert, ist es so auch möglich, dezidierter zwischen klassischem Risikomanagement und Resilience Engineering zu unterscheiden (Linkov et al. 2014: 407ff). Daraus ergeben sich gleich zwei Hypothesen für Resilience Engineering:

> *Hypothese H8: Die quantitative Risikoanalyse und ähnliche, linear und deterministisch arbeitende Methoden sind nicht dazu geeignet, zu Resilience Engineering beizutragen.*
>
> *Hypothese H9: Die Entwicklung bedrohungsspezifischer Schutzmaßnahmen ist kein Teil von Resilience Engineering.*

Es gibt Risiken, die komplexe adaptive Systeme ganz bewusst eingehen, weil ihre Eintrittswahrscheinlichkeit extrem gering ist, aber gleichzeitig die Auswirkungen so groß, dass die Ausbildung spezialisierter Anpassungsfähigkeit sehr viele Ressourcen in Anspruch nehmen würde. Zur Bewältigung von Risiken, für die komplexe adaptive Systeme keine spezialisierte Anpassungsfähigkeit entwickeln und die ihre Belastungsgrenzen übersteigen, ist Resilienz notwendig.

Die Absolutheit der Hypothese H8 muss mit Blick auf diesen nächsten Bestandteil des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo ein Stück weit relativiert werden. Quantitative Risikoanalysen sind zwar nach wie vor kein Teil von Resilience Engineering. Wenn mit Hilfe quantitativer Risikoanalysen aber eine bestimmte Art von Risiken identifiziert wird, ergibt sich daraus wieder eine Notwendigkeit für Resilience Engineering. Diese Risiken sind diejenigen, die einerseits eine extrem geringe Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen, andererseits aber mit ebenfalls extremen, negativen Auswirkungen verknüpft sind. Aufgrund der extremen Schäden, die beim Eintreten des so charakterisierten Ereignisses zu erwarten wären, können Gesellschaften diese Art von Risiken nicht einfach ignorieren. Eine angemessene, spezifische Vorbereitung würde jedoch den Einsatz einer Vielzahl an Ressourcen verschlingen. Die extrem geringe Wahrscheinlichkeit lässt eine derartige Investition überwiegend unrentabel erscheinen. An dieser Stelle kommt die Möglichkeit von Resilienz ins Spiel und daher auch die Notwendigkeit für Resilience Engineering. Gerade, weil Resilienz einen unspezifischen, generischen Ansatz verfolgt, der szenario-unabhängig, vom konkreten Ereignis abstrahierend, funktioniert, ist eine Resilienz-orientierte Herangehensweise auch dazu geeignet, Risiken mit extrem geringer Eintrittswahrscheinlichkeit aber extrem großen Auswirkungen zu adressieren. Die generischen Maßnahmen und Mechanismen wirken eben unabhängig

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

vom disruptiven Ereignis, auch wenn im Vorhinein bereits damit gerechnet wurde.

Das Argument könnte scheinbar konsequent zu Ende geführt werden, indem dann generell jedes konkrete Risikomanagement zugunsten von Resilience Engineering unterlassen werden könnte. Es wurde aber bereits dargelegt, dass das gerade nicht im Sinne der vorliegenden Arbeit ist, die Resilience Engineering als Ergänzung zu Risikomanagement versteht und nicht als Ersetzung. Genauso wie das Eintreten disruptiver Ereignisse a priori unsicher ist, können auch Maßnahmen und Mechanismen, die zur Erhöhung der Resilienz ergriffen wurden, nicht deterministisch als in jedem Falle in erwarteter Weise wirksam verstanden werden. Dahingegen wirken spezifische Maßnahmen auch in komplexen adaptiven Systemen durchaus, zumindest näherungsweise, häufig in der intendierten Weise. Risiken mittels spezifischer Maßnahmen zu adressieren, ergibt also auch weiterhin Sinn. Allerdings sollten komplexe adaptive Systeme im Bereich der zivilen SiFo nicht ausschließlich mithilfe von Risikomanagement sicherer gestaltet werden, da weder das Eintreten extrem unwahrscheinlicher, aber mit extremen negativen Auswirkungen verknüpfter Ereignisse ausgeschlossen werden kann, noch das Eintreten unerwarteter Ereignisse. Für Resilience Engineering heißt das:

> *Hypothese H10: Risiken mit extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten und extrem großen Auswirkungen können und sollten durch Resilience Engineering adressiert werden, da spezifische Vorbereitung aufgrund der Kostenintensität zumeist unterbleibt.*

In komplexen adaptiven Systemen besteht die Möglichkeit, dass unerwartete Ereignisse mit gravierenden Auswirkungen, sogenannte schwarze Schwäne bzw. beispiellose Ereignisse auftreten. Zur Bewältigung solcher ungewissen und echt unsicheren Ereignisse, welche die Belastungsgrenzen komplexer adaptiver Systeme übersteigen, benötigen diese Resilienz.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Zusammenhang zwischen Resilienz und Unsicherheit, der in der Resilienzforschung allgemein eine sehr große Rolle spielt, mithilfe der system- und komplexitätstheoretischen Analyse detailliert untersucht. Neben der Verknüpfung von Resilienz und extremen Risiken, wurde so auch die Verknüpfung zwischen Resilienz und unerwarteten, die eigentlichen Belastungsgrenzen der betroffenen Systeme übersteigenden Ereignissen offenbar. Damit ist es auch für Resilience Engineering wichtig zu diskutieren, was die Unsicherheit von Ereignissen und ihren Auswirkungen für ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung bedeutet. Generell zeigt sich in aktuellen Artikeln aus diesem Bereich

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

eine Art Trend, Unsicherheit zumindest explizit anzuerkennen (siehe zum Beispiel Altherr et al. 2018). Teilweise wird dann auch an Methoden geforscht, welche mit (echter) Unsicherheit umzugehen in der Lage sind und Mechanismen entwickelt, die Unsicherheit in Rechnung stellen. Das kann sehr gut als Teil von Resilience Engineering verstanden werden und wird daher an späterer Stelle noch detaillierter diskutiert (siehe 6.5). Generell gilt für komplexe adaptive Systeme ein Hinweis von Madni und Jackson, den diese schon 2009 formulieren. Demnach sollen Systeme grundsätzlich mit adäquaten Sicherheitsmargen entwickelt werden, um mit Unsicherheit umgehen zu können (Madni/Jackson 2009: 182). Wobei mit Sicherheitsmargen nicht die eher statischen Toleranzen gemeint sein können, die es Systemen erlauben, Leistungsschwankungen bedingt durch kleinere Störereignisse innerhalb kurzer Zeit auszugleichen und in ihren Gleichgewichtszustand zurückzukehren. Sicherheitsmargen sind hier viel eher die ungenutzten Spielräume, von denen bereits in 4.3.2 und 4.3.5 die Rede war. Wachsmuth wählt mit einem ähnlichen inhaltlichen Verständnis den Begriff der „heuristischen Prinzipien", die genutzt werden sollten, um Überraschungen zu begegnen (Wachsmuth 2014: 6). Aus diesen Überlegungen lässt sich für Resilience Engineering eine weitere Hypothese ableiten, die zentral für die später dargestellten, konkreten Prinzipien und Mechanismen ist. Sie stellt sozusagen deren Grundlage dar. Damit sind die Hypothesen für Resilience Engineering auch weiter konsistent zum Resilienz-Konzept der zivilen SiFo, für das ebenfalls Komplexität einerseits und Unsicherheit andererseits die entscheidenden Phänomene für die Notwendigkeit von Resilienz sind. Die resultierende Hypothese lautet:

> *Hypothese H11: Aufgrund der Unsicherheit von Ereignissen besteht ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung wesentlich aus der Entwicklung heuristischer generischer Prinzipien.*

Um mit langfristigen Veränderungsprozessen erfolgreich umgehen zu können, benötigen komplexe adaptive Systeme keine Resilienz. Erst wenn die langfristigen Prozesse durch Erreichen eines Schwellenwertes ein unerwartetes und die Belastungsgrenzen des Systems überschreitendes Ereignis auslösen, wird Resilienz notwendig.

Dieser Bestandteil des Resilienz-Konzepts liefert in der Diskussion eine sehr interessante Hypothese für Resilience Engineering. Zunächst ist er nicht unstrittig, wird Resilienz doch von vielen Forschern als geeignet angesehen, sowohl langfristige Veränderungsprozesse als auch kurzfristige, abrupte Störungen zu adressieren. Gerade in der organisationswissenschaftlichen Resilienzforschung spielen solche Prozesse eine wichtige Rol-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

le (siehe 2.5). Aber auch in den Sozial- und Ingenieurwissenschaften ist die Ansicht durchaus verbreitet (siehe 2.4 und 2.6). Mit Blick auf die ökologische und sozial-ökologische Resilienzforschung und als Ergebnis der system- und komplexitätstheoretischen Analyse wurde nichtsdestotrotz deutlich, dass der erfolgreiche Umgang mit langfristigen Veränderungsprozessen gerade keine Resilienz im Sinne der vorliegenden Arbeit erfordert. Der lange Zeithorizont und die graduellen Veränderungsprozesse lassen sich sehr gut spezifisch und mittels sich langsam weiterentwickelnder, spezialisierter Anpassungsfähigkeit bewältigen. Die langfristigen Prozesse an sich sind für Resilience Engineering also nicht von Interesse. Ganz anders sieht es aber mit den sogenannten Umkipp-Punkten oder Schwellenwerten aus, an denen ein System plötzlich und unerwartet eine gravierende Änderung erfährt. Umkipp-Punkte und Schwellenwerte spielen in verschiedenen Bereichen der Resilienzforschung, vor allem in der Ökologie und der sozial-ökologischen Forschung, eine sehr wichtige Rolle (Walker et al. 2004). Auch in der vorliegenden Arbeit wurden sie bereits an verschiedenen Stellen erwähnt. Ein Weg, die Resilienz von Systemen zu erhöhen, besteht darin, ein Operieren des Systems nahe Schwellenwerten möglichst zu vermeiden. Das ist nur möglich, wenn die Schwellenwerte bekannt sind. Die Identifikation solcher Schwellenwerte ist in komplexen adaptiven Systemen aber alles andere als trivial. Bedingt durch die Eigenschaft der Emergenz bedarf es eines systemischen Blicks, um hier Fortschritte zu erzielen. Es gibt bereits einige Ansätze, die genau das versuchen. Rahimi und Madni sehen beispielsweise generische Frühwarnsignale am Werk. So gebe es eine kritische Verlangsamung der Rückkehr des Systems in seinen Gleichgewichtszustand nach leichten Störungen, wenn sich das System einem kritischen Schwellenwert nähere. Diese kritische Verlangsamung könne mit Hilfe von statistischen Phänomenen wie Autokorrelation und Varianz beobachtet werden. Rahimi und Madni sehen aber selbst eine Schwierigkeit darin, diese interessierenden statistischen Größen in komplexen Systemen zu erfassen (Rahimi/Madni 2014: 813). Auch Folke et al., aus der sozial-ökologischen Resilienzforschung kommend, sprechen davon, dass komplexe Systeme nahe Schwellenwerten sozusagen „stottern" (stutter) oder eben eine größere Varianz aufwiesen. Mithilfe dieser größeren Varianz ließen sich Schwellenwerte evtl. im Vorhinein identifizieren (Folke 2006: 262). Nicht zuletzt ist es die Theorie komplexer adaptiver Systeme selbst, deren formale und mathematische Umsetzung Ideen enthält, mit deren Hilfe kritische Schwellenwerte in Systemen erkannt werden können. Insofern erfolgt an dieser Stelle eine Art Zirkelschluss. Die Theorie komplexer adaptiver Systeme wurde dazu genutzt, das Resilienz-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Konzept der zivilen SiFo zu entwickeln. Gleichzeitig können die Theorie komplexer adaptiver Systeme und vor allem auch darauf basierende, formale und mathematische Modelle und Methoden selbst als Bestandteil bzw. mögliche Umsetzung von Resilience Engineering verstanden werden. Für Resilience Engineering folgt dann eine weitere Hypothese:

> *Hypothese H12: Die Theorie komplexer adaptiver Systeme und die daraus entwickelten mathematischen Modelle und Methoden können als Teil von Resilience Engineering genutzt werden, um Umkipp-Punkte oder Schwellenwerte zu identifizieren.*

Je höher die Vulnerabilität eines komplexen adaptiven Systems, desto wahrscheinlicher und stärker übersteigen widrige Ereignisse die eigentlichen Belastungsgrenzen des Systems, bzw. desto stärker weicht das System initial von seinem eigentlich erwartbaren Entwicklungspfad ab, und desto größer muss ceteris paribus seine Resilienz sein, um erfolgreich mit dem Ereignis umgehen zu können.

Im vorangegangenen Unterkapitel wurde bereits auf die Möglichkeit verwiesen, Indikatoren für Vulnerabilität auch als Bestandteil von Resilience Engineering zu verstehen. Ein einfaches Maß für Resilienz kann durch Resilience Engineering nicht erreicht werden, das wurde ebenfalls bereits klar. Aber für Vulnerabilität gibt es einigermaßen etablierte Methoden zur Messung und Quantifizierung. Und gegeben den gerade geschilderten Teil des Resilienz-Konzepts, wonach höhere Vulnerabilität auch höhere Resilienz erfordert, lässt sich diese Idee noch untermauern. Steigende Vulnerabilität führt aufgrund der Unabhängigkeit der Konzepte ja gerade nicht notwendigerweise zu sinkender Resilienz. Resilienz kann auch bei steigender Vulnerabilität mithilfe von Resilience Engineering erhöht werden. Und je höher die Vulnerabilität eines Systems ist, desto stärker wird Resilienz benötigt. Wissen über die Vulnerabilität von Systemen und vor allen Dingen Wissen über die unterschiedliche Vulnerabilität unterschiedlicher Systeme ermöglicht es dann, sich auf die Systeme zu fokussieren, deren Bedarf an Resilienz aufgrund hoher Vulnerabilität ceteris paribus am größten ist. Für Resilience Engineering ergibt sich folgendes:

> *Hypothese H13: Die Nutzung geeigneter, etablierter Indikatoren zur Messung von Vulnerabilität ist Teil von Resilience Engineering und kann dazu genutzt werden, Systeme zu identifizieren, deren Resilienz besonders dringend erhöht werden sollte.*

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

6.4. Notwendige Bedingungen für Resilience Engineering

Einfache Systeme reagieren in deterministischer Weise auf Belastungen. Übersteigen diese die Grenzen ihrer Belastbarkeit, bricht das System zusammen. Es kann nicht mehr auf einen neuen Entwicklungspfad umschwenken, auch nicht auf einen mit verminderter Systemleistung. Dazu sind nur komplexe Systeme aufgrund ihrer Anpassungsfähigkeit in der Lage. Resilienz drückt sich durch das Betreten neuer Entwicklungspfade aus, obwohl die eigentlichen Belastungsgrenzen des Systems überstiegen werden. Die Komplexität von Systemen ist also eine notwendige Bedingung für Resilienz.
&
A priori ist unklar, welchen Effekt steigende Komplexität auf das Ausmaß der im System vorhandenen bzw. auftretenden Resilienz hat. Steigende Komplexität kann sowohl zu mehr als auch zu weniger Resilienz führen.

Der Zusammenhang zwischen Resilienz und Komplexität ist vielgestaltig, das haben die vorangegangenen Analysen eindrücklich gezeigt. So macht Komplexität Resilienz notwendig, gleichzeitig ist Komplexität aber auch notwendig für Resilienz. Im Hinblick auf Resilience Engineering ergeben sich daraus einige interessante Überlegungen. Steigende Komplexität erhöht die Notwendigkeit für Resilienz. Aber steigende Komplexität führt nicht notwendigerweise zu steigender oder sinkender Resilienz. Demnach kann ein Wirkprinzip, das innerhalb der Ingenieurwissenschaften immer wieder genannt wird, um die Resilienz von Systemen zu erhöhen, als ungeeignet für Resilience Engineering definiert werden. Nämlich das Prinzip der Reduktion von Komplexität. Reduzierte Komplexität führt in diesem Verständnis zu einer loseren und einfacher zu durchschauenden Kopplung des Systems. Störungen können weniger einfach im System kaskadieren und ihre Wirkungen sind besser vorauszusehen. Das alles spricht dafür, die Komplexität von Systemen zu reduzieren, um ihre Resilienz zu erhöhen. Die system- und komplexitätstheoretische Analyse hat aber gezeigt, dass der Wirkmechanismus zwischen Resilienz und Komplexität nicht derart linear verläuft. Zunehmende Komplexität ermöglicht Systemen auch, neue und geeignete Handlungsmuster für den Umgang mit unerwarteten Störungen zu entwickeln. Das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo liefert also hier keine eindeutigen Empfehlungen für Resilience Engineering, ob es sinnvoll wäre, die Komplexität der relevanten Systeme zu erhöhen oder aber zu reduzieren. Neben diesen grundsätzlichen, theoretischen Erwägungen, ist es an vielen Stellen für ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung auch schlicht nicht möglich, eine Komplexitätsreduktion als Lösung vorzuschlagen, da die zunehmende Komplexität und Vernetzung

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

eine Vielzahl wünschenswerter Konsequenzen aufweist und eine empirische Realität ist. Konträr zur Ansicht einiger Forscher gilt für Resilience Engineering basierend auf den theoretischen Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit:

> *Hypothese H14: Die Reduktion von Komplexität ist als Prinzip kein geeigneter Bestandteil von Resilience Engineering.*

Das Vorhandensein von Anpassungsfähigkeit ist eine zwingende Grundvoraussetzung für Resilienz. Aber Resilienz ist nicht gleichbedeutend mit Anpassungsfähigkeit. Resilienz ist auch nicht gleichbedeutend mit generischer Anpassungsfähigkeit.

Ohne Anpassungsfähigkeit keine Resilienz. Diese zentrale Erkenntnis der vorliegenden Arbeit ist auch für Resilience Engineering von größter Bedeutung. Anpassungsfähigkeit meint dabei mehr als eine Störungstoleranz im Rahmen vorgegebener Grenzen. Anpassungsfähigkeit, vor allem generische Anpassungsfähigkeit, meint das Vermögen, sich selbst zielgerichtet weiterzuentwickeln, wenn das bisherige Vorgehen nicht mehr dazu geeignet ist, das System und seine von ihm erbrachte Leistung aufrechtzuerhalten. Für den Bereich der Ingenieurwissenschaften formulieren Altherr et al. sehr treffend, worauf es bei der hier gemeinten Anpassungsfähigkeit als essentiellem Bestandteil von Resilienz ankommt: „[T]he next logical step is to design resilient structures that can even cope with failures of components or other effects *disregarded during design phase*" (Altherr et al. 2018: 187, eigene Hervorhebung). In den Ingenieurwissenschaften werden Systeme grundsätzlich so ausgelegt, dass sie mit einer bestimmten Menge und einem bestimmten Ausmaß an Störungen umgehen können. Welche das sein sollen ist im Normalfall kein Teil der ingenieurwissenschaftlichen Umsetzung, sondern wird in vorgelagerten Aushandlungsprozessen entweder sozial, finanziell, politisch und/oder technisch geklärt. Für die Ingenieurwissenschaften sind diese Designspezifikationen eine conditio sine qua non. Ohne Vorgaben darüber, wie das System ausgestaltet werden soll, welchen Belastungen es standzuhalten in der Lage sein soll und mit welchen Maßnahmen es auf Störungen reagieren soll, ist ein ingenieurwissenschaftliches Systemdesign quasi unmöglich. So lassen sich jedenfalls alle Gespräche zusammenfassen, die der Autor der vorliegenden Arbeit in den vergangenen ca. fünf Jahren mit Ingenieurwissenschaftlern zu diesem Thema geführt hat.

Das gezeichnete Bild entspricht wieder dem eines klassischen Risikomanagements. Das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo fordert aber mehr, es fordert Systeme, die nicht nur gegenüber spezifischen Bedrohungen

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

bestehen können, sondern im Prinzip „no matter what" – unabhängig davon, was konkret passiert (Altherr et al. 2018: 187). Und zwar unter der Nebenbedingung, dass die Ressourcen zur Umsetzung dieses Ziels erstens endlich sind und zweitens auch für konkurrierende Zwecke – etwa eine Maximierung der Systemleistungen dank größerer Effizienz – ausgegeben werden können (Fritzon et al. 2007: 38). Systeme mit der Form von Anpassungsfähigkeit auszustatten, die für Resilienz vonnöten ist, ist also eine voraussetzungsreiche und herausfordernde Aufgabe für Resilience Engineering. An dieser Stelle haben es andere Bereiche der Resilienzforschung „einfacher", etwa die Organisationswissenschaften. Denn deren primäres Interesse gilt Menschen und menschlichem Verhalten in komplexen Organisationen. Menschen verfügen per definitionem über generische Anpassungsfähigkeit und es bleibt dann „nur" noch die Frage, wie Organisationen ausgestaltet sein sollten, um die generische Anpassungsfähigkeit von Menschen zu aktivieren und zu unterstützen. Nichtsdestotrotz kann ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung im Sinne eines Resilience Engineering nur dann als konsistent mit dem Resilienz-Konzept der zivilen SiFo verstanden werden, wenn sie Wege erforscht und entwickelt, um die generische Anpassungsfähigkeit komplexer adaptiver Systeme auf technologische Weise zu erhöhen. Dazu lassen sich in einer Kombination aus Erkenntnissen aus der Literatur und der system- und komplexitätstheoretischen Analyse einige Prinzipien sowie geeignete Methoden identifizieren, mit deren Hilfe das gelingen kann. Diese werden im nächsten Unterkapitel eingehender beleuchtet. Generell lässt sich für Resilience Engineering aber schon an dieser Stelle festhalten:

> *Hypothese H15: Resilience Engineering besteht in der Erforschung und Entwicklung von Prinzipien, welche die generische Anpassungsfähigkeit komplexer adaptiver Systeme auf technologische Weise zu erhöhen vermögen.*

Transformationsfähigkeit ist kein notwendiger Bestandteil von Resilienz. Allerdings erhöht das Vorhandensein von Transformationsfähigkeit – verstanden als besonders ausgeprägte Form generischer Anpassungsfähigkeit – ceteris paribus die Resilienz komplexer adaptiver Systeme.

Der Begriff der Transformationsfähigkeit ist vor allen Dingen in der sozial-ökologischen Resilienzforschung verbreitet. Forscher wie Brian Walker erkennen in der Transformation hin zu einem quasi neuen System das eigentliche Charakteristikum von Resilienz. Dem folgt die vorliegende Arbeit nicht in diesem Ausmaß. Hier wird Transformationsfähigkeit als Ende eines Kontinuums gesehen. So formalisiert ergibt sich aus der Tatsache,

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

dass Transformationsfähigkeit nicht notwendig, aber gut für Resilienz ist, keine gesonderte Hypothese für Resilience Engineering.

Je flexibler komplexe adaptive Systeme sind, desto größer ist ihre Resilienz.

Flexibilität wurde im Rahmen des Resilienz-Konzepts der vorliegenden Arbeit definiert als das Vorhandensein eigentlich extrem unerwartbarer Prozesse an Anschlussmöglichkeiten, die dem System das Einschwenken auf einen neuen, leistungserhaltenden Entwicklungspfad ermöglichen. Damit ist Flexibilität ein Teil der generischen Anpassungsfähigkeit, die mithilfe von Resilience Engineering auf technologische Weise erhöht werden soll. Flexibilität ist demzufolge kein eigenes, von den im folgenden Unterkapitel beschriebenen unterscheidbares Prinzip zur Umsetzung und Erhöhung von generischer Anpassungsfähigkeit. Je höher die Flexibilität eines Systems, desto größer ist ihre Resilienz, das gilt weiterhin. Da Flexibilität ein Teil von generischer Anpassungsfähigkeit ist, leiten sich an dieser Stelle aber keine weiteren, neuen Hypothesen für Resilience Engineering ab.

Lernfähigkeit ist eine notwendige Grundvoraussetzung für Resilienz.

So wie Flexibilität wird auch Lernfähigkeit im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Teil von Anpassungsfähigkeit verstanden. Im Gegensatz zur gerade erfolgten Diskussion lassen sich aber in Bezug auf Lernfähigkeit und mehr oder weniger verwandte Ideen einige Hypothesen für Resilience Engineering entwickeln. Lernfähigkeit besteht darin, Wissen über die wahrscheinlichen Auswirkungen der Realisierung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Prozesse an Anschlussmöglichkeiten erlangen zu können. Aufgrund der inhärenten Unsicherheit in komplexen adaptiven Systemen kann es dabei nicht um determiniertes Wissen gehen, so dass die gerade genannte Wahrscheinlichkeit nicht in Form probabilistisch fixierter Aussagen erfasst werden kann. Es sollte aber näherungsweise möglich sein, bei klar gesteckten Systemgrenzen und unter Zuhilfenahme geeigneter Methoden ein Verständnis davon zu gewinnen, wie sich das Ergreifen bestimmter Maßnahmen auf das untersuchte System auswirkt. Dazu kann erneut auf die Theorie komplexer adaptiver Systeme zurückgegriffen werden. Die vorliegende Arbeit schlägt vor, diese Theorie unter anderem dazu zu nutzen, Schwellenwerte oder Umkipp-Punkte zu identifizieren. Damit kann verhindert werden, dass Systeme zu nahe an diesen Schwellen operieren, bei deren Überschreiten ein abrupter und gravierender Schaden auftritt. In der Komplexitätstheorie geht es aber auch um sogenannte Hebelpunkte, an denen kleine, zielgerichtete Handlungen zu gravierenden aber vorhersagbaren Veränderungen im Systemverhalten führen. Beim Über-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

schreiten von Schwellenwerten ist das folgende Systemverhalten hingegen zumeist unvorhersagbar. Hebelpunkte unterscheiden sich also von Schwellenwerten und Umkipp-Punkten durch die weitgehende Vorhersagbarkeit ihrer Auswirkungen. Ihre Lokalisierung ist dagegen ebenso unsicher und voraussetzungsreich, wie die von Schwellenwerten und Umkipp-Punkten. Um die Resilienz von Systemen auf ingenieurwissenschaftliche Weise zu erhöhen, könnte die Identifikation von Hebelpunkten aber durchaus sehr interessant sein. Denn wenn mithilfe kleiner, zielgerichteter Veränderungen am System, gravierende und gleichzeitig vorhersagbare Auswirkungen verbunden sind, könnte nach den Hebelpunkten gesucht werden, die sozusagen „positive Kaskadeneffekte" auslösen (IRGC 2018: 56). Hebelpunkte, durch deren Realisierung das System profitieren könnte und die seine Resilienz erhöhen würden, weil sie generisch im gesamten System wirksam werden, obwohl sie lediglich an einer Stelle ausgelöst wurden. Das ist auch aus Sicht eines möglichst effizienten Einsatzes von Ressourcen ein lohnenswertes Ziel. Und es entspricht system- und komplexitätstheoretisch gesprochen der Erhöhung bzw. der Ausnutzung der Lernfähigkeit von Systemen. Das führt für Resilience Engineering zu einer weiteren Hypothese:

> *Hypothese H16: Die Theorie komplexer adaptiver Systeme und die daraus entwickelten mathematischen Modelle und Methoden können als Teil von Resilience Engineering genutzt werden, um Hebelpunkte zu identifizieren und durch deren Anwendung positive Kaskadeneffekte zu realisieren.*

Etwas weniger zentral mit Lernfähigkeit verknüpft, aber doch an dieser Stelle der Diskussion zu Resilience Engineering verortbar, ist die Frage danach, ob und wie es möglich sein kann, Frühwarnsignale zu identifizieren, die zuverlässig das Auftreten eines disruptiven Ereignisses vorherzusagen in der Lage sind. Ohne jede Vorwarnung sind unvorhergesehene Situationen noch schwerer zu beherrschen, als wenn zumindest eine kurze Zeit des Einstellens und Vorbereitens bleibt (Dinh et al. 2012: 235f). Das ist konsistent mit dem Resilienz-Konzept der zivilen SiFo, da die interessierenden disruptiven Ereignisse nach wie vor grundsätzlich unerwartet eintreten, aber zumeist nicht innerhalb von Sekunden, so dass unter Umständen eine Vorwarnzeit bleibt. Frühwarnsignale sind häufig nur schwach ausgeprägt und daher schwer zu identifizieren (Amanatidou et al. 2012: 209). Frühwarnung kann unterschiedlich verstanden werden. Erdbeben lassen sich beispielsweise nicht langfristig vorhersagen. Es gibt zwar Regionen, in denen die Gefahr für das Auftreten von Erdbeben besonders hoch ist. Wann ein solches aber eintritt, ist Stand heute nicht prognostizierbar. Nichtsdestotrotz gibt es etwa in Japan, einem der Länder mit der größten

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Erfahrung mit Erdbeben, Frühwarnsysteme, die bei den ersten Anzeichen eines schwereren Erdbebens aktiv werden. Ein beeindruckendes Beispiel liefert das Tōhoku-Erdbeben von 2011, das in Deutschland überwiegend mit der Nuklearkatastrophe von Fukushima verbunden wird, das aber in Japan sehr viel stärker mit dem stärksten Erdbeben der Geschichte und dem davon ausgelösten Tsunami verknüpft ist, der über 20.000 Menschen das Leben kostete. Im Rahmen dieses disruptiven Ereignisses mit schlimmstdenkbaren, katastrophalen Auswirkungen, gab es aber auch so etwas wie „Erfolgsgeschichten." In Japan gibt es mit dem Shinkansen ein Hochgeschwindigkeitszugsystem, das im Hinblick auf seine Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit sehr hohe Leistungsstandards erfüllt. Selbiges gilt für die Sicherheit. Bedingt durch Vorerfahrungen mit Erdbeben wurde für den Shinkansen ein automatisches Frühwarnsystem eingerichtet, das bei den ersten Vorbeben, die einem großen Beben in der Regel vorausgehen, automatisch auslöst und auswertet, ob ein größeres Beben zu erwarten ist. Falls ja, wird in den betroffenen Gebieten automatisch die Stromversorgung der Züge gekappt und diese vollführen eine Notbremsung. So ist es 2011 gelungen, alle Züge innerhalb einer guten Minute nach den ersten Warnzeichen zu stoppen und so Schäden oder gar Todesopfer zu vermeiden (Janić 2018: 1118).

Diese spezifische Art von Frühwarnsystem kann selbstverständlich nicht als Resilience Engineering verstanden werden. Sie stellt vielmehr ein beeindruckendes Beispiel gelungenen Risikomanagements dar. Das Beispiel zeigt aber auf, wie hilfreich und zum Teil tatsächlich lebensrettend Frühwarnsysteme sein können. Die Identifikation von Schwellenwerten und Umkipp-Punkten stellt selbst eine Art Frühwarnsystem dar. Resilience Engineering kann demnach aus dieser Richtung bereits signifikant beitragen. Darüber hinaus ist es bei vielen disruptiven Ereignissen, die innerhalb der zivilen SiFo besonders relevant sind, eher schwierig, generische Frühwarnsysteme zu implementieren. Systeme zur Warnung vor Hochwassern, Extremwetter, Waldbränden oder ähnlichem wirken spezifisch und sind etabliert. Für Frühwarnsysteme im Bereich schwerwiegender Industrieunfälle gilt technisch gesprochen ähnliches. Auch dort gibt es eine Fülle an zur Verfügung stehender Sensorik, um den Systemzustand zu überwachen und kritische Abweichungen frühzeitig zu erkennen. Hier mangelt es eher an einem Verständnis der eigentlichen Ursachen von Systemversagen, wie sie von der organisationswissenschaftlichen Resilienzforschung untersucht werden (siehe 2.5). Damit bleibt der Bereich bewusst herbeigeführter disruptiver Ereignisse, in der zivilen SiFo häufig mit Terrorismus identifiziert. Hier arbeiten Geheimdienste und Polizeibehörden weltweit

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

daran, mithilfe von Überwachungstechnologien Anschlagspläne im Vorhinein zu identifizieren und Anschläge so zu verhindern. Gegeben die Grundannahmen des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo ist dies allerdings kein Teil von Resilience Engineering. Über die Effektivität und die Rechtfertigung solcher Überwachungsmaßnahmen kann an dieser Stelle nicht entschieden werden. Sie sind Gegenstand vielfältiger gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Debatten. Für Resilience Engineering kann festgehalten werden:

> *Hypothese H17: Die Entwicklung spezifischer Frühwarnsysteme ist kein Teil von Resilience Engineering.*

Innerhalb der organisationswissenschaftlichen Resilienzforschung gibt es den Ansatz der generischen Kompetenzen, die Menschen dabei helfen, unerwartete und kritische Situationen erfolgreich meistern zu können (siehe Bergström et al. 2009). Eine Möglichkeit, sich generische Kompetenzen anzueignen, ist das möglichst realitätsnahe Einüben unbekannter Situationen, idealerweise unangekündigt und im Rahmen der normalen Arbeit. Die Experimente, die Bergström et al. durchgeführt haben, bieten bereits einen Hinweis darauf, wie so etwas aussehen kann. Diejenigen, die an diesen Experimenten teilgenommen haben, konnten für ihre praktische Arbeit daraus Erkenntnisse gewinnen und sich selbst allein durch die Teilnahme am Experiment und die zwischengeschalteten Schulungen ein Stück weit generische Kompetenzen aneignen (Bergström et al. 2009: 89). Noch effektiver als im künstlichen Umfeld eines Experiments wirken solche Übungen aber im Kontext der alltäglichen Arbeit. Hier muss zunächst zwischen der Art der Arbeit unterschieden werden. Nicht jeder Arbeitnehmer ist in einem kritischen Bereich tätig. Genauer gesagt gibt es Millionen Arbeitnehmer, bei denen dies nicht der Fall ist. Auf der anderen Seite gibt es aber auch eine Vielzahl an Menschen, die in kritischen Bereichen beschäftigt sind, beispielsweise im Betrieb kritischer Infrastrukturen. Deren generische Kompetenzen zu erhöhen, wäre ein direkter Weg, um die Resilienz der betroffenen Systeme zu erhöhen. Das ist keine primär technische Aufgabe. Resilience Engineering kann aber dazu beitragen, wie ein genauerer Blick auf die gerade beschriebene Art von Übungen zeigt.

Als Vorbild können hier große amerikanische Internetkonzerne wie Google und Amazon dienen. Dort wurde vor einigen Jahren das Konzept der sogenannten „GameDays“ eingeführt. Gegeben die auf einer Kombination von Soft- und Hardware basierende Infrastruktur dieser Konzerne ist es möglich, bewusst gravierende Störungen in einen Teil des Systems einzubauen – natürlich unter Sicherstellung der Aufrechterhaltung des

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

normalen Alltagsbetriebs – um zu prüfen, wie die verantwortlichen Personen darauf reagieren (Robbins et al. 2012). Die Grundannahme hinter den GameDays ist dieselbe, die auch hinter Resilienz steckt. Fehler und Störungen lassen sich nicht komplett verhindern und deshalb ist es notwendig, auf alle denkbaren und undenkbaren Arten von disruptiven Ereignissen vorbereitet zu sein. Und das ist nicht möglich, indem rein theoretische Notfallpläne geschrieben werden: „The most important of those lessons is that an untested disaster recovery plan isn't really a plan at all" (Robbins et al. 2012). Deshalb bieten GameDays die Möglichkeit, Notfallpläne zu testen. Sie setzen Mitarbeiter einer unbekannten Stresssituation aus, mit der sie umgehen müssen. Denn die GameDays werden nur grundsätzlich angekündigt, nicht aber spezifisch, so dass die Mitarbeiter zunächst von einem echten Notfall ausgehen müssen. Diese Realitätsnähe ist in IT-Netzen einfacher zu simulieren, als beispielsweise für Rettungskräfte oder Katastrophenschützer. Aber auch ohne eine hundertprozentige Realitätsnähe setzen GameDays die handelnden Personen unter Druck und ermöglichen es ihnen, ihr eigenes Verhalten in solchen Fällen kennenzulernen und zu verbessern. Resilience Engineering lässt sich nun in zweierlei Hinsicht mit der Idee der GameDays verknüpfen. Zum einen fördern sie „special systems" und „backdoor boxes" zu Tage, welche von den Verantwortlichen in außergewöhnlichen Notfällen besonders intensiv genutzt werden (Robbins et al. 2012). Wenn diese bekannt sind, können sie mittels Resilience Engineering noch besser gestaltet werden. Zum anderen kann Resilience Engineering direkt dazu beitragen, GameDays zu ermöglichen, indem innovative Methoden zur Modellierung und Simulation des Verhaltens komplexer adaptiver Systeme in unerwarteten Ausnahmefällen weiterentwickelt werden. Daraus ergeben sich folgende Hypothesen:

Hypothese H18: Mithilfe realitätsnaher Notfallübungen können Systembestandteile identifiziert werden, die mittels Resilience Engineering optimiert werden sollten.

Hypothese H19: Durch die Verwendung realitätsnaher Modelle zur Simulation des Verhaltens komplexer adaptiver Systeme im Ausnahmefall in Notfallübungen kann Resilience Engineering dazu beitragen, die generischen Kompetenzen der handelnden Personen zu erhöhen und so die Resilienz des Gesamtsystems zu steigern.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

6.5. Resilience Engineering aus system- und komplexitätstheoretischer Sicht

Resilienz liegt dann vor, wenn ein System auf einen sehr unwahrscheinlichen Reiz (bzw. Ereignis) aus der Umwelt oder seinem Inneren, der das System initial auf einen Entwicklungspfad mit stark verminderter Systemleistung bringt, mit der Realisierung eines Prozesses eigentlich extrem unerwartbarer Anschlussmöglichkeiten reagiert, um anschließend auf einen so realisierbar gewordenen, neuen Entwicklungspfad erwartbarer Anschlussmöglichkeiten einzuschwenken, der sich durch eine (mindestens) vergleichbare Systemleistung auszeichnet, wie sie vor Eintritt des Ereignisses vorlag.

Dieser zentrale Bestandteil des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo war ein Ergebnis der system- und komplexitätstheoretischen Analyse, das es in dieser expliziten Form so vorher innerhalb der Resilienzforschung nicht gab. Was das vermittelt über generische Anpassungsfähigkeit für konkrete Prinzipien bedeutet, mit deren Hilfe sich Resilience Engineering betreiben lässt, bzw. die einen Teil von Resilience Engineering darstellen, wird im nächsten Schritt diskutiert. Zunächst soll noch eine Hypothese erörtert werden, die sich aus der Betonung der Systemleistung in obenstehender Aussage ableiten lässt. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auch und vor allem auf die Frage danach, wie kritische Infrastruktursysteme möglichst resilient gestaltet werden können, indem Prinzipien im Sinne von Resilience Engineering Verwendung finden (Hickford et al. 2018: 278). Als kritisch wurden die Infrastrukturen vor allem deshalb bezeichnet, weil sie eine für die Überlebensfähigkeit der Gesellschaft kritische Funktion erfüllen und die Gesellschaft, sobald eine solche Infrastruktur ausfällt, mit erheblichen Schäden zu rechnen hat (siehe 1.3).

Mit Blick auf das Gesamtsystem Gesellschaft erfüllen deren kritische Infrastrukturen kritische Funktionen – was sich aus dem Begriff bereits ergibt, aber trotzdem für die weitere Argumentation wichtig ist (Fox-Lent et al. 2015: 211). Denn sobald die Systemgrenzen etwas eingeschränkt werden und beispielsweise die Energieinfrastruktur als System verstanden wird, ändert sich die Bedeutung des Begriffs der kritischen Funktionen bzw. kritischen Funktionalitäten etwas. Die kritische Funktionalität des Energiesystems ist die Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen für die Bevölkerung. Mithilfe welcher konkreten Systemstruktur das erfolgt, ist a priori zweitrangig. Wichtig ist dagegen die Versorgungssicherheit unter allen Umständen – oder zumindest unter so vielen Umständen, wie es irgend möglich ist (Flynn/Burke 2011: 4, Wachsmuth 2014: 4). Kritische Funktionalitäten trotz gravierender disruptiver Ereignisse zu erhalten, ist ein Kerninhalt von Resilienz. Programmatisch formuliert ließe sich

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

bei einem systemischen Resilienz-Verständnis wie dem der vorliegenden Arbeit sagen: „What matters is *preserving and even enhancing critical functionality*, not the pre-existing system" (LRF 2015: 10, eigene Hervorhebung). Nach dem Eintreten einer Störung ist es zudem besonders wichtig, die kritischen Funktionalitäten zu kennen, da diese zunächst wiederhergestellt werden müssen (IRGC 2018: 49). Was heißt das für Resilience Engineering? Einen wichtigen Schritt stellte zunächst die Definition von Systemgrenzen dar, um überhaupt bestimmen zu können, wessen Resilienz mithilfe von ingenieurwissenschaftlichen Maßnahmen erhöht werden soll. Nachdem die Systemgrenzen feststehen, wird direkt im nächsten Schritt die Identifikation der kritischen Funktionalitäten des Systems wichtig. Aufgrund des systemischen Resilienz-Verständnisses der vorliegenden Arbeit, besteht Resilienz in einer Anpassung des Systems an gravierende disruptive Ereignisse. Die Anpassung kann auch mit einer Veränderung der Systemstrukturen einhergehen. Sie zielt auf den Erhalt der Systemleistung, oder nach der Diskussion nun anders gesagt, auf den Erhalt der kritischen Funktionalitäten (Connelly et al. 2017: 47, Ganin et al. 2016: 1, LRF 2015: 11). Das setzt voraus, dass die Ingenieurwissenschaften eine Idee davon haben, worin diese kritischen Funktionalitäten bestehen. Für Resilience Engineering lässt sich dann folgende Hypothese aufstellen:

> *Hypothese H20: Nachdem die Systemgrenzen definiert wurden, bedeutet Resilience Engineering im nächsten Schritt, die kritischen Funktionalitäten der untersuchten Systeme zu identifizieren.*

Nicht in jedem Fall lassen sich kritische Funktionalitäten voll aufrechterhalten. Einige disruptive Ereignisse nehmen Ausmaße an, die das System nicht ohne Schaden überstehen kann. Jedenfalls können mindestens rein theoretisch katastrophale Ereignisse eintreten. Aber auch in solchen Fällen bietet Resilienz bzw. Resilience Engineering Möglichkeiten, dem System und den von den kritischen Funktionalitäten des Systems abhängigen Menschen zu helfen. Entscheidend ist hier die Art der leistungsreduzierenden Reaktion des Systems. Um die Idee zu verdeutlichen, wird vereinfachend angenommen, dass sich die Leistungsreduktion über die Zeit mittels einer einfachen Funktion darstellen lässt, äquivalent zu Bruneaus Ideen (siehe 2.6). Dann lassen sich unterschiedliche Formen dieser Funktion voneinander abgrenzen.

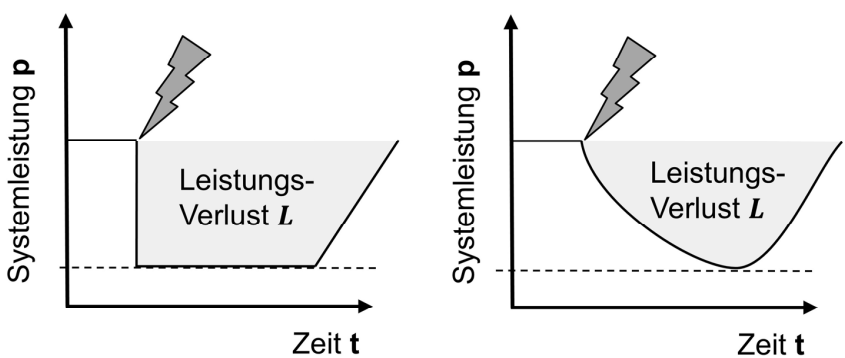
In Abbildung 5 ist auf der linken Seite ein System dargestellt, dessen Fähigkeit zur Erfüllung kritischer Funktionalitäten nach Eintreten eines widrigen Ereignisses abrupt massiv abnimmt. Im Gegensatz dazu wird auf der rechten Seite ein System dargestellt, in dem die Leistung zwar

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ebenfalls bis zum gleichen Niveau abnimmt, dies aber sehr viel weniger steil, also sehr viel weniger schnell. Unter sonst gleichen Bedingungen und unter bewusster Inkaufnahme der Verkürzung der eigentlichen Komplexität an dieser Stelle – der Erholungspfad des Systems wird nicht berücksichtigt – zeigt das rechte System eine deutlich resilientere Reaktion auf das disruptive Ereignis, als das linke (siehe Abbildung 5). Dieses Phänomen wird in der Resilienzforschung als „elegantes Abschmelzen" (graceful degradation) bezeichnet (Dueñas-Osorio/Vemuru 2009: 166, Goerger et al. 2014: 868, Rahimi/Madni 2014: 811). Bereits Lovins und Lovins haben, wenn auch unter dem Begriff der Stabilität, ein elegantes Abschmelzen als sehr relevant für Resilienz erkannt. Damit erkaufen sich das betroffene System und die handelnden Personen sozusagen Zeit, um mit der Umsetzung von Gegenmaßnahmen zu beginnen. Bzw. Zeit, damit bereits implementierte Prinzipien zur Gegensteuerung, zur Wiederherstellung der kritischen Funktionalitäten, greifen können, bevor es zu einem Totalzusammenbruch des Systems kommt (Lovins/Lovins 2001: 248). Die Sicherstellung eines möglichst eleganten Abschmelzens sollte demzufolge ein essentielles Ziel für Resilience Engineering sein. Daraus ergibt sich dann:

> *Hypothese H21: Ein Design, das Systemen ein elegantes Abschmelzen kritischer Funktionalitäten ermöglicht, trägt zur Resilienz von Systemen bei und sollte insofern Ziel ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung sein.*

Abbildung 5: Abrupt vs. graceful degradation



Quelle: eigene Darstellung.

In komplexen adaptiven Systemen muss zwischen spezialisierter und generischer Anpassungsfähigkeit unterschieden werden. Die Resilienz eines komplexen ad-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

aptiven Systems nimmt bei steigender Komplexität genau dann zu, wenn die generische Anpassungsfähigkeit des Systems steigt.
&
Resilienz zeigt sich in der Fähigkeit komplexer adaptiver Systeme, mittels generischer Anpassungsfähigkeit extrem unwahrscheinliche oder unerwartete, ihre eigentlichen Belastungsgrenzen übersteigende Ereignisse so zu bewältigen, dass sie ihre Systemleistung möglichst aufrechterhalten und langfristig sichern können.

Generische Anpassungsfähigkeit ist neben Komplexität und Unsicherheit der zentrale Begriff des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo. Vor allem die Unterscheidung zwischen spezialisierter und generischer Anpassungsfähigkeit stellt eine theoretische Spezifizierung von Resilienz dar, wie es sie für die zivile SiFo bisher nicht gab. Insofern erscheint es auch notwendig und sinnvoll, einen Fokus der Hypothesen für Resilience Engineering darauf zu legen, wie generische Anpassungsfähigkeit ingenieurwissenschaftlich umgesetzt werden könnte. Es geht um die Beantwortung der Frage, wie komplexe adaptive Systeme so gestaltet werden können, dass ihre generische Anpassungsfähigkeit möglichst groß ist. Es geht um generische Designprinzipien, die sich aus der system- und komplexitätstheoretischen Analyse ableiten lassen und die gleichzeitig auch konsistent mit einigen Ideen aus der Literatur sind (Altherr et al. 2018: 193). Ein einfaches aber eindringliches Beispiel für die Umsetzung solcher Prinzipien liefern Park et al.: „It is not necessary to predict all potential causes of a ship sinking in order to provide life boats“ (Park et al. 2013: 363). In einem ähnlichen Sinne werden beispielsweise auch militärische Systeme ausgelegt, die aufgrund ihrer häufig langen Lebensdauer mit dem Auftauchen neuer Technologien genauso zurechtkommen müssen, wie mit sich verändernden Anforderungen, neuen Einsatzumgebungen und dem Vorhandensein eines „adaptive foe“, eines selbst anpassungsfähigen Widersachers. Ein zu generischer Anpassungsfähigkeit ähnlicher Begriff, unter den diese Anforderungen zusammengefasst werden, ist der der „broad utility“ (Goerger et al. 2014: 867, 871). Systeme, die über diese broad utility verfügen, müssen letztlich den gleichen Designprinzipien folgen, wie Systeme, deren Resilienz maximiert werden soll. Diese Designprinzipien, sowie einige zugehörige Aspekte, werden im Folgenden näher beleuchtet. Die Reihenfolge der Beschreibung ist dabei nicht mit der Bedeutung der Prinzipien gleichzusetzen, da die besonders wichtigen Punkte Diversität und Redundanz erst weiter hinten kommen – bedingt durch die Tatsache, dass diese bereits Bestandteil des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo waren und daher in eigenen Aussagen spezifiziert wurden.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Das erste Prinzip ist das der *Modularität*. Schon Lovins und Lovins nennen den modularen Aufbau von Systemen als eine Möglichkeit, seine Resilienz zu erhöhen. Seitdem hat sich dieses Systemprinzip etabliert und gilt als erfolgsversprechend dafür, resilienzfördernd zu sein, in dem es zum Management von Komplexität beiträgt (Helbing 2015, Lovins/Lovins 2001: 192, Lukesch 2016: 325). Modularität bezieht sich grundsätzlich „auf die Möglichkeit der Herauslösung einzelner Bestandteile aus einer Gesamtmenge" (Wink 2011: 115). Innerhalb eines komplexen adaptiven Systems bestehen Module aus Komponenten, die sehr eng miteinander vernetzt sind, aber eine weniger starke Vernetzung mit Systemkomponenten außerhalb des Moduls aufweisen. Auf diese Weise lassen sich Störungen und Fehler, die einen bestimmten Bereich des Systems treffen, besser isolieren. Sobald sie auftreten, werden vom System – oder seinem Operator – die Verbindungen zwischen dem betroffenen Modul und dem restlichen System gekappt. Das wird als „islanding" bezeichnet. Wenn das Modul rechtzeitig vom restlichen System getrennt wird, kann sich die dort aufgetretene Störung nicht weiter im System verbreiten. So werden Kaskadeneffekte verhindert (Ash/Newth 2007: 677, 681, Dueñas-Osorio/Vemuru 2009: 165). Voraussetzung dafür ist allerdings, dass das System auch ohne einzelne Module – und im Vorhinein ist unsicher, welche der Systemmodule ausfallen – weiter in der Lage ist, seine kritischen Funktionalitäten aufrechtzuerhalten. Das führt zu einigen Überlegungen, die aus der System- und Komplexitätstheorie resultieren und die für das Prinzip der Modularität im Kontext der vorliegenden Arbeit wichtig sind. Komplexitätstheoretisch gesprochen bestehen Module in komplexen adaptiven Systemen aus einer Reihe von Agenten, die zur Erreichung ihrer Ziele eng miteinander kooperieren. Innerhalb des Moduls tendieren die Agenten dazu, sich stark zu spezialisieren und auf die zuverlässige Kooperation mit den anderen Agenten angewiesen zu sein. Nur so können die Agenten gemeinsam ihre Ziele erreichen – nur so kann das Modul seine Funktion innerhalb des Systems erbringen. Das führt zum einen dazu, dass Module ein Stück weit für sich selbst zu funktionieren imstande sind. Selbst ohne die vollumfängliche Einbettung in das Gesamtsystem sind sie in der Lage, eine gewisse Funktionalität zu erreichen. Zum anderen führt das aber auch dazu, dass das restliche System ein Stück weit in der Lage ist, ohne das entsprechende Modul zu funktionieren. Und da das Modul nicht spezifiziert wurde, gilt das für alle Module. Hintergrund dessen ist der geringere Grad an Feedback, der zwischen Modulen herrscht im Vergleich zum Ausmaß des Feedbacks innerhalb der Module. Damit wird auch deutlich, warum eine derart verstandene Modularität zu Systemen führt, die keinen „single point of

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

failure“ aufweisen. Ein single point of failure ist eine besonders kritische, wichtige Komponente eines Systems, deren Ausfall notwendigerweise zum Ausfall des gesamten Systems führt. Besteht ein System aber aus einer Vielzahl nur relativ lose gekoppelter Module, führt das Versagen einzelner Komponenten nur zum Ausfall einzelner Module, nicht aber des gesamten Systems. Die Agenten sind zur Erreichung ihrer Ziele nicht auf Agenten außerhalb des Moduls angewiesen. Und zwar ganz unabhängig davon, welches Modul des Systems aus welchem Grund ausfällt – Modularität ist daher ein generisch wirkender Mechanismus. Wenn einzelne Module ausfallen, kann das System die noch funktionsfähigen Module dazu nutzen, seine Leistung weiter zu erbringen. Die grundsätzliche Wirksamkeit des Prinzips wird also nicht nur in der Literatur behauptet – und ist unmittelbar einsichtig – sondern wurde auch system- und komplexitätstheoretisch erläutert. Demnach besteht Resilience Engineering unter anderem darin, komplexe adaptive Systeme möglichst modular zu gestalten. Die zugehörige Hypothese lautet dann:

> *Hypothese H22: Modularität, verstanden als Aufteilung eines Systems in funktional eigenständige Einheiten, bestehend aus einer Reihe stark miteinander vernetzter Agenten, die nur lose Kopplungen mit den anderen Einheiten des Systems aufweisen, ist ein geeignetes Designprinzip, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.*

Das zweite Prinzip ist das der *Dezentralität*. Ähnlich wie das Modularitätsprinzip wird auch Dezentralität in der Literatur immer wieder als Möglichkeit genannt, die Resilienz eines Systems zu erhöhen. Dabei ist Dezentralität inhaltlich und logisch teilweise mit Modularität verknüpft. Systeme lassen sich generell entweder eher zentralisiert oder eher dezentralisiert organisieren. Klassische Beispiele sehr stark zentralisierter Systeme stellten die planwirtschaftlichen Ökonomien der ehemaligen kommunistischen Staaten dar. Sinnigerweise sind kapitalistisch organisierte Wirtschaftssysteme hingegen sehr viel stärker dezentralisiert ausgestaltet. Volkswirtschaften sind beliebig komplexe Systeme, die sich einfachen Kausalitäten völlig entziehen. Der Gedanke einer zielgerichteten, deterministischen Planbarkeit ist daher, wenn man der Komplexitätstheorie folgt, als geradezu absurd zu verwerfen (siehe 4.3.2). Das gilt auch innerhalb marktwirtschaftlich organisierter Wirtschaftssysteme, wie die Ideen und Ansätze von Chandler zur Frage, ob Resilienz ein neoliberales Paradigma sein kann, gezeigt haben. Obwohl in seiner wissenschaftlichen Ausrichtung rein sozialwissenschaftlich, arbeitet Chandler doch mit den gleichen komplexitätstheoretischen Annahmen, die auch dem Resilienz-Konzept der vorliegen-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

den Arbeit und somit den Hypothesen für Resilience Engineering zugrunde liegen (siehe 4.2.1). Der Fokus von Chandler lag auf der Frage nach der Steuerbarkeit komplexer adaptiver Systeme. Aufgrund ihrer Komplexität, aufgrund der in komplexen Systemen vorherrschenden Eigenschaft der Emergenz, ging er von einer grundsätzlichen Un-Steuerbarkeit derartiger Systeme aus. Die an dieser Stelle untersuchten Systemprinzipien der Zentralität bzw. Dezentralität haben einen anderen Ausgangspunkt. In ihnen geht es sehr viel stärker um die Frage, ob es zentrale Systembestandteile gibt, von denen das gesamte übrige System abhängt. Hier wiederum wäre ein klassisches Beispiel ein Energieversorgungssystem, das einzig auf wenigen, mit Kohle und anderen fossilen Energieträgern befeuerten Großkraftwerken beruht. Von diesen zentralen Elementen aus werden Strom, Wärme und Treibstoffe mithilfe von Leitungen, Pipelines und sonstigen Transportmitteln an die Empfänger – Privathaushalte, Industrie, Tankstellen, etc. – verteilt. Fällt am Ende dieser Kette ein Systemelement – etwa eine Tankstelle – aus, hat das auf das Gesamtsystem keinen messbaren Einfluss. Wenn aber eines der zentralen Elemente, wie etwa ein Großkraftwerk, ausfällt, kann das im gesamten System zu spürbaren Leistungseinbußen führen. Selbstverständlich könnten solche Einbußen durch andere Designprinzipien, etwa das der Redundanz, vermieden werden. Allerdings sind derart zentrale Systemelemente wie Großkraftwerke mit immensen Kosten verbunden, sie binden eine sehr große Menge an Ressourcen. Diese redundant vorzuhalten, schmälert die Effizienz des Systems sehr stark. Und je größer die Kosten für Resilienz, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit für ihre Umsetzung. Eine sehr umfassende und ausführliche Beschreibung eines derart zentralisiert organisierten Energieversorgungssystems findet sich bei Lovins und Lovins. Ihrem Urteil zufolge sind zentralisierte Systeme inhärent verwundbar, sie sind „brittle“, was sich mit spröde, brüchig und zerbrechlich, aber auch mit morsch übersetzen lässt (siehe Lovins/Lovins 2001).

Gleichzeitig haben zentralisierte Systeme auch große Vorteile. Einer Studie der European Network and Information Security Agency zufolge zeichnen sie sich durch eine sehr hohe Zuverlässigkeit und sehr hohe Verfügbarkeit aus – was für Energieversorgungssysteme fundamental wichtige Eigenschaften sind (ENISA 2011: 24). Eine geographische Zentralisierung, also die Unterbringung vieler wichtiger Systemkomponenten an einem Ort, ergibt zudem marktwirtschaftlich und aus Effizienzgründen Sinn (Flynn/Burke 2012: 12). Allerdings sehen auch die Autoren der gerade genannten Studie die Gefahr für ein katastrophales Versagen zentralisierter Systeme, wenn es eine Störung im Bereich der wenigen, zentralen Kompo-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

nenten gibt. Demgegenüber seien dezentralisierte Systeme, die sie als „horizontal skaliert" (scaled horizontally) bezeichnen, technisch zwar komplexer, dafür aber insgesamt resilienter, da das Versagen einzelner Komponenten nicht direkt zu katastrophalen Schäden führt (ENISA 2011: 24). Das sehen auch Flynn und Burke so, die von einem „security and resilience benefit" sprechen, wenn wichtige Systemelemente nicht geographisch zentriert werden. Mit Blick auf zwei Arten von widrigen Ereignissen, gezielte Attacken einerseits und lokal auftretende Extremwetterereignisse andererseits, wird der Vorteil eines nicht nur logisch, sondern auch geographisch dezentralisierten Netzes ebenfalls offensichtlich (Allenby/Fink 2005: 1035, Flynn/Burke 2012: 12). Ähnlich wie modulare Netze, vermeiden auch dezentralisiert organisierte Netze das Entstehen eines single point of failure. Dezentral bedeutet nicht notwendigerweise in Modulen organisiert. Es geht lediglich darum, dass die Bedeutung einzelner Komponenten für ein System nicht zu groß werden sollte (Jackson/Ferris 2013: 6). System- und komplexitätstheoretisch lässt sich das ebenfalls fassen. In zentralisierten Systemen gibt es einzelne, hochspezialisierte Agenten, deren Leistung für das Gesamtsystem kritisch ist. Ohne diese Agenten kann das System nicht funktionieren. Sobald sie ausfallen, bricht das gesamte System zusammen und kann seine kritischen Funktionalitäten nicht mehr erfüllen. Da sich in komplexen adaptiven Systemen aufgrund des Faktors Unsicherheit nicht sicher ausschließen lässt, dass gerade diese hochspezialisierten und hochkritischen Agenten versagen, ergibt es mehr Sinn, Systeme dezentralisiert zu organisieren. Das entspricht einer Verteilung der Aufgaben des vormals hochspezialisierten Agenten auf mehrere Agenten. Systeme dezentral zu organisieren, ist also ebenfalls ein Prinzip ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung, das sich direkt aus dem Resilienz-Konzept der zivilen SiFo ableiten lässt und das als Möglichkeit, erfolgreich mit Komplexität umzugehen, auch in der Literatur immer populärer wird (Helbing 2013: 55).

> *Hypothese H23: Dezentralität, verstanden als Vermeidung des Auftretens hochkritischer Systemkomponenten bzw. hochspezialisierter Agenten, bei deren Ausfall das gesamte System unweigerlich zusammenbricht, ist ein geeignetes Designprinzip, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.*

Ein besonderer Typ dezentralisierter Systeme sind sogenannte „vermaschte Netzwerke" (meshed networks). Diese vereinen in sich viele der Eigenschaften und Prinzipien, die der Resilienz komplexer adaptiver Systeme zuträglich sind. So gehen vermaschte Netze nicht von einem zentralen Punkt aus, sondern verfügen über multiple, redundante Strukturen, die

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ausfallende Systembestandteile sofort umgehen bzw. ersetzen können. Die Systemkomponenten – da es um komplexe adaptive Systeme geht, sind dies definitionsgemäß Agenten – beobachten ihre Umwelt und können so auf Störungen und Fehler aufmerksam werden. Sobald in einem Teil des Netzes eine Störung auftaucht, rekonfiguriert das System sich selbst und ersetzt den wegfallenden Teil durch eine redundant vorhandene Komponente. Damit vermeidet es die Existenz eines single point of failure indem zu jedem Zeitpunkt mehrere alternative Möglichkeiten bestehen. Die Wahl zwischen mehreren Alternativen so wie sie in vermaschten Netzen möglich ist, entspricht dann dem system- und komplexitätstheoretischen Verständnis von generischer Anpassungsfähigkeit. Wenn die Störung behoben ist, kann das vermaschte Netz sich erneut rekonfigurieren und die wieder funktionierenden Teile integrieren, um seine Leistung zu optimieren (Dueñas-Osorio/Vemuru 2009: 166, ENISA 2011: 24). So konzipierte, vermaschte Netze beinhalten wie gesagt neben dem Prinzip der Dezentralität auch das Prinzip der Modularität sowie der Redundanz und außerdem Fähigkeiten wie die zur Selbst-Organisation. Allerdings sind nicht alle für die zivile SiFo relevanten Systeme in Form von Netzen strukturiert. Wo sie es aber sind, also vor allem im Bereich kritischer Infrastrukturen wie Energie- und Wasserversorgung sowie Telekommunikation, sollte Resilience Engineering dazu beitragen, eine vermaschte Netzstruktur aufzubauen. Oder anders gesagt:

> *Hypothese H24: Die Resilienz kritischer Netz-Infrastrukturen kann durch den Aufbau vermaschter Netze erhöht werden.*

Einen interessanten Sonderfall stellen mit Blick auf unterschiedliche Netztopologien sogenannte skalenfreie Netze bzw. Netzwerke dar. Im Vergleich zu zufallsbasierten Netzen, bei denen unterschiedliche Netzbestandteile im Schnitt alle gleich stark vernetzt sind, weisen skalenfreie Netzwerke eine Reihe an Elementen auf, die mit besonders vielen anderen Elementen vernetzt sind. Diese sind für die Funktionsfähigkeit des Netzes eminent wichtig. Um diese besonders wichtigen Elemente clustern sich sozusagen andere Systemelemente. Damit ist dieses Netz weder übergreifend zentralisiert organisiert, noch modular aufgebaut. Zentral sind die besonders vernetzten Elemente immer nur für einen lokal begrenzten Bereich des Systems. Und Modularität würde eine lokal sehr starke Vernetzung vieler Elemente miteinander, nicht nur mit einem – lokal – zentralen Element bedeuten. Der mathematischen Theorie zufolge sind derartige, skalenfreie Netzwerke nun ausfallsicher gegenüber zufälligen Fehlern und Störungen, wie sie beispielsweise von Unfällen oder Naturkatastrophen

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ausgehen können. Solche zufälligen Störungen treffen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf Elemente des Systems, die keine hohe Kritikalität aufweisen. Oder wenn sie ein kritisches Element treffen, dann nur ein einzelnes, was lediglich zu einem Teilausfall des Systems führt. Skalenfreie Netzwerke sind aber gleichzeitig sehr anfällig für zielgerichtete Attacken. Wer in der Lage ist, die wenigen, hochkritischen Elemente des Systems zu identifizieren und zu zerstören, kann mit relativ geringem Aufwand das gesamte System zum Zusammenbruch bringen. Das könnte besonders für Terroristen von Interesse sein, die grundsätzlich ebenfalls unter der Nebenbedingung begrenzter Ressourcen versuchen, mit ihren Aktionen einen möglichst großen Effekt zu erzielen (Ash/Newth 2007: 673, Cox et al. 2011: 314). Auch wenn das Phänomen des Infrastrukturterrorismus bisher nicht zu größeren Schäden in der Gesellschaft geführt hat, kann diese Möglichkeit für die Zukunft nicht vernachlässigt werden, wie unter anderem eine von Ortwin Renn herausgegebene Studie zur Resilienz des deutschen Energiesystems und des Prozesses der Energiewende gezeigt hat, an der auch der Autor der vorliegenden Arbeit beteiligt war (siehe Renn 2017).

Aufgrund des All-Gefahren-Ansatzes, der dem Resilienz-Konzept der zivilen SiFo zugrunde liegt, lässt sich der gerade geschilderten Argumentation folgend nicht eindeutig festlegen, ob die Anpassung bestehender Systeme in Richtung skalenfreier Netzwerke ihre Resilienz schmälern oder stärken würde. Insofern kann hier im Bezug darauf keine Hypothese für Resilience Engineering abgeleitet werden. Anders sieht es jedoch mit Systemen aus, die bereits in Form skalenfreier Netzwerke organisiert sind. Das gilt etwa durchaus für einige Netze der kritischen Infrastruktur, wie etwa Energienetze. Da es zumeist nicht möglich ist, die Topologie bestehender Netze – zumindest nicht kurzfristig – grundlegend zu ändern, müssen andere Wege gefunden werden, um ihre Resilienz zu erhöhen. In skalenfreien Netzwerken geht es dann etwa darum, die besonders relevanten Elemente erstens zu identifizieren und zweitens entsprechend redundant oder divers (siehe unten) auszulegen (Ash/Newth 2007: 681). Daraus folgt für Resilience Engineering:

> *Hypothese H25: Um skalenfreie Netzwerke, wie sie für kritische Infrastrukturen teilweise typisch sind, resilient zu gestalten, müssen deren besonders relevante Elemente identifiziert und mittels geeigneter Prinzipien wie Redundanz und Diversität optimiert werden.*

Um herausfinden zu können, ob komplexe adaptive Systeme modular und dezentral aufgebaut sind, inwiefern sie Kriterien eines vermaschten

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Netzes entsprechen oder eher skalenfreien Netzwerken ähneln, ob sie über adäquate Sicherheitsmargen verfügen und wie nah oder fern sie sich an Schwellenwerten oder Umkipp-Punkten befinden, reicht der Augenschein nicht aus. Die Komplexität besteht ja auch gerade darin, dass keine einfachen Kausalitäten erkennbar sind. Deshalb kann ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung, kann Resilience Engineering, nicht sinnvoll konzeptualisiert werden, ohne auf Methoden zur Modellierung und Simulation komplexer Systeme einzugehen. Modelle sind grundsätzlich vereinfachende, meist formale Beschreibungen des gerade interessierenden Teils der gesamten Realität. Simulationen wiederum können als „virtuelle Experimente" bezeichnet werden. Sie sind also Nachbildungen dynamischer, mehrdimensionaler Prozesse in einem Modell und ermöglichen Erkenntnisse, die auf die Wirklichkeit übertragen werden können. Derartige virtuelle Experimente werden überall dort benötigt, wo „reale" Experimente aus verschiedenen Gründen nicht möglich sind. Beispiele sind hier etwa die Astrophysik, bei der sich die zu beobachtenden Phänomene dem menschlichen Vorstellungsvermögen in Bezug auf Zeit und Raum entziehen, oder die Medizin, bei der die Ausbreitung einer Epidemie nicht einfach erprobt werden kann (Bungartz et al. 2009: 1ff). Die Notwendigkeit von Modellen und Simulationen zur Vorhersage des Verhaltens komplexer adaptiver Systeme im Angesicht widriger Ereignisse in der zivilen SiFo ist vor diesem Hintergrund evident. Sie dienen dazu, mit einem ökonomisch machbaren und ethisch vertretbaren Aufwand eine hinreichend wirklichkeitsgetreue Verhaltensbeschreibung zu erreichen, mit deren Hilfe mögliche Schwachstellen und Probleme des Systems identifiziert werden können (Bossel 2004: 15). Modelle und Simulationen werden im Bereich der ingenieurwissenschaftlichen Risikoforschung bereits seit Jahrzehnten intensiv genutzt (siehe Renn 2008, 2008b). Klassisches Risikomanagement nutzt Modelle und Simulationen, um Vulnerabilitäten spezifischer Systemkomponenten gegenüber definierten und erwarteten widrigen Ereignissen vorhersagen und das Verhalten des Systems beim Eintreten solcher Ereignisse berechnen zu können. Im breiteren gesellschaftlichen Kontext hat beispielsweise die Volkswagen-Stiftung bereits vor über fünfzehn Jahren die Notwendigkeit erkannt, neue Methoden zur Modellierung und Simulation komplexer Systeme zu entwickeln. Von 2003 bis 2011 wurden zahlreiche Projekte durch die Initiative „Neue konzeptionelle Ansätze zur Modellierung und Simulation komplexer Systeme" gefördert. Hierbei lag der Fokus allerdings nicht primär auf den komplexen adaptiven sozio-tech-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

nischen Systemen, die für die zivile SiFo von Interesse sind.[41] Nichtsdestotrotz gibt es auf dem Gebiet der Modellierung und Simulation komplexer Systeme sowohl eine breite Basis mathematischen und informationstechnischen Grundlagenwissens als auch eine Vielzahl an Anwendungsbeispielen, etwa was die Erklärung von Vorgängen im menschlichen Gehirn oder die Algenbildung in den Ozeanen betrifft.

Der Anspruch der vorliegenden Arbeit kann weder darin bestehen, in formeller Weise die Vor- und Nachteile bestimmter Methoden zu beschreiben, noch eine eigene, neuartige Methodik zur Modellierung und Simulation des Verhaltens komplexer adaptiver Systeme in extremen Ausnahmefällen zu entwickeln. Dazu ist sie aufgrund ihrer sozialwissenschaftlichen Grundausrichtung nicht in der Lage. Es kann aber mit Blick auf die system- und komplexitätstheoretischen Annahmen des Resilienz-Konzepts und unter Zuhilfenahme von Überblicksarbeiten aus der Literatur zumindest versucht werden, auf einige Methoden hinzuweisen, die für Resilience Engineering im Sinne der vorliegenden Arbeit besonders geeignet scheinen. Die oben beschriebene grundsätzliche Eigenschaft der Vereinfachung komplexer Realitäten, die allen Modellen innewohnt, darf dabei zunächst nicht dazu führen, das Verständnis der interessierenden Systeme als komplex und adaptiv zu unterwandern. Die Möglichkeit des Auftretens unerwarteter Ereignisse, unintendierter Nebenfolgen und überhaupt von Unsicherheit, muss von den Methoden berücksichtigt werden können, damit sie für Resilience Engineering geeignet sind (Park et al. 2013. 362). Gleichzeitig muss als Grundannahme gelten, dass die untersuchten Systeme physikalischen Gesetzen folgen. Nur dann lassen sich Modelle bilden, die eine hinreichend große Wirklichkeitstreue enthalten (IRGC 2018: 61). Autoren wie Ahmed et al. oder Ouyang beschreiben unterschiedliche Möglichkeiten, komplexe adaptive Systeme zu modellieren – und so letztlich ihr Verhalten simulieren zu können. Dazu zählen laut Ahmed et al. zum Beispiel partielle Differentialgleichungen, zelluläre Automaten, Netzwerk-Methoden und agentenbasierte Modellierung (ABM) (Ahmed et al. 2005: 4). Vor allem letztere scheint vor dem Hintergrund der Annahmen der Theorie komplexer adaptiver Systeme besonders relevant und vielversprechend für Resilience Engineering. Auf agentenbasierte Simulationsmethoden wird gleich noch einmal gesondert eingegangen.

41 https://www.volkswagenstiftung.de/unsere-foerderung/unser-foerderangebot-im-ueberblick/neue-konzeptionelle-ans%C3%A4tze-zur-modellierung-und-simulation-komplexer-systeme [Stand: 28.6.2019].

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Auch Ouyang beschreibt unterschiedliche Methoden und Ansätze zur Modellierung komplexer adaptiver Systeme. Sein Artikel bietet einen guten und auch für Sozialwissenschaftler in weiten Teilen sehr verständlichen Überblick (siehe Ouyang 2014). Ihm zufolge sind beispielsweise empirische Ansätze gekennzeichnet durch die Nutzung historischer Datensätze und von Expertenwissen, mit deren Hilfe auf künftiges Systemverhalten geschlossen werden kann. Stärker formalisiert sind etwa Fuzzylogik-Methoden, welche die unterschiedlichen Einschätzungen von Experten durch mathematisch formulierte Unschärfe in Modelle überführen können. Einen großen Einfluss und weite Verbreitung bei der Modellierung komplexer Systeme haben wiederum Netzwerk-basierte Methoden. Deren Logik wurde bereits in der komplexitätstheoretischen Analyse von Resilienz erläutert und im aktuellen Unterkapitel in Bezug auf skalenfreie Netzwerke genutzt (siehe 4.3.2). Mit ihrer Hilfe werden komplexe Systeme als Netzwerke verstanden, die aus Knoten und Kanten bestehen. Verschiedene Knoten interagieren direkt miteinander, wenn sie über Kanten verbunden sind. Das erlaubt es durchaus auch, Feedback und Rückkopplungen zwischen verschiedenen Knoten im Netzwerk zu modellieren. Netzwerkbasierte Methoden können vor allen Dingen dazu genutzt werden, den technisch klar abgrenzbaren Teil von Netzwerkinfrastrukturen wie etwa der Energieversorgung zu modellieren. Netzwerk-basierte Methoden können noch weiter aufgeteilt werden, unter anderem in sogenannte „flussbasierte“ (flow-based), also Methoden, deren Fokus auf dem Fluss von Informationen bzw. Dienstleistungen oder Produkten liegt, der zwischen verschiedenen Knoten des Netzwerks besteht (Ouyang 2014: 46-53). Ouyang beschreibt auch noch einige weitere, weniger verbreitete Modellierungsmethoden. Gemeinsam ist ihnen allen aber ein großer bis sehr großer Datenhunger. Um realitätsnahe Ergebnisse zu liefern, benötigen die meisten dieser Methoden ein großes Maß an zur Verfügung stehenden Daten, auf deren Grundlage sie das Modell des untersuchten Systems aufbauen. Die flussbasierten Methoden benötigen beispielsweise detaillierte Informationen über die spezifischen Charakteristika der Systembestandteile, die sie zu modellieren suchen. Wenn es um kritische Infrastrukturen geht, sind dies sehr häufig Daten, welche von den Betreibern der kritischen Infrastruktur aufgrund von Datenschutz- und Sicherheitsbedenken kaum zur Verfügung gestellt werden können (Ouyang 2014: 53).

Das gilt auch für die gerade bereits genannte agentenbasierte Modellierung komplexer Systeme. Auch dort werden Daten benötigt, die von den verantwortlichen Personen als vertraulich eingeschätzt und nicht ohne Weiteres weitergegeben werden. Aber noch stärker als andere Methoden

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ist eine agentenbasierte Modellierung von der Quantität und der Qualität der zur Verfügung stehenden Daten abhängig. Denn über technische und strukturelle Daten hinaus werden auch Informationen zu politischen Entscheidungen oder auch menschlichem Verhalten in bestimmten Situationen benötigt, die nur sehr schwer zu erheben und systematisieren sind. Zudem ist die Qualität der Simulation auch stark abhängig von den Annahmen bzgl. der namensgebenden Agenten, die von demjenigen zu treffen sind, der die Modellierung vornimmt (Ouyang 2014: 48, 53). Nichtsdestotrotz bieten agentenbasierte Modellierungsansätze viele Vorteile, die sie zur Anwendung im Bereich komplexer adaptiver Systeme prädestinieren. Zunächst folgen agentenbasierte Methoden einem bottom-up-Ansatz, der davon ausgeht, dass die Komplexität des zu modellierenden Systems sich als emergente Eigenschaft aus den relativ simplen Interaktionen autonomer Agenten untereinander ergibt. Agentenbasierte Methoden modellieren ein System als bestehend aus Agenten, die mit anderen und der Systemumwelt interagieren, indem sie bestimmten, nachvollziehbaren Regeln folgen. Aufgrund des durch die kontinuierliche Interaktion hervorgerufenen Feedbacks, wird das durch die Agenten gebildete System komplex. Die agentenbasierte Modellierung hat sich selbst ständig weiterentwickelt, so dass mittlerweile – auch dank vorhandener und dafür benötigter Rechenkapazitäten – Agenten auch als sich selbst weiterentwickelnde Elemente modelliert werden können. Dazu werden etwa mathematische Methoden wie stochastische Simulationen verwendet. Oder es wird darauf verzichtet, bestimmte Szenarien und Systemzustände zu simulieren und auch deren Auftreten als Emergenz verstanden, die stochastisch und nicht deterministisch abhängt von den getroffenen Grundannahmen für das modellierte System (Al-Khudhairy et al. 2012: 577, Duit et al. 2010: 2, Helbing 2013: 57, Ouyang 2014: 48).

Die Beschreibung der Methode der agentenbasierten Modellierung erinnert nicht nur zufällig an die Grundannahmen der Theorie komplexer adaptiver Systeme (siehe 4.3.2). Es besteht eine enge Verwandtschaft zwischen deren theoretischen Annahmen und der Entwicklung von Methoden zur agentenbasierten Modellierung komplexer Systeme. Allein aus diesem Grund ist es sinnvoll, diese Art der Modellierung als relevant für Resilience Engineering zu verstehen. Darüber hinaus sieht aber auch Ouyang die agentenbasierte Modellierung gemeinsam mit flussbasierten Netzwerkmethoden als diejenigen an, mit deren Hilfe am besten die Resilienz von Systemen erhöht werden kann.

Nach Ouyang sind sowohl die agentenbasierte Modellierung als auch flussbasierte Netzwerk-Methoden dazu geeignet, alle vier unterschiedli-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

chen Arten von Vernetzung (physikalisch, cyber, geographisch, logisch), wie sie auch bereits beim Zusammenhang zwischen Resilienz und Komplexität geschildert wurden, in Betracht zu ziehen. Und sie sind relativ gesehen die Methoden, die zu den meisten Resilienz-Strategien, wie sie Ouyang definiert, beitragen können. Zudem sind die Methoden bereits relativ ausgereift, was durch den Grad an Maturität (maturity) ausgedrückt, wird, der für beide Methoden als relativ hoch angesehen wird (Ouyang 2014: 53f). Agentenbasierte Modellierung stellt die Komplexität von Systemen also explizit in Rechnung und kann so ein relativ realitätsnahes Abbild der interessierenden Systeme schaffen. Wenn derart modellierte Systeme dann in Simulationen von stochastisch hervorgerufenen, beliebigen Störereignissen getroffen werden, zeigt sich, ob und wie sie ihnen standhalten, wo Schwachstellen liegen und welche Bestandteile des Systems besonders erfolgreich sind. Mithilfe agentenbasierter Modellierung könnte das System im nächsten Schritt auch bewusst verändert werden, so dass es beispielsweise eher resilienzfördernden Prinzipien wie Modularität und Dezentralität entspricht. Wenn das System dann erneut simulierten Störungen ausgesetzt ist, sollte es sich tendenziell erfolgreicher zeigen. Auf diese Weise kann agentenbasierte Modellierung dazu beitragen, das Verständnis für die Funktionsweise komplexer adaptiver Systeme zu erhöhen und den Einfluss resilienzfördernder Gestaltungsprinzipien nachzuweisen sowie zu fördern. Aus den Ergebnissen von Ouyang und den Überlegungen der vorliegenden Arbeit lassen sich daher zwei Hypothesen für Resilience Engineering ableiten:

Hypothese H26: Mithilfe agentenbasierter Modellierung kann die Funktionsweise komplexer adaptiver Systeme auch im stochastisch bestimmten extremen Ausnahmefall verstanden und so aufgezeigt werden, wie Resilience Engineering die Resilienz dieser Systeme beeinflusst.

Hypothese H27: Methoden zur agentenbasierten Modellierung weiterzuentwickeln, ist Bestandteil von Resilience Engineering.

Der potentielle Kritikpunkt eines logischen Zirkelschlusses wird hier durchaus gesehen. Wenn Systeme mithilfe einer Agenten-Logik verstanden werden und daraus ein Resilienz-Konzept abgeleitet wird, scheint es selbstverständlich, dass Resilience Engineering sich sehr gut mithilfe eines auf Agenten-Logik basierenden Modellierungsansatzes umsetzen lässt. Es muss allerdings unterschieden werden zwischen der rein theoretischen Analyse zur Entwicklung des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo einerseits und einer ingenieurwissenschaftlichen Anwendung der agentenbasierten Modellierung andererseits. Erstere bildet zusammen mit den Annahmen

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

der soziologischen Systemtheorie die Basis des Resilienz-Konzepts der vorliegenden Arbeit und damit auch für Resilience Engineering. Diese Basis führt neben der abgeleiteten Nützlichkeit agentenbasierter Modellierung zu einer Vielzahl weiterer Hypothesen. Letztere ist lediglich ein mögliches Werkzeug, um Resilience Engineering konkret zu betreiben, gleichzeitig aber bei weitem nicht das einzige. Denn auch wenn agentenbasierte Modellierung ein wichtiger Teil von Resilience Engineering ist, erfordert die reale Komplexität der betrachteten Systeme gleichzeitig eine Weitung der Perspektive. Ouyang stellt zurecht die Frage in den Mittelpunkt, mithilfe welcher Methoden Entscheidungsträger in Systemen am besten in ihren Entscheidungen unterstützt werden können. Da alle von ihm untersuchten Methoden jeweils nur einen – wenn auch unterschiedlich großen – Teil der genannten Resilienz-Strategien abdecken, plädiert er für die Nutzung mehrerer Methoden in einem „uniform framework“ (Ouyang 2014: 54). In eine ähnliche Richtung argumentiert das International Risk Governance Center (IRGC) mit der Beschreibung eines Ansatzes, der als „modulare Modellierung” (modular modelling) bezeichnet wird. Da keine einzelne Methode als geeignet angesehen wird, komplexe adaptive Systeme in Gänze zu modellieren, sollen jeweils passende Ansätze für Subsysteme genutzt und dann mithilfe spezialisierter Routinen zu einem systemischen Modellierungsansatz verbunden werden (IRGC 2018: 63). Modulare Modellierung ergibt in Bezug auf Resilience Engineering schon allein deshalb Sinn, weil Modularität als Systemprinzip zu Resilienz beiträgt. Derselben Logik folgend, akzeptiert modulare Modellierung die Unmöglichkeit einer umfassenden, zentralistischen und erschöpfenden Methode zur Modellierung komplexer Systeme und setzt dagegen vielmehr auf den strategisch zielgerichteten Einsatz unterschiedlicher Methoden mit deren jeweils spezifischen Stärken an den passenden Stellen des Systems, um durch Kombination der Ergebnisse zu einer übergeordneten, systemischen Sichtweise zu gelangen. Das ist gleichzeitig konsistent mit den system- und komplexitätstheoretischen Elementen des Resilienz-Konzepts der vorliegenden Arbeit, so dass für Resilience Engineering folgende Hypothese gebildet werden kann:

> *Hypothese H28: Modulare Modellierung, verstanden als systemische Kombination unterschiedlicher Methoden zur Modellierung komplexer adaptiver Systeme, ist ein Bestandteil von Resilience Engineering.*

Aus der gerade getätigten Analyse lässt sich noch eine weitere Überlegung ableiten. Insbesondere Methoden wie die agentenbasierte Modellierung sind sehr datenintensiv. Reale bzw. präzise Daten liegen jedoch aus unter-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

schiedlichen Gründen sehr häufig nicht vor (Ouyang 2014: 54f). Das führt dazu, dass in den Ingenieurwissenschaften Modellierungsansätze unter Zuhilfenahme ungenügender oder ungeeigneter Daten entwickelt werden. Dies wiederum beeinträchtigt die Qualität der entwickelten Modelle negativ und verhindert einen Einsatz im realen Umfeld, da der mögliche Mehrwert für Entscheidungsträger nur gering ist. An den grundsätzlichen Hürden in Bezug auf die Verfügbarkeit von Daten wird sich voraussichtlich auch künftig nichts ändern. Um nichtsdestotrotz bessere Modelle entwickeln zu können, könnte deshalb die Einrichtung einer open source Datenbank sinnvoll sein, die beispielsweise mit realistischen Daten eines fiktiven komplexen adaptiven Systems gefüttert wird. Das fiktive System sollte möglichst detailliert abgebildet werden im Hinblick auf kritische Infrastrukturen, soziale und sonstige technische Aspekte und dank eines offenen Zugangs von unterschiedlichen Forschern genutzt werden können (Alderson 2019: 77). Da die vorliegende Arbeit sich im Rahmen der zivilen SiFo in Deutschland bewegt, wäre es etwa überlegenswert, eine derartige Datenbank für Deutschland aufzubauen. Dies wäre unter anderem als ein von der Bundesregierung zu unterstützendes, kontinuierliches Forschungsprojekt denkbar. In anderen Ländern wie etwa den USA existieren ähnliche Datensätze bzw. Beispielsysteme bereits (siehe Alderson 2019). Der gerade gemachte Vorschlag entspricht eher einem praktischen Hinweis, als einem theoretisch abgeleiteten Bestandteil von Resilience Engineering. Insofern soll er hier nicht als eigenständige Hypothese formuliert werden.

Bevor gleich noch die beiden Prinzipien der Diversität und der Redundanz für Resilience Engineering analysiert werden, muss an dieser Stelle, nach der Diskussion von Möglichkeiten zur Modellierung und Simulation komplexer adaptiver Systeme, noch auf eine spezifische (informations-)technische Entwicklung verwiesen werden. Im Zusammenhang mit der eminenten Bedeutung von generischer Anpassungsfähigkeit für die Resilienz von Systemen drängen sich das Thema der künstlichen Intelligenz (KI) und mit ihm verwandte Stichworte wie Big Data, maschinelles Lernen oder neuronale Netzwerke geradezu auf. Denn künstliche Intelligenz ist ja gerade mit der Annahme verbunden, dass technische Systeme künftig Problemstellungen zu meistern in der Lage sein werden, für die sie nicht explizit geplant und entwickelt wurden. Eben indem die Systeme eigenständig, unter Zuhilfenahme der ihnen innewohnenden künstlichen Intelligenz, das Problem erfassen und eine passende Lösungsstrategie entwickeln. Menschen und soziale System verfügen zweifelsfrei über diese Fähigkeit. Eher klassische, nach strikten Vorgaben zur Erfüllung spezifischer Aufgaben gestaltete technische Systeme hingegen grund-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

sätzlich nicht. Das ändert sich durch den Prozess der Digitalisierung und die Einführung der Informationstechnologie bereits seit längerer Zeit. So schreiben Comfort et al. schon 2001 von technischen Systemen, die dank Informationstechnologie dazu in der Lage seien, sich an unerwartete Ereignisse anzupassen. Das Voranschreiten der Informationstechnologie führe dazu, dass komplexe technische Systeme besser, resilienter, gestaltet werden könnten (Comfort et al. 2001: 144ff). Ähnlich sieht das Longstaff, der zufolge informationstechnische Systeme schon lange in der Lage seien, für unbekannte Probleme durch Suchalgorithmen die besten Lösungen zu finden (Longstaff 2012: 266). Mittlerweite bieten sich vor allem in Kommunikationsnetzen und informationstechnischen Systemen wie dem Internet – hier nur verstanden als das technische System – sehr viele Möglichkeiten, generische Anpassungsfähigkeit gegenüber Störungen einzubauen. Das zugehörige Stichwort lautet hier häufig „self x". Damit ist im weitesten Sinne die Fähigkeit zur Selbst-Organisation des Systems gemeint, die noch weiter ausdifferenziert wird in „self-reconfiguration, self-optimising, self-diagnosing, self-healing, self-protecting, self-organization, self-forming, self-adaptivity or self-management" mit deren Hilfe Feedbackschleifen in das System eingebaut werden (ENISA 2011: 31). Insgesamt sind die Möglichkeiten, die sich der Gesellschaft durch Informationstechnologie bieten, in den letzten Jahrzehnten und vor allen Dingen in den letzten Jahren exponentiell gewachsen. Künstliche Intelligenz stellt diesbezüglich einen konsequenten nächsten Schritt dar. Wobei künstliche Intelligenz nicht als monolithischer Block verstanden werden kann. Technische Systeme sind nicht in einem binären Sinne intelligent oder nicht intelligent. Es wird beispielsweise zwischen „schwacher" und „starker" künstlicher Intelligenz unterschieden. Erstere ist in Form moderner Sprachassistenten bereits im Alltag vieler Menschen angekommen. Letztere hingegen, die als künstliche Intelligenz auf menschlichem Niveau verstanden wird, ist nach wie vor ein hochaktuelles Forschungsthema, in dem allerdings durchaus spektakuläre Fortschritte erzielt werden (Baezner et al. 2018: 2). Daraus ergeben sich vielfältige Chancen und Möglichkeiten, aber auch Herausforderungen und Gefahren. Diese auch nur im Hinblick auf die zivile Sicherheitsforschung in Deutschland zu erörtern, würde den Rahmen hier weit sprengen und steht nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit.

Methoden, die mit künstlicher Intelligenz in Verbindung stehen, werden aber bereits heute auch in der ingenieurwissenschaftlichen Resilienzforschung verwendet. Das sind zum Beispiel das sogenannte maschinelle Lernen, mit dessen Hilfe unüberschaubare Mengen an Daten (big data) automatisiert erkannt und analysiert werden können (Helbing 2013: 57f).

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Autoren wie Ji et al. bezeichnen derartige Methoden als Schlüsselthemen zur Adressierung des „Resilienz-Problems“ (Ji et al. 2017: 1358). Auch Attoh-Okine diskutiert Ansätze und Ideen zu Big Data in seinem Werk zu Resilience Engineering (Attoh-Okine 2016: 83-93). Mithilfe von maschinellem Lernen und anderen Methoden künstlicher Intelligenz können technische Systeme demnach generische Anpassungsfähigkeit aufbauen und sich verändernden Umweltbedingungen – und damit zumindest theoretisch auch gravierenden widrigen Ereignissen – erfolgreich anpassen (IRGC 2018: 31). Diese Art von Selbst-Organisation oder Selbst-Heilung, von autonomem Verhalten, wird vielfach als notwendig für Resilienz verstanden (Helbing 2013: 54, IRGC 2018: 30, Meadows 1999: 15, Sterbenz et al. 2010: 1257). Überspitzt formuliert ließe sich daraufhin an dieser Stelle fragen, ob Resilience Engineering, verstanden als den sinnvollen Einsatz und die Weiterentwicklung von Technologie zur Erhöhung von Resilienz, überhaupt ohne künstliche Intelligenz möglich ist. In einem strikt und ausschließlich technischen Verständnis von Resilience Engineering hätte diese Frage einige Berechtigung und könnte nicht ohne Weiteres abgetan werden. Die interessierenden Systeme in der zivilen SiFo sind jedoch sozio-technische Systeme. Hier wird erneut deutlich, wie wichtig die sinnvolle Definition von Systemgrenzen ist. Zudem geht es bei Resilience Engineering nicht um autonome oder automatisierte Systeme, bei denen die Notwendigkeit für menschliche Intervention entfernt werden soll (Sterbenz et al. 2010: 1257). Vielmehr geht es um komplexe adaptive sozio-technische Systeme, bei denen die sozialen und technischen Aspekte dergestalt miteinander gekoppelt sind, dass sie nicht losgelöst voneinander verstanden werden können. Im Rahmen derartiger Systeme kann Resilience Engineering – basierend auf dem eigenständigen Resilienz-Konzept der zivilen SiFo – nur verstanden werden als Entwicklung und Umsetzung von technologischen Lösungen zur Erhöhung der generischen Anpassungsfähigkeit der Systeme an sich – und nicht nur ihrer technischen Komponenten. Das schließt den Einsatz von Methoden und Ansätzen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz nicht aus, ganz im Gegenteil. Künstliche Intelligenz erlaubt ohne jeden Zweifel an vielen Stellen, die generische Anpassungsfähigkeit auch sozio-technischer Systeme zu erhöhen – nicht nur rein technischer. Wie sie dazu beitragen kann, lässt sich an dieser Stelle nicht abschließend und umfassend analysieren. Die Frage danach könnte selbst als Teil von Resilience Engineering gefasst werden. Gleichzeitig gibt es aber auch über künstliche Intelligenz hinaus eine Vielzahl an Ideen und Möglichkeiten für die Ingenieurwissenschaften, Resilience Engineering zu betreiben. Die-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

se Überlegungen führen dann insgesamt zu den folgenden beiden Hypothesen:

> *Hypothese H29: Die Beantwortung der Frage danach, wie KI-basierte Lösungen zur Erhöhung der Resilienz der für die zivile SiFo relevanten soziotechnischen Systeme beitragen können, ist Teil ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung.*
>
> *Hypothese H30: Resilience Engineering lässt sich in komplexen adaptiven, sozio-technischen Systemen auch ohne den Einsatz künstlicher Intelligenz umsetzen.*

Diversität und Redundanz sind Prinzipien zur Erhöhung generischer Anpassungsfähigkeit in komplexen adaptiven Systemen. Diversität besteht in einer möglichst unterschiedlichen Reaktion funktional gleicher Agenten auf extrem unwahrscheinliche oder unerwartete Veränderungen. Je größer die Diversität innerhalb funktional äquivalenter Gruppen komplexer adaptiver Systeme, desto größer ist ihre generische Anpassungsfähigkeit.

Während die beiden Prinzipien der Modularität und der Dezentralität erst in diesem Unterkapitel explizit aus der system- und komplexitätstheoretischen Analyse von Resilienz als Bestandteil von Resilience Engineering abgeleitet wurden, erfolgte das für die Prinzipien Diversität und Redundanz bereits im Rahmen der Entwicklung des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo. Das zeigt deren herausgehobene Bedeutung für Resilienz. Die Diskussion soll daher an dieser Stelle wieder aufgegriffen und auf je eine Hypothese für Resilience Engineering übertragen werden. Dabei ändert sich nichts an dem grundsätzlichen Verständnis, dass sowohl Diversität als auch Redundanz in komplexen adaptiven Systemen geeignete Prinzipien sind, um deren generische Anpassungsfähigkeit und damit ihre Resilienz zu erhöhen. In der system- und komplexitätstheoretischen Analyse entsprachen sich allerdings Diversität und sogenannte „skalenübegreifende" Redundanz sehr stark und es konnte nicht trennscharf zwischen den beiden Prinzipien unterschieden werden. Um Hypothesen für Resilience Engineering zu bilden, wird daher noch einmal stärker auf die Unterschiede zwischen Diversität und Redundanz verwiesen.

Die Formulierung beider Prinzipien als Bestandteil des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo resultierte aus der Frage, wie die ungenutzten Spielräume, die in der Komplexitätstheorie immer wieder eine Rolle spielen, verstanden werden können. Was Diversität anging, wurden die Anleihen dafür sehr stark aus der sozial-ökologischen Resilienzforschung genommen. Dort wird (Bio-)Diversität, oder auch Artenvielfalt, immer wieder

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

als eine der entscheidenden Bestandteile von Resilienz verstanden. Wenn möglichst viele unterschiedliche Arten existieren, erhöht das ceteris paribus auch die Wahrscheinlichkeit, dass Arten vorhanden sind, die mit den jeweils auftretenden disruptiven Ereignissen erfolgreich umzugehen in der Lage sind, bzw. davon gar nicht betroffen sind. Bereits Holling erkannte Diversität als entscheidend für Resilienz, wie seine Beispiele hinsichtlich der Bedeutung unterschiedlicher Baumarten für Wälder und deren Anfälligkeit für bestimmte Schädlinge oder aber Waldbrände zeigen (siehe 2.3). Eine besonders wichtige Rolle spielt Diversität auch in der wirtschaftswissenschaftlichen Resilienzforschung. Beim Blick auf regionale Wirtschaftssysteme entspricht Diversität dem Vorhandensein mehrerer unterschiedlicher, wichtiger Branchen innerhalb der betrachteten Regionen, um eine Anfälligkeit des Gesamtsystems gegenüber Störungen in einzelnen Branchen zu verringern (Wink 2011: 115). Schwere wirtschaftliche Krisen resultieren häufig daraus, dass einzelne Regionen gerade keine Branchendiversität aufweisen und dann zu großen Teilen vom Erfolg eines einzelnen Sektors abhängig sind. Diversität wird in den Wirtschaftswissenschaften aber auch noch anders verstanden, nämlich als Investitionsstrategie. Durch eine breite Streuung von Investitionen wird eine Abhängigkeit von einzelnen Wertentwicklungen vermieden. Holling selbst nutzt diese Analogie interessanterweise dazu, sein Prinzip der „funktionalen Diversität" (functional diversity) für biologische Systeme zu erläutern (Holling 1996: 40). Vor diesem Hintergrund wurde Diversität dann für das Resilienz-Konzept der vorliegenden Arbeit unter Zuhilfenahme der Theorie komplexer adaptiver Systeme untersucht. Demnach ähnelt Diversität auf den ersten Blick der Eigenschaft der Agenten komplexer adaptiver Systeme, sich immer stärker zu spezialisieren. Denn das führt zu Agenten, die sich stark unterscheiden, die sehr divers sind. Die Spezialisierung macht jedoch stärkere Vernetzung notwendig, was zu einem immer komplexeren System führt und zu Agenten, die immer weniger dazu in der Lage sind, sich an gravierende Veränderungen anzupassen. Inwiefern stärkere Spezialisierung auf Systemebene zu mehr oder weniger generischer Anpassungsfähigkeit führt, ließ sich rein theoretisch nicht sagen. Diversität meint aber mehr, als nur möglichst unterschiedliche Agenten. Diversität meint die Existenz möglichst unterschiedlicher Agenten innerhalb funktionaler Gruppen. In funktionalen Gruppen erfüllen die Agenten alle dieselbe Aufgabe. Je unterschiedlicher aber die Art und Weise ist, in der sie das tun, desto größer ist die Diversität im System.

Was heißt das für die zivile SiFo und insbesondere für ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung? Das Prinzip der Diversität, des Vorhanden-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

seins unterschiedlicher Agenten in funktional äquivalenten Gruppen, lässt sich sehr eindrücklich am bereits vielfach als Beispiel genutzten Energiesystem veranschaulichen. Dessen Funktion besteht darin, die Bevölkerung zuverlässig und möglichst ohne Ausfälle mit Energie, also Strom, Wärme und Treibstoff, zu versorgen. Innerhalb des Systems gibt es Elemente, die für die Stromversorgung zuständig sind, genauso wie Elemente, die für die Versorgung mit Wärme und Treibstoff sorgen. In sehr stark abstrahierender Weise stellen diese jeweils funktional äquivalente Gruppen dar. Für den Endabnehmer ist es rein funktional gänzlich irrelevant, ob der Strom, den er für beinahe sämtliche Bereiche seines Lebens ständig benötigt, durch Windkraft erzeugt wurde, aus der Verfeuerung von Kohle stammt oder mittels Photovoltaik gewonnen wurde. Selbiges gilt für Treibstoff. Solange er chemisch identisch ist, unterscheidet sich Biokraftstoff funktional nicht von aus Rohöl raffiniertem Benzin. Mithilfe dieses Beispiels wird unmittelbar einsichtig, warum derart verstandene Diversität die generische Anpassungsfähigkeit und somit die Resilienz des Energiesystems erhöht. Je diverser die funktional äquivalenten Gruppen ausgestaltet sind, je mehr unterschiedliche Möglichkeiten es innerhalb eines Systems gibt, bestimmte Funktionen – vor allem die oben diskutierten kritischen Funktionalitäten – zu erfüllen, desto unwahrscheinlicher wird es, dass ein zufällig und unerwartet auftretendes widriges Ereignis alle unterschiedlichen Systembestandteile gleichzeitig betrifft. Für den Bereich der Stromversorgung kann von einer gewissen Diversität bzgl. der Produktion von Strom ausgegangen werden. Ganz anders sieht es hingegen bei der Verteilung aus. Hier besteht eine sehr große Abhängigkeit von der Funktionsfähigkeit des Hoch- und Höchstspannungsnetzes, dessen Ausfall kaum kompensiert werden kann. Allerdings bieten sich dann wiederum andere Prinzipien wie Dezentralität und Modularität an, um das System trotzdem resilient zu gestalten.

Diversität findet sich als Prinzip auch bereits in der ingenieurwissenschaftlichen Resilienzforschung. Dort wird Diversität neben einigen anderen Prinzipien als geeignet angesehen, um die Resilienz von Systemen zu erhöhen. Diversität ist dazu in der Lage „systemic adaptability and innovation" innerhalb von Systemen zu stärken und somit deren Resilienz (Helbing 2013: 55). Laut Autoren wie Helbing funktioniert das Prinzip mittels unterschiedlicher Mechanismen. Je größer die Diversität eines Systems, desto wahrscheinlicher existieren beim Eintritt disruptiver Ereignisse Bereiche, die nicht durch das Ereignis betroffen sind, deren Fehlermechanismen eben andere sind. Und gleichzeitig erhöht Diversität auch die Chance, dass geeignete Lösungsmöglichkeiten bereits im System vorhan-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

den sind, die zur Bewältigung der Folgen disruptiver Ereignisse genutzt werden können (Helbing 2015). Das erinnert nicht nur zufällig an die Erkenntnisse der system- und komplexitätstheoretischen Analyse von Resilienz. Das Prinzip der Diversität taucht in ähnlicher Weise auch bereits bei Lovins und Lovins auf, denen zufolge größere Diversität die Wahrscheinlichkeit reduziert, dass einzelne Fehlermechanismen das ganze System lahmzulegen imstande sind. Das wird durch eine Heterogenität der Systemkomponenten möglich. Sie bezeichnen Diversität auch als funktionale Flexibilität (Lovins/Lovins 2001: 192ff). Vor dem Hintergrund des system- und komplexitätstheoretischen Verständnisses von Flexibilität ist das sehr interessant. Dort wird Flexibilität als das Vorhandensein eigentlich extrem unerwartbarer Prozesse an Anschlussmöglichkeiten, die dem System das Einschwenken auf einen neuen, leistungserhaltenden Entwicklungspfad ermöglichen, definiert. Das lässt sich durchaus mit dem Diversitätsprinzip in Übereinstimmung bringen. Je heterogener das System, desto diverser ist es. Je heterogener das System, desto mehr Prozesse an Anschlussmöglichkeiten existieren aber auch. Insgesamt finden sich zwischen dem aus der Ökologie stammenden Prinzip der Diversität, seiner Anwendung in der ingenieurwissenschaftlichen Resilienzforschung und den aus der system- und komplexitätstheoretischen Analyse von Resilienz gewonnenen Erkenntnissen sehr große Übereinstimmungen. Insofern sind die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit konsistent mit existierenden Ansätzen. Und es lässt sich sehr deutlich festhalten, dass größere Diversität eine erstrebenswerte Systemeigenschaft darstellt, wenn das betreffende System resilienter gestaltet werden soll. All das führt zu einem weiteren Prinzip, das Bestandteil von Resilience Engineering sein sollte. Um die Resilienz komplexer adaptiver Systeme auf ingenieurwissenschaftliche Weise zu erhöhen, sollten Wege erforscht werden, die Diversität dieser Systeme zu erhöhen. Und zwar die Diversität innerhalb funktional äquivalenter Gruppen. Einfach nur möglichst unterschiedliche Agenten innerhalb eines Systems erhöhen noch nicht notwendigerweise dessen Diversität, so wie sie hier verstanden wird. Ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung besteht also auch in der Identifikation der funktional äquivalenten Gruppen und der Entwicklung von möglichst heterogenen Systemkomponenten, welche dieselbe Funktion erfüllen. In einer Hypothese für Resilience Engineering zusammengefasst, lässt sich sagen:

> *Hypothese H31: Diversität, verstanden als Vorhandensein funktional äquivalenter Gruppen, zusammengesetzt aus möglichst verschiedenartigen Agenten, ist ein geeignetes Designprinzip, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.*

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Skalenübergreifende Redundanz bedeutet das Vorhandensein funktional äquivalenter Systemelemente, die sich in ihrer Abhängigkeit von unterschiedlichen widrigen Ereignissen unterscheiden. Je mehr skalenübergreifende Redundanzen vorhanden sind, desto größer ist die generische Anpassungsfähigkeit komplexer adaptiver Systeme.

Diese Definition von Redundanz als Bestandteil des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo liest sich im Prinzip eins zu eins wie das Verständnis von Diversität, das gerade diskutiert wurde. Um für Resilience Engineering eine Abgrenzung zwischen Diversität und Redundanz zu ermöglichen, bedarf es also einer näheren Untersuchung. Zunächst verwundert aber die Platzierung der Diskussion von Redundanz im Kontext von Resilience Engineering. Denn Redundanz wird als eines der wenigen Prinzipien in jeder dem Autor bekannten Aufzählung von Prinzipien zur Erhöhung von Resilienz genannt. Und Redundanz kommt häufig an erster oder zumindest vorderer Stelle zur Sprache (Jackson/Ferris 2013: 5, Madni/Jackson 2009: 189). In der vorliegenden Arbeit wird es dagegen als letztes Prinzip untersucht. Das sagt jedoch nichts über die dem Prinzip zugemessene Bedeutung aus, sondern resultiert einzig aus den Ergebnissen der system- und komplexitätstheoretischen Analyse von Resilienz. Daraus konnte Redundanz, bzw. genauer gesagt skalenübergreifende Redundanz, neben der Diversität als zweites fundamental wichtiges Systemprinzip bereits für das Resilienz-Konzept an sich identifiziert werden. Gleichzeitig kann Redundanz trotz seiner zentralen Bedeutung für die Umsetzung von Resilienz nach der ausführlichen theoretischen Betrachtung in der vorliegenden Arbeit keinesfalls mit Resilienz gleichgesetzt werden. Resilienz ist definitiv sehr viel mehr als Redundanz (Brunner/Giroux 2009: 8). Das wird auch in der ingenieurwissenschaftlichen Resilienzforschung durchgängig so gesehen. Dort wird unter Redundanz ganz grundsätzlich das Vorhandensein von Alternativen, von Ausweichmöglichkeiten verstanden, ein Backup-System, das parallel zum primären System läuft und einen „safe fallback level" garantiert. Oder noch anders gefasst, latent vorhandene Möglichkeiten, auf die bei Bedarf zurückgegriffen werden kann (Brunner/Giroux 2009: 8, Cimellaro et al. 2010: 3641, Helbing 2013: 55, Wink 2011: 115). Vor allem der Begriff des Backups weist dabei auf das spezifische Charakteristikum von Redundanz hin. Redundante Systembestandteile sind für den normalen Betrieb des Systems nicht erforderlich. Das System kann seine volle Leistung im Normalzustand auch ohne das Vorhandensein von Redundanz erbringen. Insofern entsteht unmittelbar ein mindestens scheinbarer Zielkonflikt zwischen der für Resilienz notwendigen Redundanz einerseits und der aus ökonomischen Gesichtspunkten häufig geforderten – und im

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Wettbewerb benötigten – Effizienz. Redundanz ist per definitionem ineffizient, eine Vergeudung von Ressourcen, die anderweitig besser und sinnvoller zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Systems eingesetzt werden könnten. Daher ist es häufig sehr schwer, verantwortliche Stellen von der Notwendigkeit von Redundanz im System zu überzeugen (Brunner/Giroux 2009: 8, Lovins/Lovins 2001: 44). Mögliche Zielkonflikte zwischen Resilienz und Effizienz wurden in der vorliegenden Arbeit an mehreren Stellen bereits adressiert und mit Blick auf die Grenzen des Resilienz-Konzepts diskutiert. Dass es trotz vermeintlicher Ineffizienz langfristig gesehen sehr sinnvoll sein kann, in Resilienz zu investieren, hat die gesamte Diskussion deutlich gezeigt (siehe 5.4).

Bei der Frage nach einer Abgrenzung zwischen Diversität und Redundanz kann der Rückgriff auf den gerade genannten Begriff des Backups aber sehr hilfreich sein. Diversität bedarf nicht notwendigerweise mehrfach vorhandener Systembestandteile, die nicht durchgängig genutzt werden. Das Beispiel des Energienetzes hat das gezeigt. Dieses kann durchaus sehr große Diversität aufweisen im Hinblick auf die zur Versorgung der Bevölkerung mit Strom genutzten Quellen. Das führt aber nicht notwendigerweise zu Redundanz. Das System weist auch dann hohe Diversität auf, wenn die unterschiedlichen Quellen zur Stromversorgung in effizienter Weise gerade ausreichen, um die Bevölkerung zu versorgen und keine zusätzlichen, redundanten und für die normale Funktionsfähigkeit nicht benötigten Reservekapazitäten enthalten. Diversität lässt sich auch als „avoid fate sharing", „so that the same fate is unlikely to be shared by parts of the system undergoing correlated failures" zusammenfassen (Sterbenz et al. 2010: 1247, 1256). Redundanz ist dagegen ein prinzipiell nicht benötigter Zusatz an Ressourcen, der spezifisch darauf ausgelegt ist, beim Wegfall der eigentlich dafür vorgesehenen Systemkomponenten sozusagen einzuspringen und die kritische Funktionalität so gut es geht aufrechtzuerhalten. Neben dem klassischen Beispiel der Datensicherung, bei dem die exakt gleichen Daten an mehreren, physikalisch und häufig auch geographisch unterschiedlichen Stellen gespeichert werden und nur bei Verlust des primären Speicherorts auf die Sicherungskopien zurückgegriffen wird, stellt auch die Notstromversorgung kritischer Systeme einen sehr bekannten und geübten Anwendungsfall für Redundanz dar. Besonders eindrücklich lässt sich das am Beispiel von Kernkraftwerken veranschaulichen. Diese müssen auch dann, wenn sie selbst nicht laufen, zur Kühlung der Brennelemente ständig mit Strom versorgt werden und sind daher an das öffentliche Stromnetz angeschlossen. Sollte das Netz versagen, verfügen Kernkraftwerke über netzunabhängige Stromerzeugungs-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

aggregate, zumeist Dieselgeneratoren, mit deren Hilfe sie einen sicheren Zustand aufrechterhalten können. Sogar die Dieselgeneratoren sind selbst redundant ausgelegt, nicht alle vorhandenen werden gleichzeitig benötigt, um die Kühlung der Brennelemente sicherzustellen. Sehr sicherheitskritische Systeme wie Kernkraftwerke verfügen also über ein großes Maß an Redundanz. Allerdings bedarf die gerade beschriebene Notkühlung einer konstanten Versorgung mit Dieselkraftstoff, die im Falle eines langanhaltenden und großflächigen Stromausfalls ebenfalls sehr schwer zu garantieren werden könnte. Deshalb wäre es sinnvoll, auch noch andere, funktional äquivalente Möglichkeiten im Sinne von Redundanz vorhalten zu können. In einem fiktiven Beispiel könnten das Photovoltaik- und Windkraftanlagen kombiniert mit einem stationären Energiespeicher in Form großer Batterien sein, die ergänzend zu Dieselgeneratoren die Notstromversorgung garantieren könnten.

Das weist darauf hin, dass es unterschiedliche Arten von Redundanz gibt. In der system- und komplexitätstheoretischen Analyse etwa wurde skalenübergreifende Redundanz als relevant für Resilienz identifiziert. Dieser Ansatz wurde auf komplexe adaptive Systeme generell verallgemeinert. Führt ein widriges Ereignis zum Ausfall bestimmter Agenten, kann das System trotzdem weiterfunktionieren, wenn funktional äquivalente Agenten vorhanden sind, die nicht selbst durch das widrige Ereignis betroffen sind. Deshalb ist Redundanz über verschiedene Skalen hinweg sinnvoll, eben gerade verstanden als unterschiedliche Abhängigkeit bzw. Betroffenheit von widrigen Ereignissen. Im geschilderten Beispiel des Kernkraftwerks hängen Photovoltaik-Anlage und Dieselgeneratoren von sehr unterschiedlichen Bedingungen ab und sind jeweils unterschiedlich anfällig für bestimmte widrige Ereignisse. Ergebnis der Analyse war dann ein positiver Zusammenhang zwischen skalenübergreifender Redundanz und generischer Anpassungsfähigkeit. Je mehr skalenübergreifende Redundanzen in einem System vorhanden sind, desto größer ist seine generische Anpassungsfähigkeit – und damit seine Resilienz.

In der ingenieurwissenschaftlichen Resilienzforschung wird nicht von skalenübergreifender Redundanz gesprochen, sondern von physischer Redundanz einerseits und funktionaler Redundanz andererseits. Physische Redundanz ist dabei das Vorhalten mehrfach vorhandener, aber identischer Systemkomponenten, die beim Ausfall der primären Komponente diese substituieren können. Das trifft auf Dieselgeneratoren zur Notstromversorgung klassischerweise zu, oder auch auf Datensicherung durch regelmäßige Backups. Dieses Prinzip der physischen Redundanz wird im Bereich der Ingenieurwissenschaften durchgängig als sinnvoll und wir-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

kungsvoll verstanden und beschrieben und dieser Einschätzung schließt sich auch die vorliegende Arbeit grundsätzlich an (Jackson/Ferris 2013: 5, Madni/Jackson 2009: 189). Physische Redundanz funktioniert erst einmal unabhängig davon, welches konkrete widrige Ereignis das System trifft, sie ist ein generischer Mechanismus. Fällt eine kritische Systemkomponente aus, wird sie umgehend durch eine vorgehaltene, gleichartige ersetzt und das System kann seine kritischen Funktionalitäten weiter erbringen. Physische Redundanz hat jedoch auch Grenzen in ihrer sinnvollen Anwendbarkeit, wie ebenfalls bereits geschildert wurde und wie auch Linkov und Kott für den Bereich der Cybersicherheit veranschaulichen. Wenn identische redundante Systemkomponenten genutzt werden, sind diese eben auch gegenüber denselben widrigen Ereignissen anfällig (Linkov/Kott 2019: 13). Daher kann Resilience Engineering nicht ohne die zweite Art von Redundanz gedacht werden, die so genannte funktionale Redundanz. Funktionale Redundanz entspricht im Prinzip der Idee der skalenübergreifenden Redundanz. Einfach formuliert sollte es immer mindestens zwei Wege geben, kritische Aufgaben zu erfüllen (Jackson/Ferris 2013: 5). Der Fokus liegt auf der mehrfach vorhandenen Fähigkeit zur Erfüllung der kritischen Funktionalitäten – aber auf unterschiedliche Weisen. Das ist eng mit dem Diversitätsverständnis der vorliegenden Arbeit verknüpft, entspricht ihm aber aus den oben genannten Gründen nicht. Wenn kritische Systemkomponenten funktional redundant ausgelegt sind, sind sie von unterschiedlichen Fehlermechanismen abhängig (Altherr et al. 2018: 193, Madni/Jackson 2009: 189). Das erhöht die generische Anpassungsfähigkeit der entsprechenden Systeme. Insgesamt gesehen sollte ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung, sollte Resilience Engineering, unter anderem darin bestehen, die physische und funktionale Redundanz der Systemelemente der für die zivile SiFo relevanten komplexen adaptiven sozio-technischen Systeme zu erhöhen, die für die Aufrechterhaltung der kritischen Funktionalitäten dieser Systeme bei Eintreten gravierender und unerwarteter disruptiver Ereignisse verantwortlich sind. Die Hypothese für Resilience Engineering lautet dann:

> *Hypothese H32: Physische und funktionale Redundanz, verstanden als das zusätzliche Vorhandensein für die Funktionsfähigkeit im Normalfall nicht benötigter, entweder physisch oder funktional gleicher Systemkomponenten, sind geeignete Designprinzipien, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.*

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

6.6. Normative Aspekte für Resilience Engineering

Die Erhöhung der Resilienz eines Systems ist genau dann normativ wünschenswert, wenn die zugrundeliegende Identität des Systems normativ wünschenswert ist. Ob Lösungen zur Erhöhung der Resilienz eines Systems erforscht und entwickelt werden sollten, hängt von vorgelagerten gesellschaftlichen und politischen Aushandlungsprozessen zur normativen Erwünschtheit des Systems ab.
&
Selbst, wenn ein System grundsätzlich normativ wünschenswert ist, gilt es bei der Entwicklung von Strategien zur Erhöhung seiner Resilienz darauf zu achten, dass möglicherweise bestehende Ungerechtigkeiten nicht perpetuiert oder sogar verstärkt werden.
&
Lösungen zur Erhöhung der Resilienz eines Systems müssen einer Proportionalität im Hinblick auf das angemessene Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen entsprechen, über deren Ausgestaltung ebenfalls in vorgelagerten gesellschaftlichen und politischen Aushandlungsprozessen entschieden werden muss.
&
Resilienz lässt sich normativ als starkdemokratische Sicherheit verstehen. Mit „starkdemokratisch" sind dabei nach Barber Strukturen gemeint, die eine aktive, transparente und partizipative Rolle von Bürgern bei gesellschaftlichen und politischen Aushandlungsprozessen bzgl. der normativen Erwünschtheit relevanter Systeme ermöglichen.
&
Politikwissenschaftlich gesprochen besteht Resilienz dann normativ in einer durch Verantwortungsannahme aktiver Bürger möglich werdenden Aufrechterhaltung gesellschaftlicher Freiheiten bei gleichzeitiger Erhöhung der Sicherheit.
&
Resilienz besteht nicht darin, aufgrund der Unsicherheit künftiger Ereignisse eine Strategie der Vorsicht im Sinne vorbeugender Freiheitseinschränkung anzuwenden.
&
Resilienz besteht nicht darin, aufgrund der Unsicherheit künftiger Ereignisse eine Strategie der Präemption im Sinne der Aushöhlung von Freiheit durch aktivistische Maßnahmen anzuwenden.

Das eigenständige Resilienz-Konzept der zivilen SiFo, das in der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde, enthält neben den aus der system- und komplexitätstheoretischen Analyse stammenden Bestandteilen auch eine ganze Reihe stärker normativ geprägter Annahmen. Diese sind unabdingbar für das stark interdisziplinär geprägte Anwendungsfeld der zivilen Si-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Fo. Gegeben ihre im Wesentlichen rein sozialwissenschaftliche Herleitung ist es aber nicht möglich, ähnlich konkrete Hypothesen für Resilience Engineering daraus abzuleiten, wie etwa beispielsweise mit Blick auf die konkreten Prinzipien Redundanz, Diversität, Modularität und Dezentralität. Vielmehr kann die Übersetzungsleistung zwischen den normativen Aspekten des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo und Resilience Engineering nur in einer Art Bewusstseinsbildung bestehen. Ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung sollte nur dann dazu beitragen, die Resilienz bestimmter, komplexer adaptiver Systeme zu erhöhen, wenn diese nicht im Widerspruch zu den Werten stehen, die in vorgelagerten gesellschaftlichen und politischen Aushandlungsprozessen vereinbart wurden. Das ist eine Quintessenz aus all den hier skizzierten normativen Bestandteilen von Resilienz. Mithilfe von Resilienz kann und soll primär die Sicherheit der Gesellschaft erhöht werden. Gesellschaften sollen dank Resilienz besser mit unerwarteten, überraschend auftretenden und gravierenden disruptiven Ereignissen umzugehen in der Lage sein. Sicherheit zu erhöhen bzw. Sicherheit aufrechtzuerhalten, dazu beizutragen, Sicherheit als gesellschaftlichen Wert zu verstehen und mittels adäquater Ideen und Lösungen zu verstetigen, wurde als grundlegendes Ziel und grundlegender Daseinszweck der zivilen SiFo definiert (siehe 1.2). Sicherheit ist aber, wie die normative Analyse des Resilienz-Konzepts gezeigt hat, ganz sicher nicht der einzige Wert, den Gesellschaften als fundamental wichtig erachten. Als mindestens gleichrangig wurde im Kontext der Diskussion der Wert der Freiheit definiert. Und durch die Interpretation von Resilienz als einer Art starkdemokratischer Sicherheit konnte eine Verknüpfung zwischen Sicherheit und Freiheit aufgezeigt werden. Wenn Resilienz im Sinne der vorliegenden Arbeit verstanden wird, führt eine Erhöhung von Resilienz rein gesellschaftlich gesprochen nicht zu einer Einschränkung von Freiheit. Der entscheidende Prozess ist hier die Verantwortungsannahme durch aktive Bürger, die selbst darüber entscheiden, welche Balance zwischen Freiheit und Sicherheit sie für richtig erachten. Und die selbst darüber entscheiden, welche Systeme und Systembestandteile sie als normativ negativ oder aber normativ wünschenswert werten. Dazu bedarf es geeigneter demokratischer Prozesse. Dazu müssen die genannten gesellschaftlichen und politischen Aushandlungsprozesse so ausgestaltet sein, dass sich Bürger aktiv und sinnvoll daran beteiligen können. Zumal Resilienz mit Kosten verbunden ist. Resilienz zu erhöhen, erfordert den Einsatz knapper Ressourcen, die dann nicht mehr für andere, gesellschaftlich gewünschte Zwecke verwendet werden können.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Was heißt das für Resilience Engineering? Zunächst sollte festgehalten werden, dass ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung kein Selbstzweck sein kann und sich außerdem auch nicht selbst genug sein kann. Ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung sollte nur dann Systeme resilient gestalten, wenn es gesellschaftlich gewünscht ist. Und die Ingenieurwissenschaften an sich verfügen nicht über die notwendigen Methoden und Instrumente, um über die gesellschaftliche, die normative Erwünschtheit des Systems und seiner konkreten Ausgestaltung zu entscheiden. Sie sind auf eine enge Zusammenarbeit mit den Sozialwissenschaften angewiesen. Resilienz ist insofern tatsächlich genau jene Art von boundary object oder Brückenkonzept, auf das bereits in der Einleitung der vorliegenden Arbeit verwiesen wurde (siehe 1.1). Und das unterscheidet Resilience Engineering auch von klassischen ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen, die häufig ohne einen Rückbezug auf gesellschaftliche Fragestellungen von einem technologischen Problem ausgehen, welches mithilfe ebenfalls technologischer Lösungsoptionen behoben werden soll und kann. Eher in diesem Sinne formulieren zum Beispiel Perrig et al., wenn sie sagen „security must pervade every aspect of system design" (Perrig et al. 2004: 54). Aus rein technischer Sicht und mit der Zielstellung einer Maximierung der Sicherheit ein sinnvoller Hinweis. Als Teil von Resilience Engineering sollte eine solche Maxime aber nicht gesehen werden, da sie zu einseitig die Sicherheit von Systemen betont, ohne die Konsequenzen einer derartigen Fokussierung auf andere, für das System bzw. die Gesellschaft relevante Werte zu berücksichtigen.

Resilience Engineering weist insgesamt also durchaus einen dominanten Fokus auf Technologie auf. Ansonsten wäre es weder notwendig noch sinnvoll, von Resilience Engineering zu sprechen. Im Unterschied zu einer rein technologischen Sichtweise umfasst Resilience Engineering aber die Möglichkeiten, die sich aufgrund der Funktion des Resilienz-Konzepts als boundary object bieten und nutzt bewusst auch sozialwissenschaftliche Erkenntnisse. Und zwar nicht nur im Sinne vorgelagerter Prozesse, sondern sehr stark auch im Sinne einer Bewertung der Auswirkungen der Entwicklung und Umsetzung ingenieurwissenschaftlicher Ideen und Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz komplexer adaptiver Systeme. Das entspricht einer konstanten Rückbindung ingenieurwissenschaftlicher Erkenntnisse an die durch gesellschaftliche und politische Aushandlungsprozesse gesetzten Rahmenbedingungen, denen Lösungen entsprechen sollten, wenn sie als resilienzerhöhend gelten wollen. Gerade in der zivilen SiFo entspricht ein solches, interdisziplinäres Vorgehen mittlerweile durchaus der favorisierten und häufig praktizierten Herangehensweise und

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

stellt insofern kein Spezifikum von Resilience Engineering dar. Auch in anderen ingenieurwissenschaftlichen Bereichen werden gesellschaftliche Konsequenzen der Entwicklung und Anwendung neuer Technologien immer stärker von Beginn an mitgedacht. Das kann weniger stark für grundlagenorientierte Wissenschaft gelten, die zunächst die Frage beantworten möchte, was überhaupt wissenschaftlich möglich ist. Für anwendungsnahe Gebiete wie die zivile SiFo und ganz sicher für Resilience Engineering ist eine solche Kombination rein ingenieurwissenschaftlicher Forschung mit Orientierungswissen aus den Sozialwissenschaften aber unerlässlich. Für Resilience Engineering ergibt sich daraus die folgende Hypothese:

> *Hypothese H33: Resilience Engineering zeichnet sich durch eine Kombination aus Technologiefokus einerseits und der Berücksichtigung und konsequenten Einbeziehung sozialwissenschaftlich vermittelter normativer Aspekte andererseits aus.*

Auch Systeme, deren zugrundeliegende Identität sich durch unfreie Strukturen auszeichnet, scheinen in der Lage zu sein, Resilienz gegenüber disruptiven Ereignissen auszubilden.

Diese grundsätzliche Erkenntnis wird von den meisten sozialwissenschaftlichen Ansätzen der Resilienzforschung geteilt. Empirisch lässt sich die Resilienz von Systemen, die auf unfreien Strukturen basieren, leicht an diversen im Lauf der Geschichte aufgetretenen despotisch herrschenden Diktatoren demonstrieren, etwa Fidel Castro, Saddam Hussein oder ganz aktuell auch Baschar al-Assad. Dann ist mit Resilienz die Fähigkeit des Systems an sich gemeint, sich politischen und wirtschaftlichen Veränderungen so anzupassen, dass die eigene Herrschaft gesichert bleibt. Hier geht es aber um die Resilienz derart unfreier Systeme gegenüber disruptiven Ereignissen. Wenn Menschen durch den Glauben an einen fundamentalistischen Führer vereint sind, können sie durchaus ein starkes Kohärenzgefühl ausbilden und so über generalisierte Widerstandsressourcen verfügen, die ihnen ermöglichen, disruptive Ereignisse gut zu überstehen. Das ist der Fall, weil die Bevölkerung die Realität mithilfe der vorgegebenen Ideologie als sinnhaft, handhabbar und bedeutsam begreift, deshalb zur Ordnung des Alltags weniger Ressourcen benötigt und diese im Fall des Auftretens eines widrigen Ereignisses nutzen kann (Antonovsky 1997: 104). Inwiefern dies zutrifft, oder ob diktatorische Herrschaftsformen aufgrund mangelnder Flexibilität nicht doch eher zu weniger Resilienz führen, kann nur sozial- und nicht ingenieurwissenschaftlich untersucht werden. Nichtsdestotrotz ergeben sich auch für Resilience Engineering aus dieser Analyse interessante Überlegungen. Nämlich die nach der Anwendbarkeit von Ergebnissen

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung auch in Gesellschaften, deren Strukturen sich durch Unfreiheit auszeichnen oder jedenfalls nicht dem entsprechen, was in einer starkdemokratischen Sichtweise als normativ wünschenswert erachtet wird. Indem Ergebnisse ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung auch in unfreien Gesellschaften Anwendung finden, könnten sie mindestens indirekt dazu beitragen – wenn diese Gesellschaften disruptive Ereignisse besser überstehen, als ohne Resilienz – die Unfreiheit zu perpetuieren. Allerdings führen sie gleichzeitig auch zu einer Reduktion von Schäden, die sich zumeist in Todesopfern und verletzten Personen ausdrücken. Insofern lässt sich eine Nutzung von Ergebnissen ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung in unfreien Gesellschaften erstens nicht vermeiden und führt zweitens auch dort – wenigstens in Bezug auf das eingetretene disruptive Ereignis – zu einer Verringerung menschlichen Leids. Für Resilience Engineering heißt das:

> *Hypothese H34: Dass die Ergebnisse von Resilience Engineering sich auch in Gesellschaften anwenden lassen, deren innere Strukturen durch Unfreiheit gekennzeichnet sind, lässt sich ingenieurwissenschaftlich nicht ausschließen, führt aber auch in solchen Gesellschaften grundsätzlich zunächst zu einer wünschenswerten Verringerung menschlichen Leids.*

Eine unreflektierte Übernahme des Resilienz-Begriffs birgt die Gefahr, diesen als neoliberales Paradigma einer Verantwortungsverlagerung vom Staat auf den einzelnen Bürger misszuverstehen. Die Verwendung des Resilienz-Konzepts in der zivilen Sicherheitsforschung darf nicht dazu führen, dass von widrigen Ereignissen betroffenen Personen und Gruppen die Verantwortung für erlittene Schäden zugeschrieben wird.

Das Motiv einer unzulässigen Verlagerung der Verantwortung für Vorsorge, Vorbereitung, Abwehr und Erholung bzgl. gravierender, widriger Ereignisse vom Staat auf den einzelnen Bürger ist vor allem in der sozialwissenschaftlichen Forschung in Deutschland präsent. In einer polemischen Zuspitzung wird Resilienz dort teilweise in den größeren Kontext einer „Weltanschauung des Individualismus“ eingeordnet und als normativ negativ zu verstehendes, neoliberales Konzept gefasst. Die Analyse der vorliegenden Arbeit hat gezeigt, dass ein solches Resilienz-Verständnis international nicht anschlussfähig ist. Zwar basiert es auf einer durchaus sehr verbreiteten Sichtweise auf das Thema Resilienz, die unter dem Stichwort community resilience firmiert. Allerdings betonen die meisten Forscher, die in diesem Bereich tätig sind, die Chancen, die sich daraus ergeben, Menschen zu befähigen, mit gravierenden widrigen Ereignissen besser umgehen zu können. Die Aufgabe der Resilienzforschung kann und

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

sollte demzufolge darin bestehen, Ideen und Ansätze zu entwickeln, mit deren Hilfe diese community resilience erhöht werden kann. Legt man dieser Einsicht das Resilienz-Konzept der zivilen SiFo zugrunde, geht es unter anderem um die Frage, wie die generische Anpassungsfähigkeit von Menschen sich verändern lässt. Und zwar zum einen ganz generell, da prinzipiell jeder von widrigen Ereignissen betroffen sein könnte. Darüber hinaus aber auch spezifisch, wenn es etwa um Personen geht, die verantwortlich für Management und Betrieb kritischer Infrastrukturen sind. Zu dieser Aufgabe können zweifelsohne die Sozialwissenschaften, aber auch die Psychologie und die Organisationswissenschaften erheblich beitragen. Es stellt sich die Frage, ob das auch für die Ingenieurwissenschaften gilt. Aus Sicht der vorliegenden Arbeit muss diese Frage bejaht werden. Zwar können ingenieurwissenschaftliche Ansätze nicht direkt die generische Anpassungsfähigkeit von Menschen erhöhen. Es ist aber möglich, technologische und sozio-technische Systeme und Lösungen zu entwickeln, welche es betroffenen Personen und verantwortlich Handelnden ermöglichen und leichter machen, ihre generische Anpassungsfähigkeit im Fall des Eintretens eines gravierenden widrigen Ereignisses besser nutzen zu können (Lechner et al. 2016: 84). Ein Beispiel dafür könnte im Bereich der kritischen Infrastrukturen etwa die Bereitstellung zuverlässiger Echtzeitinformationen sein, die mithilfe geeigneter Sensortechnologien einerseits und nutzerfreundlicher Visualisierungsmethoden gestützt durch Modelle zur Simulation komplexer adaptiver Systeme andererseits erfolgen könnte. Auf diese Weise verfügen die Verantwortlichen auch im Ausnahmefall über das benötigte Wissen zum aktuellen Zustand ihres Systems. Stärker auf der Ebene von Einzelpersonen bzw. Gruppen von Personen gedacht, könnten redundant ausgelegte Notstromaggregate helfen, sich auf das Eintreten widriger Ereignisse vorzubereiten. Einfacher wäre es an dieser Stelle aber vermutlich, bei der Installation von Photovoltaik-Anlagen auf Dächern die technische Möglichkeit zu schaffen, den erzeugten Strom direkt zu nutzen und ihn nicht notwendigerweise ins Stromnetz einspeisen zu müssen. Insgesamt bieten sich eine Vielzahl an Ansätzen und Möglichkeiten, über deren konkrete Ausgestaltung und Umsetzung sinnvollerweise in interdisziplinären Teams entschieden werden sollte. Für Resilience Engineering lässt sich festhalten:

> *Hypothese H35: Resilience Engineering besteht auch darin, Verantwortlichen und Betroffenen mithilfe technologischer und sozio-technischer Lösungen dabei zu helfen, ihre generische Anpassungsfähigkeit zu erhöhen.*

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Strategien zur Erhöhung der Resilienz der für die zivile SiFo relevanten soziotechnischen Systeme müssen als Angebote formuliert werden, die für die Gesellschaft einen klaren, über ohnehin erfolgende Maßnahmen des Bevölkerungsschutzes und der Katastrophenhilfe hinausgehenden, Mehrwert haben.

In konsequenter Weiterführung der gerade geschilderten Diskussionen gilt an dieser Stelle die Annahme, dass ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung dazu da ist, mögliche, technologische Lösungsvorschläge zur Erhöhung der Resilienz der relevanten Systeme zu entwickeln und deren Anwendung vorzuschlagen. Außerdem geht es darum, betroffene Personen oder verantwortlich Handelnde durch innovative technologische und sozio-technische Lösungen darin zu unterstützen, ihre generische Anpassungsfähigkeit zu erhöhen bzw. möglichst gut nutzen zu können. Gleichzeitig wurde aus der bisherigen Diskussion aber auch deutlich, worum es bei Resilience Engineering nicht geht. Nämlich darum, Entscheidungen über den tatsächlichen Einsatz, über die konkrete Umsetzung der erforschten und entwickelten Lösungen zu treffen. Die Verantwortung dafür, derartige Entscheidungen zu treffen, lässt sich nicht sinnvollerweise als Teil von Resilience Engineering fassen. Wie im Unterkapitel zum Stand der Forschung im Bereich ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung formuliert wurde, entwickeln Ingenieure Lösungen. Basierend auf Missständen, die ihnen von gesellschaftlicher Seite aufgezeigt werden bzw. die sie selbst mithilfe technologischer Methoden identifizieren – auch das im Zweifel im Auftrag anderer gesellschaftlicher Akteure – entwickeln sie Mechanismen und Methoden, um den Missständen entgegenzuwirken (siehe 2.6). Darin liegt die Verantwortung der Ingenieurwissenschaften. Darin erschöpft sich aber auch die Verantwortung der Ingenieurwissenschaften. Ob und inwiefern die von ihnen entwickelten Lösungen im realen Umfeld eingesetzt werden, kann nicht ingenieurwissenschaftlich entschieden werden. In leichter Abwandlung des gerade aufgezeigten Aspekts des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo, wonach Strategien zur Erhöhung der Resilienz als Angebote formuliert werden müssen, lässt sich selbiges eben auch für ingenieurwissenschaftliche Lösungen zur Erhöhung von Resilienz sagen. Diese unterliegen gesellschaftlichen und politischen Aushandlungsprozessen, die wiederum unter anderem auf vorgelagerten Wertentscheidungen beruhen. Nichtsdestotrotz spielt Resilience Engineering auch in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Strategien oder Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz müssen einen klar erkennbaren Mehrwert haben, um implementiert zu werden. Das ist eine logische und sicherlich weithin akzeptable Schlussfolgerung der normativen Analyse der vorliegenden Arbeit. Inwiefern das aber auf konkrete, ingenieurwissenschaftli-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

che Lösungsvorschläge zutrifft, ist nicht einfach zu erkennen. Im Bereich der komplexen adaptiven Systeme, indem sich ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung notwendigerweise bewegt, sind ja gerade keine einfachen und offensichtlichen Kausalitäten am Werk. Zu verstehen, warum eine bestimmte Maßnahme zu einem bestimmten Resultat führen sollte ist – wenn überhaupt möglich – alles andere als trivial. Um informierte Entscheidungen treffen zu können, benötigen Entscheidungsträger, von einzelnen Bürgern über Rettungskräfte und Betreiber kritischer Infrastrukturen bis hin zur ganzen Gesellschaft, aber möglichst zuverlässige Informationen darüber, wie sich die Umsetzung bestimmter Lösungsvorschläge auf die jeweiligen Systeme auswirkt. Hier kommt Resilience Engineering ins Spiel. Auch wenn sich die Auswirkungen bestimmter Maßnahmen in komplexen adaptiven Systemen nicht deterministisch vorhersagen lassen, verfolgen ja die Ingenieurwissenschaften mit deren Entwicklung bestimmte Ziele. Sie versuchen, bestimmte Missstände mithilfe ihnen technologisch geeignet erscheinender Ansätze zu beseitigen bzw. dem System zu ermöglichen, erfolgreicher damit umgehen zu können. Aufgrund ihrer fachlichen Expertise haben sie dabei einen notwendigen und sehr großen Wissensvorsprung vor Entscheidungsträgern. Insofern besteht Resilience Engineering auch ein Stück weit aus einer Informationsfunktion. Bei der Entwicklung technologischer Lösungen zur Erhöhung der Resilienz der Gesellschaft bzw. relevanter komplexer adaptiver Systeme innerhalb der Gesellschaft, kommt es auch darauf an, in systematischer Weise allgemein verständliches und zugängliches Wissen zur Funktionsweise der Lösungen mitzudenken und vorzuhalten. Mit dessen Hilfe können die zuständigen Entscheidungsträger informierte und damit bessere Entscheidungen über deren Anwendung treffen. Als Hypothese resultiert daraus:

> *Hypothese H36: Resilience Engineering umfasst eine Informationsfunktion, die darin besteht, allgemein verständliches Wissen über die Funktionsweise technologischer Lösungen zur Erhöhung von Resilienz zu entwickeln, mit dessen Hilfe gesellschaftliche Akteure informierte Entscheidungen über deren Anwendung treffen können.*

Vertrautheit als Orientierung am Gewesenen und Bekannten ist kein Mechanismus zur Erhöhung der Resilienz der für die zivile SiFo relevanten, komplexen adaptiven sozio-technischen Systeme.
&
Je größer die Resilienz eines komplexen adaptiven Systems ist, desto größer ist das ihm entgegengebrachte Systemvertrauen. Gleichzeitig gilt: Je stärker das Systemvertrauen ausgeprägt ist, desto größer ist die Resilienz des Systems.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

&
Strategien zur Erhöhung der Resilienz der für die zivile SiFo relevanten soziotechnischen Systeme müssen so ausgestaltet sein, dass sie sich positiv zumindest aber nicht negativ auf das Vertrauen in die zuverlässige Funktionalität der jeweiligen Systeme auch und gerade im Fall des Eintretens extrem unwahrscheinlicher und unerwarteter, die eigentlichen Belastungsgrenzen der Systeme übersteigender disruptiver Ereignisse, auswirken.

Diese drei Annahmen zum Thema Vertrauen weisen eine enge Verknüpfung mit der Diskussion zu Hypothese H36 auf. Die darin geschilderte Informationsfunktion zu erfüllen, kann signifikant zum Vertrauen der Bevölkerung in ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung beitragen. Dazu muss die Informationsfunktion allerdings in einer bestimmten Weise ausgeführt werden und bestimmte Eigenschaften aufweisen. Vertrauen wurde in der vorliegenden Arbeit definiert als Mechanismus zur Reduktion von Komplexität, der darin besteht, die Auswahl von Handlungsentscheidungen in der Gegenwart aufgrund generalisierter Erwartungen über die gegenwärtige Zukunft zu treffen. Generalisierte Erwartungen konstituieren sich mithilfe ähnlicher Erfahrungen aus der Vergangenheit. Systemvertrauen bestand dann im Vertrauen darin, dass das betreffende System seine Funktion, die in einer spezifischen Form der Reduktion von Umweltkomplexität besteht, zuverlässig und ohne größere Störungen erfüllt. Wendet man diese Definitionen auf die Informationsfunktion von Resilience Engineering an, lässt sich sagen, dass durch Vertrauen in die von den Ingenieurwissenschaften vorgeschlagenen Lösungen zur Erhöhung der Resilienz, letztere bereits erhöht werden könnte. Das setzt ein Nicht-Enttäuschen dieses Vertrauens voraus. Wenn sich ingenieurwissenschaftliche Lösungen wiederholt als ungeeignet erweisen, verlieren Entscheidungsträger sowie die Bevölkerung ihr Vertrauen in deren Wirksamkeit. Gleichzeitig ist es für die Ingenieurwissenschaften nicht möglich, die erwünschte Wirksamkeit ihrer Lösungen deterministisch zu garantieren. Komplexität und Unsicherheit machen ihr hier einen Strich durch die Rechnung. Deshalb bedarf es transparenter Kommunikation in mehrfacher Hinsicht. Wie in der Diskussion zur Informationsfunktion dargestellt, sollten die Ingenieurwissenschaften ihre Annahmen über die Funktionsweise der von ihnen entwickelten Lösungen möglichst allgemeinverständlich zu kommunizieren in der Lage sein. Dazu zählt beispielsweise auch, Grundannahmen, auf deren Basis überhaupt erst Lösungen entstehen, transparent zu machen. Das kann als grundlegender Anspruch an jede Kommunikation gelten, die sich im Rahmen des Verständnisses von Resilience Engineering, wie es in der vorliegenden Arbeit gesehen wird, bewegt.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Aufgrund von Komplexität und Unsicherheit reicht diese Art von Transparenz aber nicht aus, um das Vertrauen in Resilience Engineering und daraus resultierend Systemvertrauen aufrechtzuerhalten bzw. erst zu gewinnen. Darüber hinaus gehört auch eine Aufrichtigkeit und Transparenz in Bezug auf Grenzen des Wissens, vielleicht sogar auf Grenzen des Wissbaren. Vertrauen erfordert eben auch eine transparente Kommunikation über die Grenzen dessen, was Ingenieurwissenschaften sicher wissen und voraussagen können. Dazu bedarf es zunächst auch einer Akzeptanz innerhalb der Ingenieurwissenschaften, dass eine vollständige Kontrolle in komplexen adaptiven Systemen nicht zu erreichen ist und dass Unsicherheit immer Teil der Realität sein wird. Determinismus ist nicht zu erreichen, jedenfalls dann nicht, wenn die Ingenieurwissenschaften den Anspruch erheben, auch im Rahmen der zivilen SiFo zu umsetzbaren Lösungsideen beitragen zu wollen. Ein „Kontrolloptimismus" oder „Kontrollwahn" geht notwendig fehl. Wird das als Grundannahme akzeptiert, kann auch entsprechend kommuniziert werden. Es ließe sich aber fragen, inwiefern eine aufrichtige und transparente Kommunikation über Grenzen des Wissens, über die reale Komplexität der Welt, nicht selbst eher zu Misstrauen führt. Wenn nichts mit Sicherheit gesagt werden kann, warum sollte man überhaupt noch etwas Gesagtem vertrauen? Hier muss zwischen Information über spezifische technische Lösungen und ihre Wirksamkeit einerseits und Kommunikation im Sinne von Resilience Engineering andererseits unterschieden werden. Das Vertrauen in die Wirksamkeit spezifischer Lösungen könnte durchaus sinken, wenn entsprechend offen informiert wird. Das Vertrauen in ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung an sich wird aber eher gestärkt, wenn insgesamt transparent kommuniziert wird. Denn erstens funktionieren spezifische technische Lösungen häufig so, wie sie sollen. Komplexe adaptive Systeme sind zwar nicht deterministisch vorhersehbar, weisen aber durchaus Muster auf und es lassen sich Wege finden, ihre Resilienz zielgerichtet zu erhöhen – insbesondere mittels der im vorangegangenen Unterkapitel skizzierten Prinzipien und Ansätze. Das zu beobachten, stärkt das Systemvertrauen. Und zweitens wird bei transparenter Kommunikation auch das Nicht-Funktionieren spezifischer Lösungen nicht zu einem Grund für Misstrauen, da es nicht automatisch einem Versagen der Ingenieurwissenschaften zugerechnet wird, sondern viel eher erkannt werden kann, dass sozusagen Komplexität dahintersteckt. Grenzen des Wissens zu kommunizieren, entspricht für Resilience Engineering außerdem einer bewussten Einordnung in einen größeren Rahmen interdisziplinärer Resilienzforschung. Resilience Engineering ist eben nur ein Teil

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

des ganzen Bildes. Zusammengefasst ergibt sich für den Zusammenhang zwischen Resilience Engineering und Vertrauen folgende Hypothese:

> *Hypothese H37: Durch Transparenz in der Kommunikation im Hinblick auf durch Komplexität und Unsicherheit bedingte Grenzen des Wissens und des Wissbarens kann Resilience Engineering Vertrauen schaffen und aufrechterhalten.*

Resilienz ist ein post-neoliberales Paradigma. Denn Resilienz geht aufgrund der Komplexität von Systemen von der grundsätzlichen Unvorhersehbarkeit der Auswirkungen zielgerichteter, proaktiver Interventionen im System aus. Daher muss der Fokus auf der Maximierung von Reflexivität und (generischer) Anpassungsfähigkeit liegen, die dem System eine kontinuierliche und dynamische Weiterentwicklung – auch durch staatliches Handeln – im Fall des Eintretens von Problemen ermöglichen.
&
Resilienz besteht darin, aufgrund der Unsicherheit künftiger Ereignisse eine Strategie der Vorbereitung im Sinne der Maximierung von Störungsverarbeitungskapazitäten anzuwenden, unter gleichzeitiger Beibehaltung gesellschaftlicher Freiheiten.
&
Resilienz besteht nicht darin, aufgrund der Unsicherheit künftiger Ereignisse eine Strategie der maximalen physischen Robustheit der betreffenden Systeme anzuwenden.
&
Die Resilienz der Gesellschaft gegenüber der Bedrohung durch das Phänomen des Terrorismus lässt sich nicht mithilfe rein physischer Schutzmaßnahmen erhöhen.

All diese Annahmen verweisen mehr oder weniger explizit auf die Bedeutung von generischer Anpassungsfähigkeit, wenn es um die Erhöhung von Resilienz geht. Die diesbezüglichen Prinzipien und Hypothesen wurden im vorangegangenen Unterkapitel identifiziert.

6.7. Zusammenfassung der Hypothesen für Resilience Engineering

Die Ingenieurwissenschaften können signifikant dazu beitragen, dass es manchmal besser kommt, als man denkt. Das kann als eine zentrale Erkenntnis der vorliegenden Arbeit gelten. Resilience Engineering ist möglich und sinnvoll. Es ist allerdings auch voraussetzungsreich und in sich komplex. Das hat die Analyse und die darauffolgende Bildung von Hypothesen in den vorangegangenen Unterkapiteln gezeigt. Unter Zuhil-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

fenahme der system- und komplexitätstheoretischen sowie der normativen Bestandteile des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo wurden insgesamt 37 Hypothesen entwickelt, die Resilience Engineering als Ansatz für ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung deutlich konkretisieren. Die Hypothesen werden im Folgenden in Tabelle 2 zusammengefasst. Damit konnten drei der Forschungslücken adressiert werden, die für die vorliegende Arbeit als relevant identifiziert wurden.

Zunächst basieren die Hypothesen für Resilience Engineering sämtlich auf einem systemischen Resilienz-Verständnis, das Komplexität und Unsicherheit explizit berücksichtigt und als entscheidende Faktoren in vielfacher Hinsicht definiert. Das führt zu Hypothesen wie beispielsweise H3, H6, H8 und H9 (siehe Tabelle 2). Diese widersprechen sehr bewusst vielen, eher klassischen, stabilitätszentrierten Ansätzen aus dem Bereich der ingenieurwissenschaftlichen Resilienzforschung. Deren Nützlichkeit soll keinesfalls in Abrede gestellt werden. Die vorliegende Arbeit formuliert aber durchaus deutlich, dass derartige klassische Ansätze nicht dazu geeignet sind, ein systemisches Resilienz-Verständnis ingenieurwissenschaftlich umzusetzen. Deshalb können sie kein Bestandteil von Resilience Engineering sein, das auf dem Resilienz-Konzept der zivilen SiFo beruht. Der systemische Fokus führt aber auch zu Hypothesen wie H2, H4, H11, H14, H15 und H20, die Resilience Engineering noch stärker system- und komplexitätstheoretisch verorten. Und es führt zu Hypothesen wie H33, H36 und H37, die aufzeigen, wie interdisziplinär Resilience Engineering zu denken ist und wie notwendig die Einbeziehung auch normativer Aspekte in ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung ist (siehe Tabelle 2).

Die Hypothesen für Resilience Engineering sind auch dazu geeignet, der Dominanz von Ansätzen zur Quantifizierung von Resilienz im Bereich der Ingenieurwissenschaften entgegenzuwirken. Zumal es nach H3 überhaupt nicht möglich ist, Resilienz mittels einfacher Maße zu quantifizieren. Diese zugegeben überspitzt formulierte Hypothese dient sozusagen als Ausgangspunkt der weiteren Diskussion. Wenn ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung nicht in der Entwicklung von Maßen zur Messung von Resilienz besteht, worin besteht sie dann? Darauf geben Hypothesen wie beispielsweise H22, H23, H30 und H31 Antwort, die konkrete Prinzipien beinhalten, mit deren Hilfe in komplexen adaptiven Systemen generische Anpassungsfähigkeit und so Resilienz erhöht werden kann. Aber auch Hypothesen wie H12, H16, H19, H26, H27 und H28 tragen zu einer Konkretisierung von Resilience Engineering im Hinblick darauf bei, wie sich Resilienz ingenieurwissenschaftlich umsetzen lässt. Der Modellierung und

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Simulation komplexer adaptiver Systeme kommt dabei eine besondere Bedeutung zu (siehe Tabelle 2).

Die fünfte Forschungslücke wird mithilfe der durchgängigen – mit Ausnahme des Unterkapitels 2.5 – Nutzung des Begriffs Resilience Engineering für ingenieurwissenschaftliche, technologiefokussierte Resilienzforschung adressiert. Das spiegelt sich letztlich in jeder einzelnen der 37 Hypothesen wider. Ziel dieser konsequenten Zuschreibung ingenieurwissenschaftlicher Inhalte für den Begriff Resilience Engineering ist sicher nicht, die organisationswissenschaftliche Forschung in diesem Bereich zu kritisieren oder ersetzen. Zumal der Resilienz-Begriff dieser Forschungsrichtung klar ein systemischer ist, aus dem Anleihen und Ansätze für die hier entwickelten Hypothesen für Resilience Engineering übertragen werden konnten. Das Ziel der vorangegangenen Ausführungen besteht aber durchaus darin, kritisch zu hinterfragen, ob Resilience Engineering für die organisationswissenschaftliche Resilienzforschung der geeignete Begriff sein kann, oder nicht generell stärker im hier verwendeten Sinne verstanden werden sollte.

Tabelle 2: Hypothesen für Resilience Engineering

Nr.	*Beschreibung*
H1	Resilience Engineering erfordert ex ante eine Verständigung über die Bedeutung relevanter Begrifflichkeiten im Resilienz-Konzept der zivilen SiFo.
H2	Resilienz ist ein qualitatives weil komplexes Konzept, dessen ingenieurwissenschaftliche Umsetzung dies explizit zu berücksichtigen hat.
H3	Es ist nicht möglich, die Resilienz der für die zivile SiFo relevanten, komplexen adaptiven, sozio-technischen Systeme mittels einfacher Maße zu quantifizieren. Nichtsdestoweniger werden Maße für einfacher zu erhebende Größen benötigt, um den Systemzustand einschätzen und Resilienz erhöhen zu können.
H4	Die bewusste und transparente Definition von Systemgrenzen als analytisches Instrument ist eine Voraussetzung für Resilience Engineering.
H5	Dass die für die zivile SiFo relevanten Systeme sozio-technisch zu verstehen sind, macht es für Resilience Engineering notwendig, Menschen und menschliches Verhalten explizit mit zu berücksichtigen.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Nr.	*Beschreibung*
H6	Prävention und präventive Maßnahmen sind kein Bestandteil von Resilience Engineering.
H7	Resilience Engineering erfolgt bereits vor dem Eintreten eines disruptiven Ereignisses und trägt zur Erhöhung von Resilienz in den Phasen prepare, protect, respond und recover bei.
H8	Die quantitative Risikoanalyse und ähnliche, linear und deterministisch arbeitende Methoden sind nicht dazu geeignet, zu Resilience Engineering beizutragen.
H9	Die Entwicklung bedrohungsspezifischer Schutzmaßnahmen ist kein Teil von Resilience Engineering.
H10	Risiken mit extrem geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten und extrem großen Auswirkungen können und sollten durch Resilience Engineering adressiert werden, da spezifische Vorbereitung aufgrund der Kostenintensität zumeist unterbleibt.
H11	Aufgrund der Unsicherheit von Ereignissen besteht ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung wesentlich aus der Entwicklung heuristischer generischer Prinzipien.
H12	Die Theorie komplexer adaptiver Systeme und die daraus entwickelten mathematischen Modelle und Methoden können als Teil von Resilience Engineering genutzt werden, um Umkipp-Punkte oder Schwellenwerte zu identifizieren.
H13	Die Nutzung geeigneter, etablierter Indikatoren zur Messung von Vulnerabilität ist Teil von Resilience Engineering und kann dazu genutzt werden, Systeme zu identifizieren, deren Resilienz besonders dringend erhöht werden sollte.
H14	Die Reduktion von Komplexität ist als Prinzip kein geeigneter Bestandteil von Resilience Engineering.
H15	Resilience Engineering besteht in der Erforschung und Entwicklung von Prinzipien, welche die generische Anpassungsfähigkeit komplexer adaptiver Systeme auf technologische Weise zu erhöhen vermögen.
H16	Die Theorie komplexer adaptiver Systeme und die daraus entwickelten mathematischen Modelle und Methoden können als Teil von Resilience Engineering genutzt werden, um Hebelpunkte zu identifizieren und durch deren Anwendung positive Kaskadeneffekte zu realisieren.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Nr.	*Beschreibung*
H17	Die Entwicklung spezifischer Frühwarnsysteme ist kein Teil von Resilience Engineering.
H18	Mithilfe realitätsnaher Notfallübungen können Systembestandteile identifiziert werden, die mittels Resilience Engineering optimiert werden sollten.
H19	Durch die Verwendung realitätsnaher Modelle zur Simulation des Verhaltens komplexer adaptiver Systeme im Ausnahmefall in Notfallübungen kann Resilience Engineering dazu beitragen, die generischen Kompetenzen der handelnden Personen zu erhöhen und so die Resilienz des Gesamtsystems zu steigern.
H20	Nachdem die Systemgrenzen definiert wurden, bedeutet Resilience Engineering im nächsten Schritt, die kritischen Funktionalitäten der untersuchten Systeme zu identifizieren.
H21	Ein Design, das Systemen ein elegantes Abschmelzen kritischer Funktionalitäten ermöglicht, trägt zur Resilienz von Systemen bei und sollte insofern Ziel ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung sein.
H22	Modularität, verstanden als Aufteilung eines Systems in funktional eigenständige Einheiten, bestehend aus einer Reihe stark miteinander vernetzter Agenten, die nur lose Kopplungen mit den anderen Einheiten des Systems aufweisen, ist ein geeignetes Designprinzip, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.
H23	Dezentralität, verstanden als Vermeidung des Auftretens hochkritischer Systemkomponenten bzw. hochspezialisierter Agenten, bei deren Ausfall das gesamte System unweigerlich zusammenbricht, ist ein geeignetes Designprinzip, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.
H24	Die Resilienz kritischer Netz-Infrastrukturen kann durch den Aufbau vermaschter Netze erhöht werden.
H25	Um skalenfreie Netzwerke, wie sie für kritische Infrastrukturen teilweise typisch sind, resilient zu gestalten, müssen deren besonders relevante Elemente identifiziert und mittels geeigneter Prinzipien wie Redundanz und Diversität optimiert werden.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Nr.	*Beschreibung*
H26	Mithilfe agentenbasierter Modellierung kann die Funktionsweise komplexer adaptiver Systeme auch im stochastisch bestimmten extremen Ausnahmefall verstanden und so aufgezeigt werden, wie Resilience Engineering die Resilienz dieser Systeme beeinflusst.
H27	Methoden zur agentenbasierten Modellierung weiterzuentwickeln, ist Bestandteil von Resilience Engineering.
H28	Modulare Modellierung, verstanden als systemische Kombination unterschiedlicher Methoden zur Modellierung komplexer adaptiver Systeme, ist ein Bestandteil von Resilience Engineering.
H29	Die Beantwortung der Frage danach, wie KI-basierte Lösungen zur Erhöhung der Resilienz der für die zivile SiFo relevanten sozio-technischen Systeme beitragen können, ist Teil ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung.
H30	Resilience Engineering lässt sich in komplexen adaptiven, soziotechnischen Systemen auch ohne den Einsatz künstlicher Intelligenz umsetzen.
H31	Diversität, verstanden als Vorhandensein funktional äquivalenter Gruppen, zusammengesetzt aus möglichst verschiedenartigen Agenten, ist ein geeignetes Designprinzip, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.
H32	Physische und funktionale Redundanz, verstanden als das zusätzliche Vorhandensein für die Funktionsfähigkeit im Normalfall nicht benötigter, entweder physisch oder funktional gleicher Systemkomponenten, sind geeignete Designprinzipien, um komplexe adaptive Systeme resilient zu gestalten.
H33	Resilience Engineering zeichnet sich durch eine Kombination aus Technologiefokus einerseits und der Berücksichtigung und konsequenten Einbeziehung sozialwissenschaftlich vermittelter normativer Aspekte andererseits aus.
H34	Dass die Ergebnisse von Resilience Engineering sich auch in Gesellschaften anwenden lassen, deren innere Strukturen durch Unfreiheit gekennzeichnet sind, lässt sich ingenieurwissenschaftlich nicht ausschließen, führt aber auch in solchen Gesellschaften grundsätzlich zunächst zu einer wünschenswerten Verringerung menschlichen Leids.

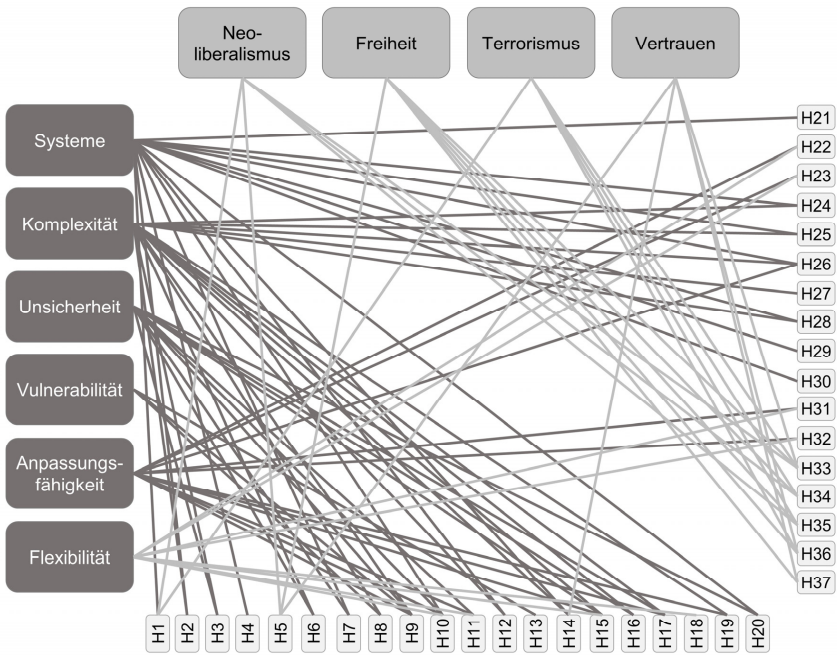
https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Nr.	*Beschreibung*
H35	Resilience Engineering besteht auch darin, Verantwortlichen und Betroffenen mithilfe technologischer und sozio-technischer Lösungen dabei zu helfen, ihre generische Anpassungsfähigkeit zu erhöhen.
H36	Resilience Engineering umfasst eine Informationsfunktion, die darin besteht, allgemein verständliches Wissen über die Funktionsweise technologischer Lösungen zur Erhöhung von Resilienz zu entwickeln, mit dessen Hilfe gesellschaftliche Akteure informierte Entscheidungen über deren Anwendung treffen können.
H37	Durch Transparenz in der Kommunikation im Hinblick auf durch Komplexität und Unsicherheit bedingte Grenzen des Wissens und des Wissbarens kann Resilience Engineering Vertrauen schaffen und aufrechterhalten.

Die 37 Hypothesen, die in Tabelle 2 aufgeführt werden, lassen sich alle in systematischer Weise auf die normative sowie die system- und komplexitätstheoretische Analyse und Entwicklung des Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo beziehen. Abbildung 6 macht diese Verknüpfungen noch einmal grafisch anschaulich. Damit zeigt sich, dass die vorliegende Arbeit insgesamt konsistent vom Stand der Forschung ausgehend Lücken identifiziert hat, darauf aufbauend mithilfe konzeptioneller Zugänge ein eigenständiges Resilienz-Konzept entwickelt und dieses wiederum dazu nutzt, Hypothesen für Resilience Engineering aufzustellen, so dass die fünf gefundenen Forschungslücken adressiert werden können.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

Abbildung 6: Hypothesen für Resilience Engineering und konzeptionelle Zugänge zu Resilienz



Quelle: eigene Darstellung.

6.8. *Grenzen für Resilience Engineering aus sozialwissenschaftlicher Sicht*

Resilience Engineering hat Grenzen. Ebenso wie Resilienz an sich nicht endlos ausweitbar ist, können auch ingenieurwissenschaftliche Ideen und Ansätze nicht immer und in jedem Fall dazu beitragen, die Resilienz der Gesellschaft zu erhöhen. Zunächst muss festgehalten werden, dass die 37 Hypothesen keine eins zu eins umsetzbare Anleitung für die Ingenieurwissenschaften darstellen, mit deren Hilfe sie konkrete Systeme resilient(er) gestalten können. Diesen Anspruch kann und möchte die vorliegende Arbeit nicht erheben. Vielmehr sind die 37 Hypothesen als Hinweise zu verstehen, die sich konsistent aus dem eigenständigen Resilienz-Konzept der zivilen SiFo ableiten lassen. Die enge Verknüpfung zwischen den Hypothesen und dem Resilienz-Konzept führt aber auch zu einer grundsätzlichen Übernahme von dessen Grenzen und Kritikpunkten. Res-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

ilience Engineering verstanden als ingenieurwissenschaftliche Umsetzung von Resilienz in einem systemischen Sinne, lässt sich beispielsweise nicht gegenüber allen beliebigen Arten von widrigen Ereignissen anwenden. Die genannten Beispiele der Eruption eines Super-Vulkans, des Einschlags eines großen Meteoriten auf der Erde oder der Invasion einer außerirdischen, technisch weit überlegenen Spezies haben das deutlich gemacht. Ein weiterer Punkt war eine theoretische Abgrenzung zwischen Risiko und Resilienz. Auch das wurde auf Resilience Engineering übertragen und vor allem in Form der Hypothesen H8, H9 und H10 aufgearbeitet. Der mögliche Konflikt zwischen Resilienz und Effizienz wiederum wurde vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen diskutiert und spielt für Resilience Engineering ebenfalls eine maßgebliche Rolle. Denn zur Umsetzung ingenieurwissenschaftlicher Maßnahmen zur Erhöhung von Resilienz werden Ressourcen benötigt. Gerade mit Blick auf das Prinzip der Redundanz wird ein Zielkonflikt zwischen Effizienz und Resilienz deutlich. Aber auch Prinzipien wie Modularität, Dezentralität und Diversität sind nicht notwendigerweise dazu geeignet, knappe Ressourcen nutzenmaximierend – im Sinne kurzfristiger Effizienzsteigerung – einzusetzen. Der Zielkonflikt bleibt also bestehen und kann weiterhin nicht aufgelöst werden. Allerdings lässt er sich mittels der Hypothesen H36 und H37 zumindest explizit adressieren. Die Informationsfunktion von Resilience Engineering kann auch dazu beitragen, in geeigneter Weise die Kosten von Resilienz zu kommunizieren und der Gesellschaft so die Möglichkeit zu bieten, auf Grundlage sachlicher Informationen über die Umsetzung konkreter Maßnahmen zu entscheiden. Damit lässt sich gleichzeitig eine aus konstruktivistischer Sicht an Resilienz herangetragene Kritik zumindest ein Stück weit entkräften. Demnach lässt sich Resilienz immer nur retrospektiv beobachten und sei nicht mehr als ein Mythos, um zufällig aufgetretenen Ereignissen im Nachhinein Sinn zu verleihen. Die Hypothesen für Resilience Engineering sind aber keinesfalls auf das Eintreten eines widrigen Ereignisses angewiesen. Sie sollen im Gegenteil ja gerade dazu dienen, Gesellschaften im Vorhinein, prospektiv, resilienter zu gestalten. Mit Blick auf die Bestandteile des Konzepts stellt sich dann allerdings immer noch die Frage, was das konkret heißt. Denn es könnten durchaus auch Zielkonflikte innerhalb des Konzepts entstehen. Das gilt auch für Resilience Engineering, weshalb die Informationsfunktion und die Hypothesen H1, H2 und H5 besonders wichtig sind. Mit ihrer Hilfe lässt sich Resilience Engineering im größeren, interdisziplinären und transdisziplinären Kontext verorten.

Neben den gerade geschilderten, aus dem Resilienz-Konzept der zivilen SiFo abgeleiteten Kritikpunkten, spielen für Resilience Engineering

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

noch eine Reihe weiterer Aspekte eine Rolle, wenn es um Grenzen der Gültigkeit der Hypothesen oder noch offene Fragestellungen geht. Zunächst ist Resilience Engineering immer kontextabhängig und in seiner konkreten Ausgestaltung nur für spezifische Systeme anwendbar. Das steht nur scheinbar im Widerspruch zu den generischen Prinzipien und der Betonung der Bedeutung generischer Anpassungsfähigkeit für Resilienz. Denn um die Resilienz realer, komplexer adaptiver Systeme zielgerichtet erhöhen zu können, müssen diese detailliert untersucht und möglichst verstanden werden – etwa mittels Methoden zur Modellierung und Simulation. Nur dann kann durch Resilience Engineering die generische Anpassungsfähigkeit des spezifischen Systems optimiert werden. Oder anders gesagt, es gibt keine „silver bullet solution", kein über alle Systeme hinweg gültiges Patentrezept, wie die Hypothesen umgesetzt werden können (Kröger 2011: 75). Zumal nach wie vor das Problem der Unsicherheit vorhanden ist. Kneer und Nassehi formulieren das in ihrer Analyse der Systemtheorie Luhmanns mit Bezug zum Risikobegriff so: „Dass aber die Zukunft unbekannt bleibt, korrumpiert letztlich die Möglichkeit von Sicherheit" (Kneer/Nassehi 2000: 171). In komplexen adaptiven Systemen lassen sich Ursache und Wirkung nicht deterministisch und linear bestimmen. Es bleiben immer Unsicherheiten. Auch wenn Resilience Engineering das mithilfe der Hypothesen H36 und H37 im gesellschaftlichen Kontext durch Kommunikation zumindest adressieren kann, gilt das nicht unbedingt für die technologische Dimension. Wie bestimmte technologische Ansätze und Maßnahmen tatsächlich im konkreten System wirken, lässt sich nicht mit Sicherheit vorhersagen. Zwar sind die in diesem Kapitel identifizierten Prinzipien und Methoden für Resilience Engineering grundsätzlich wirkungsvoll und dazu geeignet, die Resilienz von Systemen zu erhöhen. Eine kontraintuitive und nicht-intendierte Wirkung lässt sich aber nicht deterministisch ausschließen. Rein aus der Theorie betrachtet, lassen sich nicht mal Wahrscheinlichkeiten für eine Wirksamkeit oder Unwirksamkeit präzise quantifizieren. Das ändert sich auch durch die Verwendung von Modellen nicht, die durch die Reduktion von Komplexität dazu beitragen sollen, Wissen für konkrete Entscheidungen bereitzustellen. Auch wenn das Modell daraufhin präzise Angaben zu machen imstande ist, lässt sich die Unsicherheit bei der Rückübersetzung in die Realität nicht vermeiden (Lukesch 2016: 299).

Nichtsdestotrotz müssen Modelle die Realität ein Stück weit vereinfachen, da sie sonst selbst zu komplex werden, um sinnvoll genutzt werden zu können (Ji et al. 2017: 1358). Das weist bereits in Richtung einer grundlegenden Kritik, die an Resilience Engineering geübt werden könn-

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

te. Denn die zunehmende Komplexität der Gesellschaft resultiert unter anderem auch aus dem technischen Fortschritt. Wenn aber technischer Fortschritt zu größerer Komplexität führt, was Resilienz immer notwendiger macht, und Resilienz wiederum durch die Entwicklung technologischer Lösungen erhöht werden soll, scheint eher die Technologie selbst das „Problem" zu sein. Oder wie Luhmann es ausdrückt: „Die Probleme der Technik zeigen sich an den Versuchen, die Probleme der Technik mit technischen Mitteln zu lösen" (Luhmann 2003: 100). Gerade wenn Technologie aufgrund ihrer Komplexität sogar dazu führt, die Improvisations- und Anpassungsfähigkeit von Menschen in Ausnahmesituationen zu verringern, da sie ihre kognitiven Kompetenzen weit überschreitet (Schulmann/Roe 2007: 46ff). Zudem haben Technologien häufig gravierende und zunächst übersehene, unintendierte Nebenfolgen. Hier sei nur auf den durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe wesentlich mitverursachten Klimawandel verwiesen. Ein reiner „technological fix" ist also in komplexen adaptiven Systemen immer mit Unsicherheiten verbunden. Gerade deshalb gibt es in der Resilienzforschung und vor allem natürlich deren sozialwissenschaftlicher Spielart die Meinung, dass Resilienz primär als soziales Phänomen zu verstehen sei und Menschen die wichtigste Rolle spielen sollten (Bach et al. 2011: 28). Das widerspricht dem Verständnis von Resilience Engineering, wie es in der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde, aber auch nicht, wie unter anderem die Hypothese H2 und H5 zeigen. Resilience Engineering stellt immer nur einen Baustein einer umfassenderen Resilienz-Strategie dar und ist selbst immer schon interdisziplinär und nicht rein technologisch zu verstehen. Das bannt die Gefahr unintendierter Nebenfolgen technologischer Entwicklungen nicht. Mit dieser muss Resilience Engineering immer rechnen und grundsätzlich umgehen. Es ordnet Resilience Engineering aber in einen größeren Kontext ein und ermöglicht daher, technologisch bedingte negative Entwicklungen frühzeitig zu erkennen.

Ein Beispiel für solche negativen Entwicklungen könnte etwa in einem Zuviel an Redundanz und Diversität bestehen. Longstaff zufolge könnte das zu mehr Komplexität führen und damit genau zu der Unbeherrschbarkeit für Anwender und Betreiber des Systems, von der gerade die Rede war (Longstaff 2012: 276). Das führt zu einem weiteren möglichen Kritikpunkt an den hier vorgeschlagenen Hypothesen für Resilience Engineering. Selbst wenn das Problem der endlichen Verfügbarkeit von Ressourcen nicht bestünde, ist fraglich, ob Sterbenz et al. mit ihrer Aussage „maximum resilience can be obtained with unlimited cost" recht haben (Sterbenz et al. 2010: 1255). Darüber sagen die 37 Hypothesen nicht direkt

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

etwas aus, denn das ließ sich aus der normativen wie auch der system- und komplexitätstheoretischen Analyse von Resilienz nicht direkt ableiten. Es ist unklar, ob und wenn ja ab welchem Punkt mehr Redundanz vielleicht nicht mehr zu mehr generischer Anpassungsfähigkeit führt, sondern zu einem im Gegenteil eher unbeweglichen und starren System, das mit unerwarteten Ereignissen nicht umzugehen weiß. Ebensowenig wurde in den Hypothesen klargestellt, ob Redundanz grundsätzlich wichtiger ist als Diversität, oder ob vielleicht Dezentralität das wichtigste Prinzip ist. Es konnte nicht geklärt werden, ob eher Ressourcen in die Entwicklung neuer, agentenbasierter Simulationsmethoden investiert werden sollten oder in die Erforschung einer Konkretisierung der Informationsfunktion von Resilience Engineering. Mit anderen Worten bleibt theoretisch unscharf, welche Teile von Resilience Engineering wieviel zu Resilienz beitragen. Dieser Kritikpunkt gilt nicht nur für die vorliegende Arbeit. Er stellt vielmehr eine generelle Forschungslücke im Bereich ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung dar (Goessling-Reisemann/Thier 2019: 132f). Deshalb wird darauf im abschließenden Kapitel im Hinblick auf den interdisziplinär-forschungsleitenden Ausblick noch einmal eingegangen.

Davor soll allerdings noch ein letzter, prinzipieller Kritikpunkt an den Hypothesen für Resilience Engineering beleuchtet werden. Die vorliegende Arbeit nutzt Resilienz bewusst als Brückenkonzept, als boundary object, um aus einer sozialwissenschaftlichen Perspektive heraus, ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung zu analysieren und konzeptionell weiterzuentwickeln. Das kann im ersten Schritt bereits an der unterschiedlichen Bedeutung von Begriffen scheitern, die es in den verschiedenen Disziplinen gibt (Alderson 2019: 69). Dem wurde unter anderem durch die Hypothese H1 proaktiv zu begegnen versucht, ohne damit diese Problemstellung gänzlich beseitigen zu können. Aus Sicht der Ingenieurwissenschaften lässt sich aber noch viel grundlegender fragen, ob ein Ansatz, wie die vorliegende Arbeit ihn wählt, überhaupt sinnvoll und statthaft ist. Resilienz ist selbst ein komplexes, ein qualitatives Konzept und auch die Hypothesen für Resilience Engineering können nicht einfach genommen und für konkrete, reale Systeme angewendet werden. Resilience Engineering besteht nicht aus Gleichungen, Formeln oder sonstigen mathematischen Modellen. Genau das stellt für die Ingenieurwissenschaften aber eine Herausforderung dar. Im interdisziplinären Austausch mit den Sozialwissenschaften sind deren Erkenntnisse für die Ingenieurwissenschaften zumeist zu unkonkret, zu vage, um tatsächlich umsetzbar zu sein (Altherr et al. 2018: 189, Woods 2019: 63). Woods spricht von einer „Sackgasse" (impasse), in die interdisziplinäre Diskussionen immer wieder geraten,

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA

wenn einerseits vonseiten der Sozialwissenschaften auf die Bedeutung der Beachtung von Faktoren wie Komplexität, Unsicherheit und normativen Aspekten gedrängt und andererseits vonseiten der Ingenieurwissenschaften nach anwendbaren Lösungsmöglichkeiten zur Gestaltung realer Systeme gefragt wird (Woods 2019: 63). Dieser Diskussion kann sich die vorliegende Arbeit nicht entziehen. Und den daraus resultierenden Vorwurf einer nur begrenzten Nützlichkeit ihrer Ergebnisse für ingenieurwissenschaftliche Resilienzforschung kann sie letztlich nicht gänzlich entkräften. So sehr sie einem interdisziplinären Ansatz folgt, um den Austausch zwischen Ingenieur- und Sozialwissenschaften zu ermöglichen, so sehr ist sie doch gleichzeitig methodisch in den Sozialwissenschaften verhaftet. Allerdings gilt auch an dieser Stelle – wie in der Diskussion zu Hypothese H37 – die Transparenz über in dem Fall in disziplinären Unterschieden begründete Grenzen des Konzepts als erster Schritt zu deren Überwindung. Die vorliegende Arbeit ist sich der Herausforderung an jeder Stelle bewusst und unternimmt nichtsdestoweniger den Versuch, für den Bereich der zivilen Sicherheitsforschung zum Dialog zwischen sozialwissenschaftlicher und ingenieurwissenschaftlicher Resilienzforschung beizutragen. Durch die Entwicklung eines eigenständigen, normativ wie system- und komplexitätstheoretisch fundierten Resilienz-Konzepts der zivilen SiFo und der darauf aufbauenden Formulierung von 37 Hypothesen für Resilience Engineering, konnte sie eine signifikant erweiterte Grundlage für diesen Dialog schaffen.

https://doi.org/10.5771/9783748924227-365 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-SA