

Transformation, Zirkulation, System of Systems: Für ein dynamisches Verständnis netzgebundener Infrastrukturen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

GRADUIERTENKOLLEG

KRITIS 

Jens Ivo Engels, Sybille Frank,

Iryna Gurevych, Martina Heßler,

Michèle Knodt, Jochen Monstadt,

Alfred Nordmann, Andreas Oetting,

Annette Rudolph-Cleff, Uwe Rüppel,

Gerrit J. Schenk, Florian Steinke

Zusammenfassung

Der Aufsatz plädiert dafür, die Dynamik technischer netzgebundener Infrastrukturen mit einem dreifachen Ansatz zu untersuchen: Transformation, Zirkulation und System of Systems. Transformation repräsentiert dabei die Veränderung von Infrastrukturen als Gesamtsysteme. Zirkulation repräsentiert die in jeder Infrastrukturfunktion eingeschriebene Dynamik. Gemeint ist der Austausch von Gütern, Menschen, Informationen oder Energie in Netzen. System of Systems ist ein Konzept zur Beschreibung der Interdependenzen verschiedener verbundener Sektoren und Systeme.

Die drei Merkmale der Transformation sind aufeinander bezogen: Das Konzept des System of System liefert einen Erklärungsansatz, auf welchen Wegen Zirkulation stattfindet (in und zwischen Netzwerken) und welche Faktoren die Zirkulation beeinflussen. Diese Phänomene können wiederum als Ursachen oder Anreize für Transformation auf der Systemebene begriffen werden. Umgekehrt ist zu fragen, inwieweit Transformationsprozesse der Infrastrukturnetze die Konfiguration des System of Systems verändern.

Vorbemerkung

Der vorliegende Aufsatz ist ein gekürzter und leicht veränderter Auszug aus dem Forschungsprogramm des Graduiertenkollegs 2222 „Kritische Infrastrukturen. Konstruktion, Funktionskrise und Schutz in Städten“ an der TU Darmstadt, welches von 2016 bis 2025 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird. Die Überlegungen zur Dynamik von Infrastrukturen entstanden 2020 und bilden den zentralen Referenzrahmen für die Forschungen der zweiten Förderphase.

Ausgangspunkt und Desiderate

Infrastrukturen seien „alles Stabile, das notwendig ist, um Mobilität und einen Austausch von Menschen, Gütern und Ideen zu ermöglichen“, so formuliert es der Historiker Dirk van Laak in seiner Monographie über die Geschichte von technischen Infrastrukturen (Laak 2018: 13; ganz ähnlich bei Larkin 2013: 329). Van Laak betont also den Doppelcharakter von Infrastrukturen, deren Netze einerseits stabil sein sollten, deren maßgebliche Funktion aber im Kern die Ermöglichung von Bewegung, Interaktion und Informationsaustausch darstellt. Zu fragen ist allerdings, ob die Vorstellung von der Stabilität im Zeitalter neuronaler Netze und smarterer Anwendungen ohne weiteres Bestand hat. Vielmehr kann es in bestimmten Situationen oder angesichts bestimmter Herausforderungen gerade so sein, dass nur eine veränderliche, anpassungsfähige Struktur dazu in der Lage ist, die Funktionsfähigkeit eines Systems aufrecht zu erhalten. Insofern sollte Stabilität der Infrastruktur nicht mit Statik oder Versteinerung gleichgesetzt werden. Eine dynamische oder ‚plastische‘ Reaktion kann beispielsweise eine notwendige Bedingung für die Aufrechterhaltung von Funktionen sein, etwa wenn es zu einer Naturkatastrophe kommt – das zeigte etwa der Fall der Hamburger Sturmflut von 1962 (Heßler/Kehrt 2014). Ganz grundsätzlich lehren die Forschungen über gesellschaftliche Resilienz und die Anpassungsfähigkeit ganzer Städte, dass Elastizität und Veränderlichkeit deutlich größere Chancen zur Erhaltung von Funktionen angesichts von Krisen mit sich bringen als eine Art spröder Robustheit (vgl. z.B. Rudolph-Cleff 2017; Elsner/Huck/Marathe 2018).

Hinzu kommen die Herausforderungen, welche sich für fast sämtliche Infrastruktursysteme durch politische Entscheidungen der letzten Jahre ergeben. Mittlerweile ist klar, dass es zu erheblichen Anpassungsleistungen im Sinne von Decarbonisierung kommen wird – das betrifft auf den ersten Blick die Energieversorgung, strahlt letztlich aber auf alle anderen Infrastruktursektoren aus, beispielsweise den Verkehr. Dem Umbau der Infrastrukturen wird zunehmend eine zentrale Rolle für die Bewältigung der ökologischen und technologischen Herausforderungen der Zukunft zugesprochen (Energiewende, Verkehrswende, digitale Vernetzung in Smart Systems und Smart Cities). Mit anderen Worten: Derzeitige gesellschaftliche und technologische Entwicklungen bedeuten tiefgreifende Transformationen der netzgebundenen Infrastrukturen. Vor allem die städtischen Infrastrukturen gelten gewissermaßen als Zukunftswerkstätten. Weil Infrastrukturen auf vielfältige Weise durch Gesellschaft, Politik, Wirtschaft und Kultur geprägt sind und diese umgekehrt das städtische Leben prägen, ist eine multiperspektivische, interdisziplinäre Betrachtung angezeigt.

Untersuchungsgegenstand sind netzgebundene Kritische Infrastrukturen der städtischen Energie- und Wasserversorgung, der Kommunikation und des Transports. Diese Systeme bilden das ‚Nervensystem‘ moderner Gesellschaften. Unsere Lebensweise beruht seit dem späten 19. Jahrhundert auf ihren Funktionen. Zugleich stellen Störungen und Funktionskrisen der Infrastrukturen potenziell dramatische Bedrohungen dieser gesellschaftlichen Ordnung dar. Dies ist auch der Grund, warum sie seit rund zwanzig Jahren als kritisch bezeichnet werden. Diese Kritikalität der Infrastrukturen ist das Ergebnis technisch-funktionaler Abhängigkeiten, aber auch von gesellschaftlichen Zuschreibungen. Beide, Funktionen und Zuschreibungen, sind aufs engste miteinander verknüpft und nicht etwa als Gegensätze zu betrachten (Engels/Nordmann 2018). Der Betrieb von Infrastrukturen erweist sich als eine hochkomplexe Angelegenheit, die erhebliche Ressourcen benötigt und geprägt ist von Störanfälligkeit und ständigem Reparaturbedarf, von Vulnerabilität und erheblichen Anstrengungen zum Schutz und zur Stabilisierung, letztere mittlerweile oft als Resilienz verstanden (Graham/Thrift 2007; Engels 2018).

Trotz der wachsenden Aufmerksamkeit für die Dynamik Kritischer Infrastrukturen in der Forschung kann man zwei wichtige Desiderate identifizieren.

Zum ersten gilt: Trotz des theoretisch vorhandenen Wissens über die dynamische Natur von Kritischen Infrastrukturen wird dieses in der Praxis kaum implementiert. Die Gründe dafür sind vielfältig, insbesondere liegen sie in den Organisations- und Governance-Strukturen, die stark sektorenbezogen sind und daher gewissermaßen ‚blind‘ vor allem für sektorenübergreifende Dynamiken (Knodt/ Kemmerzell 2020; Monstadt/Coutard 2019; Hempel/Kraff/Pelzer 2018; Monstadt/Schmidt 2019). Das zweite Desiderat ist konzeptioneller Natur: Es gibt zwar sehr viele empirische Hinweise auf den dynamischen Charakter von Infrastrukturen. Auch finden sich in der Literatur viele Aufforderungen, diese zu beachten. Doch eine systematische Beschreibung, worin der dynamische Charakter von Infrastrukturen liegt, bzw. wie er zu fassen ist, steht noch aus. Hierfür macht dieser Aufsatz einen Vorschlag.

Kritische Infrastrukturen: Dynamik statt Statik

Die ersten Forschungen im Graduiertenkolleg KRITIS ergaben vielfältige Hinweise auf unterschiedliche Phänomene von Dynamik und Wandelbarkeit, ohne dass hiernach systematisch gesucht worden wäre. Dazu eine kurze Vorbemerkung: Übergreifendes

Ziel der Forschungen im Graduiertenkolleg ist es, Konstruktion, Funktionskrisen und Schutz Kritischer Infrastrukturen in Städten in ihren räumlichen und zeitlichen Zusammenhängen und Beziehungen zu verstehen. Erstens wird die Konstruktion technischer Infrastrukturen als „kritisch“ in ihrer historischen Genese und räumlichen Differenziertheit untersucht. Zweitens werden Funktionskrisen von städtischen Infrastrukturen einschließlich der Bedingungen ihrer Vulnerabilität oder Resilienz analysiert. Drittens wird gefragt, wie die einschlägigen Schutzstrategien zwischen den Grundsätzen von Preparedness und Prevention organisiert werden oder werden können.

Eine Betrachtung langer Zeiträume im Kolleg hat gezeigt, dass alle Infrastrukturen ständigem Wandel unterliegen. Vormoderne Wassernutzungsinfrastrukturen in Indien etwa bestätigen diesen Eindruck (Marathe 2019) ebenso wie mittelalterliche Verkehrsinfrastrukturen (Eifert 2020). Dynamiken können sich in schwer vorhersehbaren aber sicher eintretenden Lernzyklen in Abhängigkeit von Hochwasser- oder Erdbebenkatastrophen manifestieren (Thiessen 2020, Huck 2020).

Dynamiken betreffen jedoch nicht nur die Konfiguration der Infrastruktursysteme, sondern sie finden gewissermaßen auch im Betrieb statt. Das gilt ganz besonders für die Anforderungen, die sich aus Zyklen bei der Gewinnung von Energie aus Sonne und Wind ergeben (Elsner/Monstadt/Raven 2019). Im Bereich der Disposition des Bahnverkehrs kommt man zunehmend von statischen Lösungen ab. Nur dynamische Ansätze und Werkzeuge in den Störfallprogrammen ermöglichen anpassungsfähige und damit effektive Reaktionen, die die Kontinuität des Bahnbetriebs erlauben (Crespo 2019). Eine ähnliche Aussage gilt für den Katastrophenschutz, der traditionell nach festen Protokollen verlangt. Angesichts der hohen Komplexität kaskadierender Störfälle und zunehmender Vernetzung unterschiedlicher Systeme benötigt der Katastrophenschutz situations-responsive und damit dynamische Lösungen (Dombois 2020). Die Anwendungen von Infrastrukturen in der Smart City implizieren höchst veränderliche Konstellationen, je nach Situationsbedarf, und gelten als ein Baustein zur Überwindung statischer Lösungen (vgl. Frank/Krajewsky 2018).

Dies Ergebnisse lassen sich einbetten in die seit einigen Jahren geführte Diskussion über die Fragwürdigkeit statischer Auffassungen von Infrastruktur.

In der klassischen Industriemoderne galten Technik und vor allem Infrastrukturen als Mittel der Überwindung von „Schranken der Natur“ (Brüggemeier 2014). Sie ermöglichten die teilweise Aufhebung von Einschränkungen, die Jahreszeiten, der Gehapparat, die unmittelbare Umgebung usf. den Menschen auferlegten. Dieses Konzept beinhaltete die Idee technologischen Fortschritts und die Vorstellung, die materielle Seite des Lebens werde durch Technik stabilisiert. Damit verbunden war aber auch das Versprechen vom Aufbruch in eine neue Gesellschaft, in der soziale Unterschiede abgemildert würden und gesellschaftliche Integration dank Technik gelinge (z.B. Richter 2018; Ambrosius/Henrich-Franke 2013, Schot 2010, Laak 2006). In dieser Perspektive erschienen Infrastrukturen als die stabile, tendenziell wenig veränderliche Grundlage einer Jahrhunderte übergreifenden, gesellschaftlichen und technischen Modernisierungsdynamik.

Ein weiteres Paradigma der Infrastrukturforschung war lange Zeit das Konzept der Pfadabhängigkeit. Ursprünglich auf technische Anwendungen bezogen, ist es in den Forschungen zu großtechnischen Systemen wohl eine der zentralen Grundannahmen. Die klassischen Beiträge zu großtechnischen Systemen der 1990er Jahre haben

Pfadabhängigkeiten und das Moment des „lock in“ äußerst stark gemacht (Melosi 2000). In den letzten Jahren sind jedoch zunehmend abwägende Beiträge erschienen, die Beharrungskräfte und Transformationstendenzen gemeinsam in den Blick nehmen (Moss 2016; Ambrosius/Henrich-Franke 2015).

Bereits vor gut zehn Jahren haben Stephen Graham und Nigel Thrift Kritik am Mythos einer ‚stabilen‘ Konzeption von Infrastruktur geübt (Graham/Thrift 2007:10) und Hartmut Böhme beschrieb (nicht nur technische) Netze ein halbes Jahrzehnt früher als „komplexe zeiträumliche dynamische Systeme“ (Böhme 2003: 19). Auch Rob Kitchin schreibt der Smart City und ihren Infrastrukturen ein enormes Veränderungspotenzial hinsichtlich ihrer Räumlichkeit, vor allem aber hinsichtlich der in ihr produzierten Zeitlichkeit zu (Kitchin 2017). Plädoyers für eine dynamische Auffassung von Infrastrukturen finden sich häufig in der akademischen Literatur – nicht zuletzt aufgrund des Paradigmas der Normalität von Störungen und Funktionsunterbrechungen (Little 2010). Jörn Birkmann et al. forderten aus planungswissenschaftlicher Perspektive mehr Forschungen zu den inhärenten Dynamiken von Infrastruktursystemen und Gesellschaften, da diese zentralen Faktoren für Vulnerabilität und Resilienz darstellten (Birkmann et al. 2016: 20). Auch in soziologischer Perspektive haben Infrastrukturen transformierenden Einfluss auf soziale Beziehungen in ähnlichem Maß, wie sie sie stabilisieren (Harvey et al. 2017: 5, 13).

Im Siegener Sonderforschungsbereich „Medien der Kooperation“ wird mit dem Konzept der „Infrastrukturierung“ gearbeitet. Gemeint ist, dass technische Infrastrukturen ihre Betreiber und Nutzer zu „kooperativen Praktiken“ verleiten, indem die Rahmenbedingungen ihres mit der Infrastruktur verbundenen Handelns durch Materialität und Normen der Infrastruktur gesetzt werden. Zugleich, so die Annahme, entsteht Infrastruktur erst durch diese Handlungen, welche vom Reparieren bis hin zur Nutzung von Fahrzeugen reichen. Mit diesem praxistheoretischen Ansatz soll erklärtermaßen eine systemorientierte Betrachtungsweise von Infrastrukturen abgelöst werden (Korn et al. 2019: 11, 15-17). Dieser Ansatz hat den großen Vorteil, dass er die beständige ‚Herstellung‘ von Infrastruktur und damit einen wichtigen Aspekt ihrer Dynamik fokussiert: Ohne menschliche Mitwirkung keine Infrastruktur. Außerdem erhellt er, dass Infrastrukturen oft nicht in einem reinen top-down-Prozess gesteuert werden. Allerdings blendet er aus, dass Infrastrukturen nicht nur Kooperation, sondern stets auch soziale Exklusion und Fragmentierung, nicht nur Handlungsmacht, sondern oft auch Zwänge und Unterdrückung bewirken (Rodgers/ O’Neill 2012; Laak 2017: 7-9; Engels 2014; Engels/Schenk 2014). Zudem können beim Verzicht auf die Systemperspektive unterschiedliche Skalierungen sowie die Besonderheiten in den verschiedenen Sektoren verloren gehen. Insofern reicht „Infrastrukturierung“ allein nicht hin, um die Dynamik von Infrastrukturen zu erfassen.

Die drei Elemente der Dynamik

Für sich genommen ist die Aussage recht unbestimmt, Kritische Infrastrukturen seien als dynamische Systeme zu verstehen. Wie bereits dargelegt, gibt es viele einzelne Hinweise, doch noch kein Gesamtbild. Daher wird hier eine Fokussierung auf drei Merkmale vorgeschlagen: Transformation, Zirkulation und System of Systems. Sie bilden gewiss keinen abschließenden Katalog von Eigenschaften. Sie erlauben es aber, aktuelle Herausforderungen aus der Praxis zu adressieren und das wissenschaftliche

Verständnis von Infrastrukturen weiterzuentwickeln: Alle drei sind sowohl wissenschafts- als auch praxisgetrieben, da es zu ihnen sowohl akademische Debatten als auch konkrete Herausforderungen in der Anwendung gibt. Alle drei stehen in wechselseitigen Bezügen zueinander.

Transformation repräsentiert die Veränderung von Infrastrukturen als Gesamtsysteme. Sie ist sowohl Ergebnis als auch Ursache von Dynamik. Gemeint sind tiefgreifende Wandlungsprozesse von Infrastrukturen und den sie tragenden Gesellschaften. Es handelt sich hierbei um eine zentrale Herausforderung an Gesellschaft und Technologie, aktuell vor allem diskutiert mit Blick auf Themen wie Digitalisierung, Energiewende, Übernutzung. In der historischen Betrachtung ist Transformation ein ständiges Merkmal von Infrastruktursystemen, das bei der Analyse längerer Zeiträume unweigerlich auftritt. Ungeklärt ist aber das Verhältnis zwischen einerseits radikalem (disruptivem) und andererseits inkrementell stattfindendem Wandel. Zudem darf auch das Moment des Stablen und des Alten in der Veränderung nicht vernachlässigt werden.

Zirkulation repräsentiert die in jeder Infrastrukturfunktion eingeschriebene Dynamik. Gemeint ist der Austausch von Gütern, Menschen, Informationen oder Energie in Netzen. Funktionskrisen können als Unterbrechung oder Gefährdung der Zirkulation beschrieben werden. In den letzten Jahren ist einerseits eine Zunahme von Zirkulationsanforderungen zu verzeichnen, etwa im Bereich der Kommunikation und des Transports, zugleich aber auch die Wahrnehmung ihrer Grenzen (Verkehrsüberlastung in Ballungszentren, Gefahr der Verbreitung von Pandemien).

System of Systems repräsentiert eine analytische Perspektive auf Infrastrukturen, ohne die weder die dynamische Veränderung der Systeme, noch der im Kern dynamische Betrieb ausreichend beschrieben werden können. Gemeint ist ein Konzept zur Beschreibung von Interdependenzen und Komplexität verschiedener verbundener Sektoren und Systeme. Diese sind seit der Industrialisierung, insbesondere aber in den letzten Jahren gewachsen, etwa durch den Siegeszug der Informationstechnologien als Basisinfrastruktur und der ubiquitären Abhängigkeit von der Energieversorgung. Eine zentrale Herausforderung gegenwärtiger Infrastrukturkonstruktion besteht darin, verschiedene Systeme und Sektoren so zu koppeln, dass sie integriert funktionstüchtig sind und, im Fall von Funktionsstörungen, diese auch koordiniert bewältigt werden können.

Mit den drei genannten Begriffen erfasst man Dynamik als ein Merkmal der Veränderlichkeit im Gesamtsystem (Transformation) sowie als Merkmal der Infrastrukturfunktionen (Zirkulation), gewissermaßen auf dem Makro- und Mikrolevel, aus der Außen- und sodann der Innensicht, in einer Vogelflug- und einer Feldmausperspektive. Das Konzept des System of Systems liefert zugleich einen Erklärungsansatz: Er modelliert die Infrastrukturen als gekoppelte komplexe Systeme. Dies hilft zu erklären, auf welchen Wegen die Zirkulation stattfindet (in und zwischen Netzwerken) und welche Faktoren die Zirkulation unterbrechen, erschweren oder ermöglichen (z.B. kaskadierende Ausfälle als Phänomen der Unterbrechung, unterschiedliche Rhythmen in gekoppelten Systemen als Herausforderung an Synchronisationsbedarfe etc.). Diese Phänomene können wiederum als Faktoren oder Anreize für Transformation auf der Systemebene begriffen werden, denn Koordinations- bzw. Synchronisationsbedarfe motivieren Maßnahmen zur Transformation der Infrastruktur. Umgekehrt ist aber auch zu fragen, inwieweit (historische und gegenwärtige) Transformationsprozesse der

Infrastrukturnetze die Konfiguration des System of Systems veränder(te)n: Ein klassisches Beispiel für eine technologische, ökonomische und Governance-Transformation ist der Übergang von lokaler Stromerzeugung hin zu regionalen Netzen im frühen 20. Jahrhundert, was neben der deutlich erweiterten Zirkulation der Energie vor allem auch die Voraussetzung für eine völlig neue Systemintegration schuf, über regionale und später über Landesgrenzen hinaus (vgl. Langendijk 2008).

Transformation

Transformation oder auch Transition sind im deutschen wie englischen Sprachgebrauch Beschreibungskategorien, zugleich aber auch normativ aufgeladene Anforderungen. Letzteres betrifft besonders die Energietransformation mit dem Ziel einer künftig CO₂-neutralen Energieversorgung, aber letztlich auch alle anderen Sektoren vom Personenverkehr bis zur Wasserentsorgung. Angesichts der aktuellen Herausforderungen präferieren viele Strategien adaptive, flexible Lösungen (vgl. mit Blick auf ökologische Herausforderungen Markolf et al. 2018, Coaffee/Clarke 2017). Allerdings entsteht dabei ein potenzieller Zielkonflikt: Investoren, Betreiber und Nutzer wünschen sich möglichst lang und zuverlässig funktionierende Systeme – und diese stehen zugleich unter hohem Revisionsbedarf.

Die in diesem Zusammenhang aufgeworfenen Fragen sind vielschichtig. Sie betreffen die Modellierung von Energiesystem-Ausbauprozessen (Steinke/Wolfrum/Hoffmann 2013; Schaber/Steinke/Hamacher 2012), Probleme neuer technologischer Lösungen z.B. in Smart Grids (Steinke/Kellerer 2014) oder unter Real-Time-Bedingungen (Rüppel et al. 2018), die Herausforderung legitimer Entscheidungsfindung und Partizipation (Fraune et al. 2019; Nordmann 2019) sowie der Transition Governance, als aktive Steuerung der Transformation und einer angemessenen Weiterentwicklung von Organisationsstrukturen (Monstadt/ Schmidt 2019; Knodt/Kemmerzell 2017; Patterson et al. 2017).

Transformationen von Infrastrukturen und den sie tragenden Gesellschaften sind nicht nur eine Herausforderung für die Zukunft, sondern in Geschichte und Gegenwart zu beobachten. Zwar sind technische Infrastrukturen in vielen Fällen deutlich weniger volatil als Konjunkturen der politischen Ereignisgeschichte und etwa im Fall bestimmter Verkehrsstrassen oft über Jahrhunderte stabil. Doch bedeutet dies keinesfalls, dass sie ‚eingefroren‘ wären. Zugleich lehrt die historische Perspektive begreifen, wie sehr Veränderungen meist mit Faktoren der Kontinuität verbunden sind. ‚Strukturbrüche‘ betreffen in der Regel nur einen Teil der relevanten Strukturen einer Gesellschaft oder eben einer Infrastruktur.

Insofern muss Transformation kontextualisiert und das Verhältnis von Veränderung und Persistenz darf nicht aus den Augen verloren werden. So kann man untersuchen, welche Elemente von Infrastruktursystemen sich dynamisch verändern. Sind es technische Komponenten oder ein radikaler Technikwandel, sind es die Diskurse über Infrastrukturen, sind es institutionelle Komponenten, sind es die Wissensstrukturen oder aber bestimmte Infrastrukturpraktiken? Welche Komponenten widersetzen sich einem Wandel? Möglich wäre auch, dass es durch dynamische Veränderungen zunächst nur einzelner Systemkomponenten in der Folge zu ‚Kettenreaktionen‘ kommt und damit ein struktureller Wandel ausgelöst wird. Insofern geht es um eine Gesamtsicht von (radikalem oder inkrementellem) Wandel in seinen Beziehungen zu Bleibendem.

Das Verhältnis zwischen Transformation, inkrementellem Wandel und Persistenz zu bestimmen hält viele Herausforderungen bereit. Wie oben geschildert, beschreibt Transformation zunächst die Veränderung eines gesamten Systems. Dabei stellt sich die Abgrenzungsfrage: In welcher Beziehung steht Transformation als ein Phänomen radikalen Wandels zu inkrementellen Veränderungen? Sollten beide voneinander unterschieden werden? Falls die Frage mit ja beantwortet wird, müsste ein Schwellenwert bestimmt werden, der diese Unterscheidung erlauben würde. Die Antwort kann an dieser Stelle noch nicht gegeben werden und wird vermutlich je nach empirischem Zuschnitt einzelner Arbeiten unterschiedlich ausfallen. Jedenfalls ist diese Frage gut anschlussfähig an Debatten über die enorm bedeutende Rolle „alter Technik“ (Edgerton 2006) sowie von „repair“ in der jüngeren Technikforschung (Jackson 2014; Krebs/Schabacher/Weber 2018).

„Instandhaltung“ ist nach DIN 31051 gleich Wartung, Reparatur – und eben nicht Transformation. Allerdings verwischen die scheinbar klaren Grenzen in DIN EN 13306, die „vorbeugende Instandhaltung“ und „korrektive Instandhaltung“ differenziert. Mit Blick auf Technologiewandel unterscheidet Simmie 2012 die Kategorien „displacement“, „layering“ und „conversion“, welche die Unterschiede im Abweichungsgrad von einem technologischen Pfad am Beispiel der Windenergie kategorisieren (Simmie 2012).

Einen völlig anderen Begriff des Inkrementellen findet man in der postmarxistischen Literatur. „Radikaler Inkrementalismus“ ist hier der Versuch, durch vernetzte alltägliche Handlungen der Unterprivilegierten politischen und sozialen Wandel herbeizuführen. Dies geht nicht so weit wie ein revolutionärer Bruch, soll aber radikaler ausfallen als rein systemstabilisierende Detailveränderungen. Von der Bevölkerung des Globalen Südens betriebene nichtstaatliche Infrastrukturen gelten als ein erfolgversprechender Weg zum Radikalen Inkrementalismus (Lawhon et al. 2014: 511). Schon an diesen Beispielen aus der Literatur sieht man, wie groß der Klärungsbedarf noch ist.

Aus der Perspektive vernetzter technischer Infrastrukturen bzw. des System of Systems ist zudem zu beachten, dass lokale Inkremenz häufig systemweite Auswirkungen hat, die z.B. über kumulative Effekte letztlich doch eine tiefgreifende Transformation erzeugen können.

Transformation als Merkmal Kritischer Infrastrukturen hilft, die baulich-materielle und planerische Konstruktion sowie den Betrieb von Infrastrukturen als prozesshaft zu verstehen. Hinsichtlich der Funktionskrisen können wir nun noch etwas pointierter fragen, ob Transformationsprozesse Krisen auslösen und Infrastrukturen vulnerabler machen – oder ob das Gegenteil der Fall ist (im Sinne der oben erwähnten positiven Konnotation von Vulnerabilität): Sind Transformationen das Ergebnis identifizierter Vulnerabilitäten und führen (im Idealfall) zu mehr Resilienz? Ist Resilienz das Ergebnis von Anpassungsprozessen? Auch hier gilt, dass die Antworten keineswegs feststehen – sowohl was die gerade angestoßenen Transformationsprozesse in aktuellen Infrastruktursystemen betrifft, als auch die Betrachtung der Vergangenheit. Hinsichtlich künftiger Schutzkonzepte ist das Bewusstsein für den veränderlichen, transformativen Charakter von Infrastruktursystemen essentiell, um nicht mit den Rezepten von gestern die Probleme von morgen zu adressieren. Eine große Herausforderung besteht allerdings darin, künftige Transformationen und ihre Folgen für den Schutz von Infrastrukturen gleichsam vorwegzunehmen: Transformativ und dynamisch müssen auch die Schutzkonzepte sein.

Möglicherweise wird man feststellen, dass die Disruption vor allem im politischen Raum akzentuiert wird, um beispielsweise Handlungsfähigkeit zu demonstrieren oder neue Investitionen zu rechtfertigen, während eine Betrachtung der materiellen Technologie weniger starke Brüche erkennen lässt. So wird der politisch induzierte Ausstieg aus Kernenergie und Kohleverstromung als Bruch mit der Vergangenheit inszeniert, wegen langer Übergangsfristen und Weiternutzung vorhandener Netztechnologie jedoch faktisch eher als beschleunigter Wandel zu kategorisieren sein. Daraus ergeben sich weitere Fragen: Wie lange dauert eine Transformation? Wann kann sie als abgeschlossen gelten? Die Zeitdauer ist also ein entscheidendes Kriterium.

Transformation ist ganz fundamental ein Prozess auf der Zeitachse von einem Zustand zu einem anderen. Wer keinen Begriff von Zeit hat, kann weder langfristige Veränderungen noch plötzliche Brüche erkennen. Für die Analyse von Transformationen der Infrastruktur ist das Modell der Zeitschichten hilfreich: Im Lauf der Zeit schreiben sich unterschiedliche Zustände einer Infrastruktur in diese ein und überlagern sich (Engels 2020, Weber 2019). In einer Art archäologischem Verfahren kann man in gegenwärtigen Infrastrukturen die Abdrücke älterer Zustände finden und damit das Maß der Transformation bestimmen – das betrifft übrigens nicht allein materielle Artefakte (wie ein Kabelnetz aus Kupfer- und Glasfaserkomponenten), sondern auch Organisationsprinzipien oder Rechtsbeziehungen (z.B. Nebeneinander von Bahnbeamten und privatwirtschaftlichen Angestellten der DB AG) und Programmcodes (z.B. IT-Infrastruktur der deutschen Banken, die bis heute auf Prinzipien des COBOL aus den 1980er Jahren beruht). Dieses Modell ist keinesfalls gleichzusetzen mit dem Paradigma der Pfadabhängigkeit, weil es Veränderlichkeit und die Möglichkeit des funktionalen Zusammenwirkens heterogener Komponenten betont. Zudem können hiermit zeitliche Relationen zwischen Komponenten unterschiedlichen Alters ermittelt werden.

Ähnliches gilt mit Blick auf den Raum. Wenn Infrastrukturen Raum strukturieren, dann bewirken Transformationen der Infrastruktur eine Reorganisation räumlicher Beziehungen. Diese Veränderungen können neue Konflikte hervorbringen, die nicht nur konkurrierende Raumnutzungen, sondern auch Wertkonflikte betreffen (Fraune/Knodt et al. 2019). Ein Beispiel stellt die (Um-)Benennung von städtischer Verkehrsinfrastruktur (Straßennamen) dar, in der sich raumbezogene kulturelle sowie Nutzungskonflikte überlagern (Förster/Frank et al. 2016). Ein weiteres Beispiel aus dem Bereich Energietransformation betrifft den Übertragungsnetzausbau in Deutschland. Während von politischer Seite postuliert wird, dass dieser notwendig ist, um Energie aus dem windreichen Norden in den verbrauchsstarken Süden zu transportieren, stellen vor allem bayerische Initiativen diese postulierte Notwendigkeit grundsätzlich in Frage (Weber/Kühne 2016). Vor diesem Hintergrund generiert die Transformation der Infrastruktur neue Probleme hinsichtlich der politischen Steuerung sowie der unkonventionellen politischen Partizipation. Umgekehrt kann an neuen räumlichen Relationen abgelesen werden, wie sich die Infrastruktur transformiert (Hempel et al. 2017).

Soziale Grenzziehungen (Ristic/Frank 2020) wie auch naturräumliche Gegebenheiten in einer Stadt können die Transformation stark beeinflussen. So wäre zu klären, ob Infrastrukturtransformationen auch Transformationen städtischer Räume oder städtischer Gesellschaften bedingen, oder umgekehrt, die urbane Transformation einer infrastrukturellen Transformation vorausgeht. Zu fragen ist danach, ob bestimmte städtische Gegebenheiten (z.B. Verwaltungsstrukturen, sozialräumliche Verteilung u.a.) spezifische Formen der Infrastrukturtransformation ermöglichen oder auch verhindern.

Zirkulation (als Rhythmus)

Netzgebundene Infrastrukturen besitzen eine eingeschriebene Dynamik. Ihre Funktion besteht darin, Güter, Stoffe, Personen, Informationen, Energie zu transportieren und für die Industrie, oder andere Nutzer verfügbar zu machen. Diese Güter oder Personen zirkulieren innerhalb eines Netzes, sie sind in Bewegung. Die Tatsache der Zirkulation ist nicht banal, weil es häufig nicht nur darauf ankommt, dass ein Gut an einem Ort ankommt, sondern innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Angesichts zunehmender Arbeitsteilung aber auch wachsender Interdependenzen verschiedener Systeme erhöht sich die Komplexität der Aufgabe (Laak 2011).

Der dynamische Charakter von Infrastrukturen besteht also immer auch darin, dass sie den Zweck haben zu mobilisieren. Darüber herrscht im Grundsatz Einigkeit in der Literatur. Allerdings finden sich unterschiedliche Formulierungen dazu. Wie unscharf dies gelegentlich ausfällt, zeigt der bekannte Aufsatz von Larkin, der die Begriffe „flow“, „exchange“, „movement“ und „circulation“ weitgehend synonym verwendet (Larkin 2013: 328). Mit einem eher ökonomischen Zungenschlag ist gelegentlich von „Distribution“ und „Kommunikation“ als Hauptfunktionen von Infrastrukturen die Rede (Böhme 2003: 19), oder „to convert, store and transmit resources“ (Hall et al. 2016a:6). Dirk van Laak wiederum spricht von „Mobilität“ und „Austausch“, sowie in Anlehnung an Castells von Infrastrukturen als „technischen Fließräumen“ (Laak 2018:13, 27). Es ist daraus zu schließen, dass im Grundsatz Einigkeit über die eingeschriebene Fließdynamik von Infrastrukturen besteht, es aber noch Bedarf für eine konzeptionelle Klärung gibt, welche Art Bewegung sich in und durch die Infrastrukturen materiell vollzieht.

Der Begriff Zirkulation hat eine Reihe von Vorteilen gegenüber anderen Bewegungsbegriffen. Dazu gehört, dass hier anders als bei „Bewegung“ auch das Moment des temporären Stillstehens nicht ausgeschlossen ist – ein Umstand, der in allen Infrastruktursektoren vom Verkehrswesen bis zur Energieerzeugung relevant ist (vgl. Oetting/Crespo 2018). Zirkulation umfasst, anders als „Fluss“/ „fließen“, auch Bewegungen in unterschiedliche Richtungen, wie dies in Netzen typisch ist. Allerdings muss diese Bewegung nicht *notwendigerweise* kreislaufförmig oder in einem geschlossenen technischen System erfolgen. Auch Endgeräte, die nur Informationen empfangen ohne zu ‚antworten‘, sind in Zirkulationsprozesse eingebunden. Aus diesem Grund ist auch der Begriff des Austauschs, der eine Art Gegenseitigkeit impliziert, für viele Infrastrukturtypen ungeeignet. Erik van der Vleuten hat ebenfalls die Multidimensionalität des Begriffs Zirkulation hervorgehoben, wobei es ihm vor allem um die ungerichtete Bewegung von Technologien und technologischen Innovationen zwischen unterschiedlichen Gesellschaften geht (Vleuten 2008: 978). Insofern reflektiert Zirkulation auch Forderungen der „mobility studies“, anstelle der Verkehrsmittel die Bewegung von Menschen und Gütern in den Mittelpunkt zu rücken (Mom 2003: 132; vgl. für den Bahnverkehr Oetting/Brauner 2019).

In einer kritischen Auseinandersetzung mit dem Gebrauch des Zirkulationsbegriffs in der Globalgeschichte hat Stefanie Gänger folgende Verwendung vorgeschlagen: „to designate passages that occur within a closed, if evolving, system, that are, at least potentially, circular rather than strictly one-way“ (Gänger 2017: 318). Dies entspricht recht gut einer basalen Beschreibung von Bewegung in technischen Infrastrukturen,

wenn auch Kopplungseffekte und spezifische Merkmale unterschiedlicher Zirkulationsweisen hier noch ausgeblendet sind.

Städte sind Orte verdichteter Zirkulation in und durch Infrastrukturen. Mit Blick auf die Stadtforschung wurde die Nutzung des Begriffs Zirkulation auch deshalb empfohlen, weil der Begriff ambivalent und offen ist, insofern als er beides, Ordnung und Chaos im Urbanen, zu umfassen scheint (Boutros/ Straw 2010). Die hoch verdichtete urbane Zirkulation zieht eigene Steuerungsbedarfe nach sich, gelöst etwa durch Einrichtung von Kontrollzentren städtischer Infrastrukturen, die die infrastrukturelle Zirkulation in der Stadt überwachen und die in der letzten Zeit verstärkt untersucht wurden (Luque-Ayala/Marvin 2016).

Wenn Zirkulation das wesentliche Merkmal bei der Funktionserfüllung von Infrastrukturen ist, so ist die Funktionskrise /-unterbrechung als Zirkulationskrise /-unterbrechung definiert. Umgekehrt ist die Aufrechterhaltung unterbrechungsloser Zirkulation eine Herausforderung, gerade unter den Bedingungen gekoppelter Systeme. Zirkulation verstehen heißt also, die Merkmale von Störungen ebenso wie von gelungenem Betrieb näher zu beleuchten.

Die empirischen Bedingungen von Zirkulation sind vermutlich so heterogen wie die Vielfalt netzgebundener Infrastrukturen. Wenn wir also sektorenübergreifende Erkenntnisse erlangen wollen, muss ein ausreichender Grad an Abstraktion erreicht werden. Hierzu liefern wiederum infrastrukturenspezifische Metaphern erste Hinweise: So ist häufig von „pulsierender Großstadt“, den „Pulsadern“ der Gesellschaft die Rede, wenn Infrastrukturen literarisch thematisiert werden (Richter 2018). Die Idee der Pulsstöße kann in ein analytisches Konzept übersetzt werden, nämlich das des Rhythmus.

Nicht ohne Grund stammen die ersten Ansätze zur wissenschaftlichen Rhythmusanalyse von Henri Lefebvre, jenem Stadtsoziologen, der als Urvater relationaler Raumkonzepte gilt. Lefebvre beabsichtigte mit seinem (posthum erschienenen) Werk, *Bewegung in Raum- und Zeitrelationen in der Stadt* mit dem Konzept der Rhythmusanalyse sichtbar zu machen (Lefebvre 1992). Erst in den letzten Jahren ist dieser bei Lefebvre noch recht skizzenhafte Ansatz von der Forschung aufgegriffen und weiterentwickelt worden, und zwar ganz offensichtlich infolge des erst kürzlich erwachten Interesses an Temporalitäten in den Sozial- und Kulturwissenschaften (Schmolinsky et al. 2018). Zu Rhythmen im Bereich Infrastrukturen gibt es bislang nur wenige Arbeiten (Engels 2020, Elsner/Monstadt/Raven 2019, Stahl 2018, Coletta/Kitchin 2017, Kitchin 2017).

Im Kern geht es in der Rhythmusanalyse darum, wiederkehrend auftretende Bewegungen im Raum auf der Zeitachse zu beschreiben. Entscheidend ist hier das Spannungsfeld zwischen Gleichmäßigkeit und Abweichung, welches Lefebvre bereits hervorhebt. Infrastrukturen sind letztlich Apparaturen, die eine geordnete, und damit immer rhythmisierte Zirkulation organisieren (vgl. die ausführliche Darstellung von Personenzirkulation in Untergrundbahnen bei Höhne 2017). Mit Blick auf Funktionskrisen von Infrastrukturen sind die Abweichungen besonders relevant: So kann etwa nach Toleranzen gefragt werden, die unterschiedliche Systeme hinsichtlich der Abweichung von einem vorgesehenen Rhythmus besitzen. Man nehme etwa den Bahnbetrieb: Wie groß darf eine Verspätung ausfallen, ohne Anschlüsse zu gefährden oder den geordneten Betrieb zu stören? Welche Auswirkungen hat dies auf das Nutzerverhalten? Außerdem erlaubt das Konzept des Rhythmus einen spezifischen

Zugriff auf die Frage des „alignment“ bzw. der Synchronisierung von Infrastrukturen unterschiedlicher Sektoren (vgl. dazu unten „System of Systems“).

Nun ist die Rhythmusanalyse ein junges Forschungsfeld mit vergleichsweise wenig etablierten Verfahren. Wie man einen Rhythmus bestimmt und beschreibt, ist noch eine weitgehend offene Forschungsfrage. Vorgeschlagen wird hier die Orientierung an drei unterschiedlichen Idealtypen:

1. *Linearer Typus* mit ununterbrochener Zirkulation. Dies betrifft insbesondere Infrastrukturen, die aufgrund der materiellen Eigenschaften der zirkulierenden Güter ein unterbrechungsloses Fließen garantieren sollten, z.B. Gas- und Wasserversorgung. Auch das Elektrizitätsnetz erfordert die Aufrechterhaltung eines Gleichgewichts aus Produktion und Verbrauch. Die Mehrzahl der IKT-Systeme zur Steuerung anderer Infrastrukturen können diese Funktion nur erfüllen, wenn in ihnen Daten unterbrechungslos zirkulieren.

2. *Zyklischer Typus* im Sinne einer Zirkulation mit hoher Regelmäßigkeit der Intervalle. Dies betrifft insbesondere Verkehrsinfrastrukturen, ganz besonders den Bahnverkehr, aber auch die Führung des innerstädtischen Individualverkehrs (etwa durch Ampeln) sowie die Kreuzung beider (Bahnschranken). Anstelle eines Gleichgewichts ist hier starke Regelmäßigkeit wichtig – ein Umstand, der sich z.B. auf Produktionsketten auswirken kann (Just in time-Produktion).

3. *Episodischer Typus* mit unregelmäßig rhythmisierter Zirkulation. Das betrifft zum einen viele vormoderne Infrastrukturen, die aufgrund geringerer Nutzungsdichte und weniger avancierter Technologie weder die Notwendigkeit noch die Voraussetzungen für eine hohe Regelmäßigkeit der Intervalle besaßen. Unregelmäßigkeit ist aber auch eine Herausforderung in hochmodernen Infrastrukturen, beispielsweise bei der Nutzung von Windkraft und Sonnenenergie.

Die Analyse von Rhythmen ist ein neues Verfahren. Gleichwohl existieren bereits relevante Ansätze. Im Bereich des ÖPNV- und Bahnverkehrs ist der Begriff des „Taktes“ für einen funktionierenden Rhythmus des zyklischen Typs fest verankert. In der Disposition kommt es darauf an, Abweichungen vom Takt (Fahrplan) in Richtung episodischer Fahrten zu minimieren, auch in einer Störfallsituation.

In der mathematischen Modellierung von Netzen, welche in der Regelungstechnik verwendet wird, unterscheidet man zwischen „kontinuierlichen dynamischen Systemen“ und „Ereignis-diskreten Systemen“. Kontinuierliche dynamische Systeme entsprechen dem linearen Typus und diskrete Systeme umfassen sowohl den zyklischen als auch den episodischen Typus. Während die Eigenschaften kontinuierlicher Systeme bereits gut erforscht sind, gibt es deutlich weniger Erkenntnisse über diskrete Systeme (Seatzu et al. 2013). Kaum erforscht sind bislang *Vergleiche* der Wirkung von Störungen in kontinuierlichen Systemen einerseits und diskreten andererseits (Macdonald et al. 2018), sowie die *Interaktion* zwischen den Typen: Welche Kaskadeneffekte entstehen durch Kopplungen von kontinuierlichen mit ereignis-diskreten Systemen? Erste Ansätze gab es dazu bei Giani et al. 2009.

Da es sich um Idealtypen handelt, liegen die genannten Merkmale nie in Reinform vor. Die Elektrizitätserzeugung und -bereitstellung zeigt, wie mehr oder minder episodische Produktionsfaktoren (Wind, Sonnenschein) und Konsumnachfragen (Nachfragepeaks am Morgen und Abend) mit einem Bedarf nach kontinuierlicher Netzspannung koordiniert werden müssen (Elsner/Monstadt/Raven 2019). Man hat es also in der

Realität stets mit Mischungen aus unterschiedlichen Idealtypen zu tun. Dieses Beispiel macht auch deutlich, wie sehr nicht allein technische Systemeigenschaften, sondern ebenso soziale oder ökonomische Anforderungen und Umweltbedingungen die Infrastrukturrhythmen beeinflussen. Es ergeben sich daraus wiederum Einsichten in die Funktionsweise sozio-technischer Systeme.

Konstruktion und Kritikalität von Infrastrukturen werden durch die Beachtung der Zirkulation und ihrer unterschiedlichen Rhythmen neu konturiert. Die im Rhythmus eingeschriebenen sozialen Bedürfnisse geben Hinweise auf die Kritikalität einer Infrastruktur. Zu fragen wäre, ob Infrastrukturen mit bestimmten Rhythmustypen besonders vulnerabel bzw. resilient sind – ad hoc liegt die Vermutung nahe, dass Systeme mit linearer Zirkulation besonders anfällig sein müssten, da schon kleine Unregelmäßigkeiten massive Probleme auslösen, während episodische Rhythmen eine höhere Resilienz vermuten lassen. Doch dies bedarf weiterer Forschung. Es stellt sich zudem noch eine weitere Frage, nämlich die nach der Qualität der gewünschten Zirkulation. Nicht nur Zirkulationsunterbrechung, sondern auch nicht bestimmungsgemäße Zirkulation kann mit einer Funktionskrise einhergehen. Darauf weist bereits Graham (2010:17) hin: Er spricht von „transgressive“ oder „malign circulations“, z.B. im Zusammenhang mit Terrorattacken. Eine solche „malign circulation“ liegt beispielsweise vor, wenn Giftstoffe im Trinkwasser zirkulieren oder Flugzeuge als Anschlagswaffen eingesetzt werden. Auch die Zirkulation eines Virus infolge von Personentransport kann so beschrieben werden.

System of Systems

Das „System of Systems“ repräsentiert eine vergleichsweise neue analytische Perspektive auf Kritische Infrastrukturen. Sie wurde entwickelt als Antwort auf Herausforderungen, die durch technische Entwicklungen wie die Digitalisierung, aber auch organisatorische Veränderungen wie Spezialisierung oder Fragmentierung von Zuständigkeiten und Regularien etwa in „distributed systems“ forciert wurden. Sie ergibt sich aus der Beobachtung wachsender Komplexität, zunehmender Interdependenzen und notwendiger Integration unterschiedlicher technischer Systeme. Das umfasst technische wie organisatorische Elemente. Integrationsherausforderungen dieser Art beginnen teilweise schon innerhalb eines Sektors, z.B. bei unterschiedlichen Technologien oder Betreibern. Die Disposition im S-Bahnverkehr erfordert nicht nur einen reibungslosen Ablauf des Schienenverkehrs, sondern auch Koordination mit anderen Verkehrsmitteln wie Bussen, Straßenbahnen etc., die in der Regel von anderen Unternehmen betrieben werden (Crespo 2019). Die Perspektive auf System of Systems ist eine Antwort auf die Forderung in der Literatur, sektorenübergreifende Komplexität und Interdependenz zu beschreiben und zu verstehen (Coaffee/Clarke 2017), etwa bei Kaskadeneffekten (Hempel et al. 2018).

Der System of Systems-Zugang berücksichtigt zunächst einmal die Herausforderungen durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Infrastruktursektoren (Hall et al. 2016b: 19; Monstadt/Coutard 2019). Dies wirft Fragen der technischen Umsetzung aber auch der angemessenen Governance auf. Eine besondere Herausforderung zeigt sich in politischen Systemen (Knodt/Kemmerzell 2020). Denn hier erfordert die Koordination die Einigung einer Vielzahl von Beteiligten über die grundsätzlichen politischen Ziele. Aber die Komplexität eines Governance-Systems variiert nicht nur in Abhängigkeit von der Zahl der Akteure, sondern auch in Abhängigkeit von bestehenden Interdependenzen.

Kopplung unterschiedlicher Politikfelder (auf mehreren Ebenen des politischen Systems) verlangt die Abstimmung zwischen unterschiedlichen Institutionen und Handlungsrationitäten (Huck/Monstadt/Driessen 2020). Problemadäquate Governance des „Systems of Systems“ muss zum einen die externen Effekte identifizieren, die in den einzelnen Feldern anfallen und zum anderen geeignete Koordinationsformen finden. Intersektorale, ämterübergreifende Governance und ihre entsprechenden Unterformen, wie „Problemlösen“, „positive Koordination“ oder „negative Koordination“ (Husted/Danken 2017), sowie „Policy Integration“ (Tosun/Lang 2017) können dabei sowohl als analytische Konzepte der empirischen Arbeit als auch als normative Leitbilder dienen.

System of Systems kann entweder so verstanden werden, dass eine Infrastruktur höherer Ordnung bestehende Systeme integriert, also einseitige Abhängigkeitsverhältnisse von ihr bestehen, z.B. die Energieversorgung, von der andere Systeme wie Bahn und Tram abhängen (so tendenziell bei Thacker/ Pant/ Hall 2017). Das System of Systems kann aber auch hierarchiefrei konzipiert werden, wie etwa in „distributed systems“, wo anstelle zentraler Steuerung dezentrale Mechanismen der Koordination wirksam sind.

Wenn vom „System of Systems“ die Rede ist, stellt sich immer die Frage nach dem Systembegriff. In dieser Hinsicht bleibt die Literatur zu System of Systems noch vergleichsweise unbestimmt, da sie sich in erster Linie für das Problem der Interaktion zwischen den Systemen interessiert. „An infrastructure system is the collection and interconnection of all physical facilities and human systems [...] to provide a particular infrastructure service“, so lautet die (in Teilen redundante) Definition in einer der maßgebenden Publikationen zum Thema (Hall et al. 2016a: 6). In dem von Jim Hall et al. herausgegebenen Band zu System of Systems wird das System als sozio-technisches Netzwerk in Funktion und Gestalt beschrieben: durch seine Funktion im Sinne der Leistungen einer Infrastruktur und durch seine Gestalt, die „nodes“ und „links“ umfasst (Hall et al. 2016b: 21). Auch in weiteren Publikationen der Gruppe um Hall wird deutlich, dass dem Systembegriff vor allem eine Vorstellung von Netz(werk) zugrunde liegt (vgl. ein netzwerkartiges Simulationsmodell für Infrastrukturausfälle in Thacker/ Pant/Hall 2017).

Insofern könnte man formulieren: Der System of Systems-Ansatz ist faktisch ein Network of Networks-Ansatz. Diesem wollen wir zumindest vorläufig folgen. Die Gestalt des Netzes ist im Wesentlichen bestimmt durch Knoten und Kanten sowie durch die hier stattfindenden Austauschprozesse beschreiben, also unter der Annahme inhärenter Dynamik und Veränderlichkeit (vgl. Böhme 2003: 19, 23). Der Vorteil des recht einfachen Ansatzes, Infrastruktursysteme als Netze aus Knoten und Kanten zu beschreiben, liegt in der nahezu universellen Anwendbarkeit. Auch für vormoderne bzw. mittelalterliche Infrastrukturen ist er nachweislich geeignet (Schenk 2019; Eifert 2020).

Ein Merkmal von Systemen in der klassischen Systemtheorie liegt bekanntermaßen darin, dass ihre Grenzen bestimmt werden im Sinne einer binären Entscheidung: Was ist Teil des Systems, was gehört zur Umwelt? Diese Entscheidung wird einerseits von denen getroffen, die sich im System befinden, andererseits auch von den Forscherinnen und Forschern, welche es analysieren. Der System of Systems-Ansatz, verstanden als ein Netzwerk der Netzwerke, gibt das Prinzip der Grenzziehung nicht auf, aber er geht darüber hinaus, denn er reflektiert eben auch das Phänomen der Interdependenz über

Grenzziehungen hinweg und die grundsätzliche Offenheit bei der Skalierung von Systemgrenzen (zur Umwelt von Netzen vgl. Böhme 2003: 21).

Zudem reflektiert die Idee des Netzwerks die Möglichkeit, dass seine Komponenten über Autonomie verfügen. Außerdem verträgt es sich gut mit dem Interesse an der Zirkulation als zentraler Funktion von Infrastrukturen: Um das System of Systems-Problem zu verstehen hilft es, nach den Bedingungen der Zirkulation von Gütern, Informationen, Personen innerhalb und zwischen den Infrastruktursektoren und -komponenten zu fragen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass hier kein einseitig sozialwissenschaftlicher Systembegriff zugrundeliegt, sondern auch ingenieurwissenschaftliche Disziplinen damit arbeiten. Freilich müssen die künftigen Forschungen noch zeigen, wie weit dieses Konzept trägt.

Die Perspektive des System of Systems repräsentiert die Voraussetzung zum Verständnis kaskadierender Ausfälle: Das cascading failures-Konzept beschreibt die oft chaotische, nicht vorhersehbare Ausbreitung von Funktionsstörungen über unterschiedliche Infrastrukturen hinweg (Pescaroli/Alexander 2016). Dies setzt logisch voraus, dass die betroffenen Infrastrukturen systemisch miteinander verbunden sind. Insofern liefert dieser Ansatz ein Modell zur Erklärung der Kaskaden (vgl. den mathematischen Zugang bei Klein/Klein 2019) – und es liefert damit eine Ursachenbeschreibung für die Dynamik von Funktionskrisen, also auch ihrer Vulnerabilität, oder gegebenenfalls ihrer Resilienz.

Die Literatur zu System of Systems ist stark darum bemüht, Problemlösungen aufzuzeigen. Hier finden sich unterschiedlich benannte, in ihrer Grundidee aber ähnliche Anregungen. Im Kern geht es dabei um die Frage, wie über Sektorengrenzen hinweg abgestimmte Prozesse funktionieren. In Arbeiten zur Governance von Infrastrukturen ist sowohl von Koordination, aber auch von „alignment“ (Elsner/ Monstadt/Raven 2019) die Rede, oder von notwendigen „nexuses“ (Monstadt/Coutard 2019: 2202-2203), im Sinne technischer, ressourcenbezogener, regulatorischer u.a. Interdependenzen zwischen fragmentierten sozio-technischen Systemen. Etwas technischer orientiert, wird ein Co-Design von Lösungen in verschiedenen Sektoren gefordert (Hall et al. 2016b: 20). Andere Begriffe in diesem Zusammenhang sind etwa Systemintegration oder komplexe Systemkopplung. In der Terminologie der Rhythmusanalyse könnte man von notwendiger Synchronisierung sprechen, zumal Synchronizität sowohl auf technische Funktionalitäten, als auch auf soziales und politisches Handeln angewendet werden kann (vgl. Kassung/Macho 2013).

Eine bleibende Herausforderung ist zu verstehen, wo jeweils die Grenzen zwischen einzelnen (Teil-)Systemen oder Netzen im System of Systems liegen. Vermutlich ist hier eine pragmatische Betrachtungsweise angebracht: Die Grenzen verschieben sich je nach Fragestellung und zu lösendem Technologie-Problem. Wie bereits dargestellt, ist die Stadt aus unserer Sicht der ‚Ort‘ verdichteter System of Systems-Herausforderungen. Eine offene Frage ist, ob (und wenn ja: inwieweit) Urbanisierung als ein System of Systems-Problem konzipiert werden kann.

Der System of Systems-Ansatz ist gegenwartsorientiert. Gleichwohl kann der Ansatz als analytische Perspektive auch für vergangene Gesellschaften nutzbar gemacht werden. Probleme von Synchronisierung oder Kopplung findet man ebenso in der Geschichte. Insbesondere vormoderne Stadtgesellschaften zeichneten sich durch hochgradig fragmentierte Machtansprüche, Eigentumsverhältnisse, Rechtssysteme und die Infrastrukturen durch nur teilweise normierte technische Standards aus. Im Gegensatz zu

der ad hoc-Annahme, die Diskrepanz zwischen Fragmentierung und Koordinationsbedarf sei ein rein aktuelles Problem (Hall et al. 2016c) kann festgestellt werden: Wenn auch die Anzahl netzgebundener Infrastrukturen in der Vormoderne geringer war als in der Gegenwart, bestand zugleich umso höherer Koordinationsaufwand zwischen sozialen und politischen Akteuren.

Für die Konstruktion von Kritischen Infrastrukturen sind die jeweiligen Kopplungsverhältnisse entscheidend. Die Kritikalität und Vulnerabilität einer Infrastruktur ist in dieser Perspektive das Ergebnis vielfältiger Kopplungen. Das gilt für die systembasierte Kritikalität genauso wie für die konsequenzbasierte. Nach der Studie von Hempel et al. (2018: 259) führten kaskadierende Effekte in einer Krisensituation zu einer dynamischen Veränderung von Kritikalitätszuschreibungen durch die Rettungskräfte. Solche Effekte sollten in künftigen Schutzkonzepten berücksichtigt werden. Allerdings ist die Frage noch offen, wie genau die angedeuteten alignments, nexuses oder Synchronisierungen aussehen müssen, um die Resilienz betroffener Infrastrukturen und Städte zu erhöhen.

Literatur

- Ambrosius, Gerold/ Henrich-Franke, Christian: Integration von Infrastrukturen in Europa im historischen Vergleich. Band 1: Synopse, Baden-Baden 2013.
- Ambrosius, Gerold/ Henrich-Franke, Christian: Pfadabhängigkeiten internationaler Infrastrukturnetze; in: Jahrbuch für Wirtschaftsgeschichte 56 (2015), S. 111–132.
- Birkmann, Jörn et al.: Extreme Events, Critical Infrastructures, Human Vulnerability and Strategic Planning: Emerging Research Issues; in: Journal of Extreme Events 3 (2016), S. 1–25.
- Böhme, Hartmut: Einführung. Netzwerke. Zur Theorie und Geschichte einer Konstruktion; in: Barkhoff, Jürgen/ Böhme, Hartmut/ Riou, Jeanne (Hrsg): Netzwerke. Eine Kulturtechnik der Moderne, Köln 2003, S. 17–36.
- Boutros, Alexandra/ Straw, Will (Hrsg): Circulation and the city. Essays on urban culture, Montreal 2010.
- Brüggemeier, Franz-Josef: Schranken der Natur. Umwelt, Gesellschaft, Experimente 1750 bis heute, Essen 2014.
- Coaffee, Jon/ Clarke, Jonathan: Critical infrastructure lifelines and the politics of anthropocentric resilience; in: Resilience. International Policies, Practices and Discourses 5 (2017), S. 161–181.
- Coletta, Claudio/ Kitchin, Rob: Algorhythmic governance. Regulating the 'heartbeat' of a city using the Internet of Things; in: Big Data & Society 4,2 (2017), S. 1–16.
- Crespo, Arturo: Dynamic and Intermodal Disruption-Management for Commuter Railway Networks, Darmstadt 2019. https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11662/1/Dissertation_Arturo%20Crespo%20Materna_22042020.pdf
- Dombois, Marcus: Multilayer graph networks for modeling and analyzing exercise scenarios in civil protection and disaster response, Düren 2020.
- Edgerton, David: The Shock of the Old. Technology and Global History Since 1900, London 2006.
- Eifert, Stephanie: 'Kritische' Infrastrukturen und 'Knoten' in 'Netzen' als Grundlage einer Infrastruktur-Geschichte der Vormoderne. Betrachtungen zu Frankfurt am Main und Mainz im Spätmittelalter, Dissertation Darmstadt 2020.
- Elsner, Ivonne/ Huck, Andreas/ Marathe, Manas: Resilience; in: Engels, Jens Ivo (Hrsg): Key Concepts for Critical Infrastructure Research, Wiesbaden 2018, S. 31–38.
- Elsner, Ivonne/ Monstadt, Jochen/ Raven, Rob: Decarbonising Rotterdam? Energy Transitions and the Alignment of Urban and Infrastructural Temporalities; in: City. Analysis of Urban Trends 23 (2019), S. 646–657.
- Engels, Jens Ivo: Infrastructure and Fragmentation. The Limits of the Integration Paradigm; in: Schiefelbusch, Martin/ Dienel, Hans-Liudger (Hrsg): Linking Networks. The Formation of Common Standards and Visions for Infrastructure Development, Farnham 2014, S. 19–33.
- Engels, Jens Ivo (Hrsg): Key Concepts for Critical Infrastructure Research, Wiesbaden 2018.
- Engels, Jens Ivo: Infrastrukturen als Produkte und Produzenten von Zeit; in: NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin 28 (2020), S. 69–90.
- Engels, Jens Ivo/ Schenk, Gerrit J.: Infrastrukturen der Macht - Macht der Infrastrukturen. Überlegungen zu einem Forschungsfeld; in: Förster, Birte/ Bauch, Martin (Hrsg): Wasserinfrastrukturen und Macht von der Antike bis zur Gegenwart, München 2014, S. 22–58.
- Engels, Jens Ivo/ Nordmann, Alfred (Hrsg): Was heißt Kritikalität? Zu einem Schlüsselbegriff der Debatte um Kritische Infrastrukturen, Bielefeld 2018.
- Förster, Susanne/ Frank, Sybille et al.: Negotiating German Colonial Heritage in Berlin's African Quarter; in: International Journal of Heritage Studies 22/7 (2016), S. 515–529.
- Frank, Sybille/ Krajewsky, Georg: Smarter Urbanismus und Urbanität; in: Bauriedl, Sybille/ Strüver, Anke (Hrsg): Smart City – Kritische Perspektiven auf die Digitalisierung in Städten, Bielefeld 2018, S. 63–74.

- Fraune, Cornelia/ Knodt, Michèle/ Gözl, Sebastian/ Langer, Katharina (Hrsg): Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation - Gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und Ressourcenausstattung, Wiesbaden 2019.
- Gänger, Stefanie: Circulation: reflections on circularity, entity, and liquidity in the language of global history; in: *Journal of Global History* 12 (2017), S. 303–318.
- Giani, Annarita, et al.: The VIKING project: an initiative on resilient control of power networks. 2nd International Symposium on Resilient Control Systems, IEEE 2009. DOI: 10.1109/ISRCS.2009.5251361
- Graham, Stephen: When Infrastructures Fail; in: Graham, Stephen (Hrsg): *Disrupted Cities. When Infrastructure Fails*, New York/ London 2010, S. 1–26.
- Graham, Stephen/ Thrift, Nigel: Out of Order. Understanding Repair and Maintenance; in: *Theory, Culture & Society* 24,3 (2007), S. 1–25.
- Hall, Jim W./ Nicholls, Robert J./ Hickford, Adrian J./ Tran, Martino: Introducing national infrastructure assessment; in: Hall, Jim W./ Tran, Martino/ Hickford, Adrian J./ Nicholls, Robert J. (Hrsg): *The future of national infrastructure. A system-of-systems approach*, Cambridge 2016a, S. 3–11.
- Hall, Jim W./ Otto, Alexander/ Hickford, Adrian J./ Nicholls, Robert J./ Tran, Martino: A framework for analysing the long-term performance of interdependent infrastructure systems; in: Hall, Jim W./ Tran, Martino/ Hickford, Adrian J./ Nicholls, Robert J. (Hrsg): *The future of national infrastructure. A system-of-systems approach*, Cambridge 2016b, S. 12–27.
- Hall, Jim W./ Alderson, David/ Barr, Stuart: A quantified system-of-systems modeling framework for robust national infrastructure planning; in: *IEEE Systems Journal* 10 (2016c), S. 385–396.
- Harvey, Penny/ Jensen, Caspar Bruun/ Morita, Atsuro: Introduction: Infrastructural complications; in: Dies. (Hrsg): *Infrastructures and social complexity*, London/ New York 2017, S. 1–22.
- Hempel, Leon et al.: Die Technisierung des urbanen Hinterlands. Gestaltungsalternativen als Beitrag für einen nachhaltigen Netzausbau; in: Engels, Jens Ivo/ Janich, Nina/ Monstadt, Jochen/ Schott, Dieter (Hrsg): *Nachhaltige Stadtentwicklung. Infrastrukturen, Akteure, Diskurse*, Frankfurt a.M. 2017, S. 174-197.
- Hempel, Leon/ Kraff, Benjamin D./ Pelzer, Robert: Dynamic interdependencies: Problematising criticality assessment in the light of cascading effects; in: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 30 (2018), S. 257–268.
- Heßler, Martina/ Kehrt, Christian (Hrsg): *Die Hamburger Sturmflut von 1962. Risikobewusstsein und Katastrophenschutz aus zeit-, technik- und umweltgeschichtlicher Perspektive*, Göttingen 2014.
- Höhne, Stefan: *New York City Subway. Die Erfindung des urbanen Passagiers*, Köln/ Weimar/ Wien 2017.
- Huck, Andreas: *Enhancing Urban and Infrastructure Resilience. An Institutional Perspective*, Dissertation Utrecht Darmstadt 2020.
- Huck, Andreas/ Monstadt, Jochen/ Driessen, Peter: Building urban and infrastructure resilience through connectivity: An institutional perspective on disaster risk management in Christchurch, New Zealand; in: *Cities* 98,3 (2020), S. 1-10.
- Hustedt, Thuid/ Danken, Thomas: Institutional Logics in inter-departmental coordination. Why actors agree on a joint policy output; in: *Public Administration* 95 (2017), S. 730-743.
- Jackson, Steven J.: Rethinking Repair; in: Gillespie, Tarleton/ Boczkowski, Pablo J./ Foot, Kirsten A. (Hrsg): *Media Technologies. Essays on Communication, Materiality, and Society*, Cambridge, Ann Arbor 2014, S. 221–239.
- Kassung, Christian/ Macho, Thomas (Hrsg): *Kulturtechniken der Synchronisation*, München 2013.
- Kitchin, Rob: The timescape of smart cities; in: *SocArXiv* (November 2017), S. 1–35.
- Klein, Peter/ Klein, Fabian: Dynamics of interdependent critical infrastructures – A mathematical model with unexpected results; in: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 24 (2019), S. 69–77.
- Knodt, Michèle/ Kemmerzell, Jörg: European Energy Transitions Compared. Building Blocks of a Framework for Analysis. Paper presented at the ECPR General Conference, Oslo, September 6-9, 2017, Section 48, Panel 152.

- Knodt, Michèle/ Kemmerzell, Jörg: Sektorkopplung als Verknüpfung der Energie- und Verkehrswende; in: Brunngräber, Achim/ Haas, Tobias (Hrsg): Baustelle Elektromobilität, Bielefeld 2020, S. 355-382.
- Korn, Matthias/ Reißmann, Wolfgang/ Röhl, Tobias/ Sittler, David: Infrastructuring Publics. A Research Perspective; in: Korn, Matthias/ Reißmann, Wolfgang/ Röhl, Tobias/ Sittler, David (Hrsg): Infrastructuring Publics, Wiesbaden 2019, S. 11–47.
- Krebs, Stefan/ Schabacher, Gabriele/ Weber, Heike (Hrsg): Kulturen des Reparierens. Dinge - Wissen - Praktiken, Bielefeld 2018.
- Laak, Dirk van: Garanten der Beständigkeit. Infrastrukturen als Integrationsmedien des Raumes und der Zeit; Doering-Manteuffel, Anselm (Hrsg): Strukturmerkmale der deutschen Geschichte des 20. Jahrhunderts, München 2006, S. 167–180.
- Laak, Dirk van: „Just in Time“. Zur Theorie von Infrastruktur und Logistik; in: Porombka, Wiebke/ Reif, Heinz/ Schütz, Erhard (Hrsg): Versorgung und Entsorgung der Moderne. Logistiken und Infrastrukturen der 1920er und 1930er Jahre, Frankfurt a.M. 2011, S. 13–23.
- Laak, Dirk van: Eine kurze (Alltags-)Geschichte der Infrastruktur; in: Aus Politik und Zeitgeschichte 67,16 (2017), S. 4–11.
- Laak, Dirk van: Alles im Fluss. Die Lebensadern unserer Gesellschaft - Geschichte und Zukunft der Infrastruktur, Frankfurt a.M. 2018.
- Langendijk, Vincent: Electrifying Europe. The Power of Europe in the Construction of Electricity Networks, Amsterdam 2008.
- Larkin, Brian: The Politics and Poetics of Infrastructure; in: Annual Review of Anthropology 42 (2013), S. 327–343.
- Lawhon, Mary/ Ernstson, Henrik/ Silver, Jonathan: Provincializing Urban Political Ecology: Towards a Situated UPE Through African Urbanism; in: Antipode 46 (2014), S. 497–516.
- Lefebvre, Henri: Éléments de rythmanalyse. Introduction à la connaissance des rythmes, Paris 1992.
- Little, Richard G.: Managing the Risk of Cascading Failure in Complex Urban Infrastructures; in: Graham, Stephen (Hrsg): Disrupted Cities. When Infrastructure Fails, New York/ London 2010, S. 27–40.
- Luque-Ayala, Andrés/ Marvin, Simon: The maintenance of urban circulation: An operational logic of infrastructural control; in: Environment and Planning D 34 (2016), S. 191–208.
- Macdonald, John R. et al.: Supply chain risk and resilience: theory building through structured experiments and simulation; in: International Journal of Production Research 56,12 (2018), S. 4337-4355.
- Marathe, Manas: Reimagining Traditional Water Infrastructure in its Cultural Specificity, Case of Pune, India, Darmstadt 2019. <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/9281/1/Reimagining%20Water%20Infrastructure%20in%20its%20Cultural%20Specificity%20Case%20of%20Pune%2C%20INDIA.pdf>
- Markolf, Samuel A. et al.: Interdependent Infrastructure as Linked Social, Ecological, and Technological Systems (SETs) to Address Lock-in and Enhance Resilience; in: Earth's Future 6 (2018), S. 1638–1659.
- Melosi, Martin: The Sanitary City. Urban infrastructure in America from colonial times to the present, Baltimore 2000.
- Mom, Gijs: What kind of transport history did we get? Half a century of JTH and the future of the field; in: The Journal of Transport History 24,2 (2003), S. 121-138.
- Monstadt, Jochen/ Coutard, Olivier: Cities in an era of interfacing infrastructures: Politics and spatialities of the urban nexus; in: Urban Studies 56 (2019), S. 2191–2206.
- Monstadt, Jochen/ Schmidt, Martin: Urban resilience in the making? The governance of critical infrastructures in German cities; in: Urban Studies (2019), S. 1–19.
- Moss, Timothy: Conserving Water and Preserving Infrastructures between Dictatorship and Democracy in Berlin; in: Water Alternatives 9 (2016), S. 250–271.
- Nordmann, Alfred: The ties that bind - collective experimentation and participatory design as paradigms for responsible innovation; in: Schomberg, René v./ Hankins, Jonathan (Hrsg): International Handbook on Responsible Innovation: A Global Resource, Cheltenham 2019, S. 181-193.

- Oetting, Andreas/ Brauner, Anna-Katharina: Pre-planned Disruption Management in Commuter Railway Transportation: Algorithms for (partial) Automation of passenger-oriented Design and Evaluation; in: Proceedings of Rail, Norrköping, 2019, S. 182-200.
- Oetting, Andreas/ Crespo, Arturo: Model for Estimating the Residual Transport Capacity During Passenger Deviation; in: Tagungsband der 26. VWT – Verkehrswissenschaftliche Tage der TU Dresden 2018, S. 110–122.
- Patterson, James et al.: Exploring the governance and politics of transformations towards sustainability; in: Environmental Innovation and Societal Transitions 24 (2017), S. 1-16.
- Pescaroli, Gianluca/ Alexander, David: Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters; in: Natural Hazards 83 (2016), S. 175–192.
- Richter, Steffen: Infrastruktur. Ein Schlüsselkonzept der Moderne und die deutsche Literatur 1848-1914, Berlin 2018.
- Ristic, Mirjana/ Frank, Sybille Frank (Hrsg): Urban Heritage in Divided Cities. Contested Pasts (Key Issues in Cultural Heritage Series), London/New York 2020.
- Rodgers, Dennis/ O'Neill, Bruce: Infrastructural violence: Introduction to the special issue; in: Ethnography 13 (2012), S. 401–412.
- Rudolph-Cleff, Annette: Soziale Resilienz. Was Städte stark macht; in: der architekt 6/1 (2017), S. 20–28.
- Rüppel, Uwe/ Franz, Steffen/ Irmeler, Robert: Real-Time Collaborative Reconstruction of Digital Building Models with Mobile Devices, in: Advanced Engineering Informatics 38 (2018), S. 569 – 580.
- Schaber, Katrin/ Steinke, Florian/ Hamacher, Thomas: Transmission grid extensions for the integration of variable renewable energies in Europe: Who benefits where?; in: Energy Policy 43 (2012), S. 123-135.
- Schenk, Gerrit J.: "Knoten" in "Netzen"? Überlegungen zur Hafenstadt als "kritische Infrastruktur"; in: Ettel, Peter/ Hack, Achim Thomas (Hrsg): Flusstäler, Flussschifffahrt, Flusshäfen. Befunde aus Antike und Mittelalter, Mainz 2019, S. 207–236.
- Schenk, Gerrit J./Eifert, Stephanie: „Kritische Infrastrukturen“ als Ergebnisse individueller und kollektiver Kritikalitätszumessungen – ein Ansatz für die Mediävistik?; in: Engels, Jens Ivo/ Nordmann, Alfred (Hrsg): Was heißt Kritikalität? Zu einem Schlüsselbegriff der Debatte um Kritische Infrastrukturen, Bielefeld 2018, S. 47-96.
- Schmolinsky, Sabine/ Hitzke, Diana/ Stahl, Heiner (Hrsg): Taktungen und Rhythmen. Raumzeitliche Perspektiven interdisziplinär, Berlin 2018.
- Schot, Johan: Transnational Infrastructures and the Origins of European Integration; in: Badenoch, Alexander/ Fickers, Andreas (Hrsg): Materializing Europe. Transnational Infrastructures and the Project of Europe, Basingstoke 2010, S. 82–109.
- Seatzu, Carla/ Silva, Manuel/ Schuppen, Jan van (Hrsg): Control of discrete-event systems. Automata and Petri Net Perspectives, London 2013.
- Stahl, Heiner: Verkehrsnöte. Rhythmus, Taktung und Störungen des Essener Straßenbahnverkehrs während des Ersten Weltkriegs; in: Schmolinsky, Sabine/ Hitzke, Diana/ Stahl, Heiner (Hrsg): Taktungen und Rhythmen. Raumzeitliche Perspektiven interdisziplinär, Berlin 2018, S. 143–172.
- Steinke, Florian/ Kellerer, E.: Scalable economic dispatch for smart distribution networks, in: IEEE Transactions on Power Systems 30/4 (2014), S. 1739–1746.
- Steinke, Florian/ Wolfrum, Philipp/ Hoffmann, Clemens: Grid vs. storage in a 100% renewable Europe; in: Renewable Energy 50 (2013), S. 826-832.
- Simmie, James: Path dependence and new technological path creation in the Danish wind power industry; in: European Planning Studies 20 (2012), S. 753–772.
- Thacker, Scott/ Pant, Raghav/ Hall, Jim W.: System-of-systems formulation and disruption analysis for multi-scale critical national infrastructures; in: Reliability Engineering & System Safety 167 (2017), S. 30–41.
- Thiessen, Nadja: Hochwasser an Flüssen und die Gefährdung städtischer Infrastruktur in Mannheim und Dresden im kurzen 20. Jahrhundert, Dissertation Darmstadt 2020.

- Tosun, Jale/Lang, Achim: Policy integration: mapping the different concepts; in: *Policy Studies* 38 (2017), S. 553-570.
- Vleuten, Erik van der: Toward a Transnational History of Technology. Meanings, Promises, Pitfalls; in: *Technology and Culture* 49 (2008), S. 974-994.
- Weber, Florian/ Kühne, Olaf: Räume unter Strom. Eine diskurstheoretische Analyse zu Aushandlungsprozessen im Zuge des Netzausbaus; in: *Raumforschung und Raumordnung* 74 (2016), S. 323-338.
- Weber, Heike: Zeitschichten des Technischen: Zum Momentum, „Alter(n)“ und Verschwinden von Technik; in: Heßler, Martina/ Weber, Heike (Hrsg): *Provokationen der Technikgeschichte. Zum Reflexionsdruck historischer Forschung*, Paderborn 2019, S. 107-144.
- Zimmer, Oliver: Die Ungeduld mit der Zeit. Britische und deutsche Bahnpassagiere im Eisenbahnzeitalter; in: *Historische Zeitschrift* 308 (2019), S. 46–80.