
Resilienz in städtische Verkehrssystemen: Eine Herausforderung im Kontext des Klimawandels

Mohammad Sharif*, Dirk Wittowsky

Institut für Mobilitäts- und Stadtplanung, Universität Duisburg-Essen

Abstract

Der Klimawandel verstärkt extreme Wetterereignisse und stellt eine ernsthafte Herausforderung für die Funktionalität und Resilienz urbaner Verkehrssysteme dar. Die vorliegende Studie definiert den Begriff von Resilienz bei urbanen Systemen, entwickelt Bewertungsansätze für Klimaeffekte und beschreibt Anpassungsstrategien zur Minderung von Störungen. Am Beispiel von Duisburg, einer kreisfreien Großstadt, die an der Mündung der Ruhr in den Rhein im Ruhrgebiet liegt, werden die Auswirkungen der Klimasignale Starkregen, Hitzewellen und Niedrigwasser auf den Personen- und Güterverkehr analysiert und mit einem Resilienzindex quantifiziert. Die Ergebnisse liefern Erkenntnisse für politische Entscheidungsträger und Planer, die eine Steigerung der Klimaresistenz städtischer Verkehrsnetze anstreben.

Schlagwörter / Keywords:

Klimawandel, Verkehrsnetz, Resilienz, urbane Mobilität, Wirkungsbewertung, Minderungsstrategie

1. Einführung

Städtische Verkehrssysteme sind durch die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels bedroht, wodurch neue strategische und multiple planerische Herausforderungen für die Resilienz der Infrastruktur und die Kontinuität des Verkehrs entstehen. Extreme Wetterereignisse wie Starkregen, Hitzewellen sowie hohe und niedrige Wasserstände beeinflussen sowohl die Infrastruktur als auch die Personen- als auch den Güterverkehrsströme. Die Folgen gehen jedoch über physische Schäden der Infrastruktur hinaus und umfassen z.B. Reisezeitverlängerungen, Veränderungen von Verkehrs- und Logistikströmen, Unterbrechungen von Mobilitätsangeboten oder Logistikprozessen, wirtschaftlichen Verlusten, veränderte Routenwahlentscheidungen oder der Gefährdungen der öffentlichen Sicherheit. Dabei kann die zunehmende Vernetzung urbaner Systeme, Infrastrukturen sowie Mobilitäts- und Logistikangebote und dem Verkehrsverhalten zu Kettenreaktionen führen (Kahlenborn et al., 2021). Daher müssen Verkehrsbehörden und Verkehrsunternehmen angesichts der beschleunigten Effekte durch den Klimawandel dringend sowohl Minderungsstrategien zur Emissionsreduktion als auch Anpassungsmaßnahmen zur Verbesserung der

Infrastrukturresilienz gegenüber zunehmend unvorhersehbaren Umweltbelastungen umsetzen. Das Ziel besteht darin, anpassungsfähige Systeme in einem Stabilisierungs- und Transformationsprozess zu entwickeln, die auf Herausforderungen reagieren und aus vergangenen Krisen lernen. Die Resilienz von Systemen wird nicht nur durch angepasste physische Strukturen, sondern auch durch Planungssysteme und Multi-Level-Governance-Strukturen (adaptive urbane Governance) bestimmt.

Im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel fokussiert sich die Resilienz (Maß für die Widerstandsfähigkeit eines Systems) des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur insbesondere auf die Fähigkeit von Systemen, extremen Wetterereignissen standzuhalten, unter diesen Bedingungen zu operieren und sich schnell von deren Auswirkungen zu erholen (Diab & Shalaby, 2020). Zunächst gilt es, die kritischen und vulnerablen Bereiche urbaner Systeme zu identifizieren. Darauf aufbauend können dann Resilienz-Strategien als multidimensionales Konzept entwickelt werden, das bestehende Systeme oder Menschen sich an unvorhersehbaren Störereignissen anpassen. In Anbetracht der Zunahme externer Störungen erlangt die Resilienz von Infrastrukturen eine entscheidende

Bedeutung für die Aufrechterhaltung von Lebensqualität und Stabilität in den Städten. Resilienzkonzepte finden daher vermehrt Eingang in die Planungspolitik oder sie erweitern bestehende Leitbilder der nachhaltigen Entwicklung.

Die Implikationen der Einbeziehung von Resilienz im urbanen Kontext manifestieren sich sowohl im Alltag der Bevölkerung sowie auf die soziale und wirtschaftliche Entwicklung des Systems. Auf individueller Ebene bedeutet dies, dass Mobilitätsoptionen bei systemischen Störungen der Infrastruktur nicht zur Verfügung stehen bzw. alternative Wege gesucht werden müssen. Nichtsdestotrotz obliegt es der Verantwortung der zuständigen Instanzen, eine kritische Infrastruktur aufrechtzuerhalten und in Notsituationen adäquate Rettungsangebote zur Verfügung zu stellen.

Auf der Planungsebene sind resiliente Systeme in der Lage, Störungen und kritische Ereignisse rechtzeitig zu erkennen, sie zu vermeiden oder sie im Falle ihres Eintretens proaktiv abzufedern und sich von den Auswirkungen zu erholen - strategisch erlaubt ein Resilienzmanagement eine Anpassung an veränderte Zustände. Dazu gehören die Bewältigung von Verkehrs- und Mobilitätsproblemen sowie die Aufrechterhaltung der Verkehrsfunktionalität trotz Ressourcenknappheit oder einer möglichen Preisvolatilität (Esmalian et al., 2022).

Angesichts der zunehmenden Häufigkeit und Intensität klimabedingter Gefahren für die urbanen Systeme ist die Entwicklung von Indikatoren und robuster Methoden zur Bewertung und Stärkung der Verkehrsresilienz unerlässlich. Die Quantifizierung des Nutzens von Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz (vermiedene Kosten, öffentliche Sicherheit, Sicherung der Daseinsvorsorge, kritischen Infrastruktur, etc.) stellt eine Herausforderung dar, die insbesondere durch die Unsicherheit zukünftiger Extremereignisse und deren Art und Intensität bedingt ist.

Die Resilienz urbaner Verkehrssysteme bezieht sich in erster Linie auf die Verkehrsinfrastruktur (Chalkiadakis et al., 2022) sowie auf den Betrieb des Verkehrssystems (Lu et al., 2024). Während ersteres die strukturelle Resilienz der Infrastrukturen analysiert, bewertet letzteres die funktionale Leistungsfähigkeit der Systeme und deren Risiko gegenüber Störungen (z.B. Einschränkungen, Schockereignisse, temporäre Störungen, Katastrophen) (Sharif & Wittowsky, 2025). Im Vergleich zu topologischen Verwundbarkeitsstudien ermöglichen systembasierte Ansätze eine intuitivere Bewertung der Auswirkungen und erfassen ein breiteres Spektrum an Folgen disruptiver Ereignisse (Mattsson & Jenelius, 2015).

Der vorliegende Text befasst sich mit der Fragestellung, inwiefern der Klimawandel die Funktionalität urbaner Verkehrssysteme durch verstärkte extreme Wetterereignisse beeinflusst und wie widerstandsfähig diese gegenüber solchen Ereignissen sind. Das Ziel besteht darin, Einblicke sowohl in die Schwachstellen als auch die Strategien zur Stärkung der Resilienz urbaner Verkehrsnetze zu geben. Darüber hinaus werden durch die Anwendung der Verkehrsmodellierung bei Starkregen- Hitzewellen- und Niedrigwasser in unterschiedlichen Szenarien quantitative Resilienzmaße für die Stadt Duisburg bereitgestellt. Die Ergebnisse unterstützen politische Entscheidungsträger Verkehrs- und Stadtplaner sowie Forscher bei der Entwicklung nachhaltiger und klimaresilienter Verkehrssysteme.

2. Resilienz in urbanen Verkehrssystemen

2.1. Definition und Komponenten der Resilienz

In Anbetracht zunehmender externer Störungen erlangt die Resilienz von Stadtstrukturen und Verkehrssystemen eine entscheidende Bedeutung für die Aufrechterhaltung von Lebensqualität und Schaffung von Stabilität. Es ist von essenzieller Bedeutung, dass Resilienzkonzepte bestehende Leitbilder zur nachhaltigen Entwicklung erweitern und in formelle sowie informelle Planungsgrundlagen integriert werden. In sozio-ökonomischen Systemen wird die Resilienz als die Kapazität einer Gesellschaft definiert, zu lernen und sich an veränderten (Umwelt-)Bedingungen anzupassen.

Das Konzept der Resilienz wurde erstmals in einer Studie über ökologische Systeme (Ecological Systems) eingeführt, in der es als die Fähigkeit dieser Systeme beschrieben wurde, Veränderungen in Umweltvariablen aufzunehmen und diese zu bewältigen (Holling, 1973). Später wurde dieses Konzept auch in andere Fachgebiete übertragen, einschließlich der Stadtplanung und den Verkehrswissenschaften. Allerdings ist Resilienz in Verkehrssystemen kein einheitlich definiertes Konzept, da es verschiedene Ebenen (z.B. bauliche, technische oder organisatorische) aufweisen kann sowie verschiedene Sektoren (Fuß-, Rad-, Straßen-, Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr) umfasst. Die Resilienz urbaner Verkehrssysteme wird definiert als „die Fähigkeit eines Systems, die Auswirkungen einer externen Störung (Schock, Unterbrechung oder Katastrophe) vorzubeugen und zu widerstehen, das System zu schützen und Schäden zu verringern bzw. proaktiv im Falle ihres Eintretens proaktiv abzufedern und eine Erholungsphase einzuleiten, um die Funktionalität des Stadt- oder Verkehrssystems aufrechtzuerhalten (statische Resilienz), sowie den regulären Betrieb und die Lebensqualität innerhalb eines vertretbaren Zeit- und Kostenrahmens

wiederherzustellen (dynamische Resilienz) bzw. das System in der Lage ist, sich an die veränderten Umstände anzupassen" (Gonçalves & Ribeiro, 2020).

Es gibt viele Merkmale, die mit Resilienz in Zusammenhang stehen. Das sogenannte „Resilienz-Dreieck“ ist einer der am häufigsten verwendeten Ansätze zur Darstellung der Netzwerkresilienz (Bruneau et al., 2003). Dieses Dreieck stellt sowohl den Funktionsverlust und die Störungen eines Systems als auch das Muster des Umstrukturierens und der Wiederherstellung über die Zeit dar. Abbildung 1 zeigt eine allgemeine Darstellung der Eigenschaften von Resilienz. Das Resilienz-Dreieck besteht aus drei Seiten: Eine Seite zeigt die Abnahme der Funktionalität ($Q(t)$), wenn das Ereignis zum Zeitpunkt t_0 eintritt, die zweite Seite zeigt die Wiederherstellungszeit ($t_r - t_0$), und die Steigung der dritten Seite zeigt die Wiederherstellungsgeschwindigkeit. Allerdings reicht keine einzelne Seite oder Eigenschaft aus, um eine so facettenreiche Eigenschaft wie Resilienz vollständig zu beschreiben. Die Systemfunktionalität zum Zeitpunkt t ist $Q(t)$. Die Fläche des Resilienz-Dreiecks kann den Resilienverlust (RL) infolge eines Ereignisses abschätzen. Der Resilienzindex $R(t_r)$ stellt die Resilienz durch einen Parameter dar, dessen Wert zwischen 0 und 1 liegt (Reed et al., 2009).

„Robustheit“ und „Schnelligkeit“ („Rapidity“) sind die beiden Schlüsseleigenschaften von Resilienz. Robustheit bezeichnet „die Fähigkeit, einem bestimmten Belastungsgrad standzuhalten, ohne dabei eine Verschlechterung oder einen Funktionsverlust zu erleiden“, während Schnelligkeit „die Fähigkeit beschreibt, Prioritäten zeitgerecht umzusetzen und Ziele zu erreichen, um Verluste einzugrenzen und zukünftige Störungen zu vermeiden“ (Sun et al., 2020). Das Diagramm in Abbildung 1 verdeutlicht, dass sowohl Robustheit als auch Schnelligkeit durch Risikominierungsmaßnahmen vor einer Katastrophe sowie durch Reaktionsmaßnahmen nach einem Ereignis verbessert werden können. Resilienzanalyse urbaner Verkehrssysteme konzentriert sich stärker auf die Analyse nach Schockereignissen oder Katastrophen, insbesondere nach dem Auftreten von Naturkatastrophen wie Starkregen und Überschwemmungen (Salvo et al., 2025).

Die Resilienz von städtischen Verkehrssystemen ist ein wichtiger Aspekt der Stadt- und Verkehrsplanung, da sie die Fähigkeit -auch planerisch - stärkt, sich an Veränderungen anzupassen und sich von Störungen zu erholen. Dabei ist es aus einer strategisch-planerischen Sicht die multikriterielle Bewertung und Überführung des theoretischen Begriffs in ein anwendbares Mess- und Analyseinstrument zur Ableitung

Handlungsmaßnahmen von zentraler Bedeutung. Dabei wird die Grundstruktur durch die beiden Dimensionen Robustheit und Anpassungsfähigkeit aufgespannt (vgl. Abbildung 2). Dabei befasst sich die Dimension der Robustheit mit baulichen, institutionellen und sozioökonomischen Strukturen der Stadt und der Verkehrssysteme, um externe Störereignisse und negative Auswirkungen von Krisen oder Katastrophen abzumildern. Die Robustheit setzt sich aus den Kriterien Diversität, Redundanz, Multifunktionalität und Erholungsfähigkeit zusammen (Kötter et al., 2018). Als zweite Dimension wird die Anpassungsfähigkeit definiert, die sich aus den Kriterien Reaktionsfähigkeit, Innovationsfähigkeit und Umsetzungsfähigkeit ableitet. In diesem Zusammenhang beschreibt sie die Fähigkeiten und Strategien einer Stadt und eines Verkehrssystems zur Anpassung (Adaption und Mitigation) an neue stressauslösende Rahmenbedingungen und Entwicklungen (ebenda).

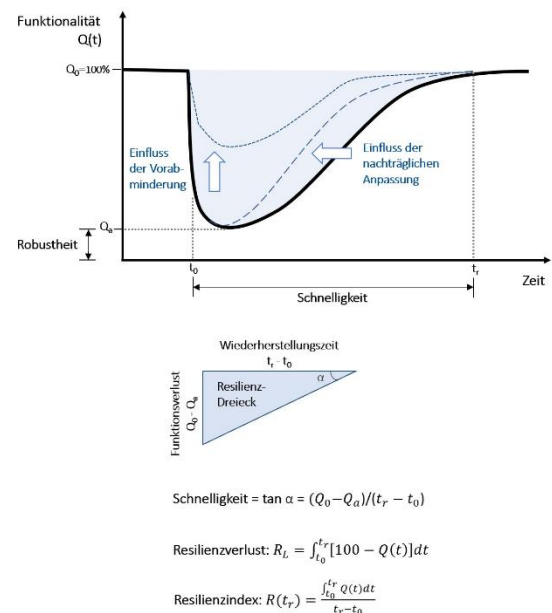


Abbildung 1: Definition von Resilienz und die Auswirkungen von Entscheidungsprozessen darauf (McDaniels et al., 2008; Sun et al., 2020)

Robustheit	Strukturen der Robustheit Bauliche, institutionelle und sozioökonomische Strukturen einer Stadt, die negative Auswirkungen von Krisen oder Katastrophen verhindern.
Diversität	
Redundanz	
Multifunktionalität	
Erholungsfähigkeit	
Bewertung überwiegend quantitative Indikatoren	

Anpassungsfähigkeit	Kompetenzen der Anpassungsfähigkeit Fähigkeiten und Strategien einer Stadt zur Anpassung (Adaption und Mitigation) an neue stressauslösende Rahmenbedingungen und Entwicklungen.
Reaktionsfähigkeit	
Innovationsfähigkeit	
Umsetzungsfähigkeit	
Bewertung überwiegend qualitative Indikatoren	

Abbildung 2: Konzept der Resilienz für den Stresstest Stadt (Kötter et al., 2018)

Es erfolgt eine Aufrechterhaltung fundamentaler urbaner Strukturen und Funktionen. Dies könnte zu neuen Formen der Anpassungsfähigkeit oder möglicherweise zu transformatorischen Veränderungen führen (Folke et al., 2010). Die Konzentration auf Kippunkte und Grenzwerte kann dazu führen, dass allmähliche Veränderungen übersehen werden. Diese Veränderungen können sich im Laufe der Zeit aufsummieren und zu unvermeidbaren Schäden führen.

2.2. Ansätze zur Resilienzbewertung

Die Ansätze zur Bewertung der Resilienz unterscheiden sich je nach Forschungszielen, Datenverfügbarkeit und dem Komplexitätsgrad des Netzwerks, das untersucht werden soll. Diese lassen sich hauptsächlich in die Kategorien Simulation, Modelloptimierung, Graphentheorie, probabilistische Methoden und Big Data einordnen (Serdar et al., 2022). Unter diesen Methoden erweist sich die Simulation als ein wirksames Mittel zur Bewertung der Resilienz von Verkehrsnetzen. Sie ermöglicht die Leistungsbewertung unter realen+ und hypothetischen Szenarien. Diese Eigenschaften machen sie besonders geeignet zur Identifizierung von Schwachstellen, Leistungsdefiziten und kritischen Elementen. Die größte Einschränkung simulativer Ansätze ist der erhebliche Rechenaufwand, der die Größe der analysierbaren Systeme begrenzt oder eine Skalierung auf Stadtebene erschwert (Balal et al., 2019).

Resilienz-Bewertungen setzen sich zumeist aus mehreren Schritten und Komponenten zusammen. Zunächst erfolgt die Bewertung von Einwirkungen auf der Objektebene durch die externe Störung, im Anschluss die Bewertung der lokal an diesem Projekt auftretenden Auswirkungen. Dies kann z.B. über ein regelbasiertes System oder über eine mehrdimensionale Bewertungsmatrix bezüglich der Exposition (z.B. gering bis sehr hoch) und der Vulnerabilität sowie der Ausfalldauer (kurz bis langfristig) und des Verfügbarkeitslevel (z.B. keine Einschränkung bis Sperrung) umgesetzt werden. Zum Schluss werden auf der Netzebene die resultierenden globalen Auswirkungen über einen Funktionalitätslevel (z.B. Reisezeitverluste gegenüber dem ungestörten Netz) und der Ausfalldauer ausgedrückt (Mayer et al., 2020).

2.3. Resilienzindikatoren

Resilienz wurde in mehreren spezifischen Bereichen des städtischen Verkehrssystems implementiert, wobei der Fokus insbesondere auf Straßen- und Schienensysteme lag, sowohl monomodal als auch in integrierter Form (inter- und multimodal). Die Resilienzindikatoren ergeben sich aus der Überlagerung

einer Vielzahl von Variablen, die üblicherweise zur Charakterisierung des Systems und zur Bewertung der Leistung in Verkehrsanalysen herangezogen werden (Gonçalves & Ribeiro, 2020). Leistungsorientierte Indikatoren (z.B. Servicelevel, Kapazität oder Reisezeit) stellen die am häufigsten verwendeten Indikatoren dar und spiegeln die Veränderungen der Systemleistung über die Zeit wider und konkretisieren die Resilienzanalyse (Serdar et al., 2022).

Darüber hinaus sind netztopologische Indikatoren entscheidende Werkzeuge zur Bewertung der Resilienz von Verkehr und Transport in Straßennetzen, da sie quantitative Einblicke in die strukturelle Robustheit und funktionale Effizienz des Netzwerks unter Störungen bieten. Es wurden signifikante Indikatoren wie Knotengrad (node degree), Zwischenzentralität (betweenness centrality), Netzdichte (network density), Clusterkoeffizient (clustering coefficient) oder Netzdiameter (network diameter) identifiziert, die eine Bewertung ermöglichen, wie gut ein Straßensystem die Konnektivität aufrechterhalten kann, Verkehrsströme umgeleitet werden können oder das System zu stabilisieren, falls es zu Unfällen, Naturkatastrophen oder Infrastrukturversagen kommt (Sun et al., 2020). Die Auswertung dieser Indikatoren erlaubt Rückschlüsse auf die Ausbreitung von Störungen innerhalb des Systems sowie die Priorität von erforderlichen Interventionen.

Reiseindikatoren (z.B. Routenverfügbarkeit, Distanzen oder Reisezeitverluste) sowie Verkehrsindikatoren (z.B. Verkehrsbelastungen, Geschwindigkeitsanpassungen, Dauer von Verkehrssperrungen, Betriebskosten, Emissionen, Trennungseffekte und Unfallkosten) sind besonders geeignet, um die Resilienz von Transportsystemen bei Extremwetterereignissen zu definieren und zu analysieren. In jüngeren Studien wurden zudem adaptive Kapazitätsindikatoren integriert, wie die Effizienz von dynamischen Routenwahlentscheidungen oder bedarfsgesteuerte Verkehrsangebote. Mithilfe dieser Indikatoren wird gemessen, wie schnell das System auf unerwartete Störungen reagieren kann (Calabrò et al., 2023). Darüber hinaus haben soziale Indikatoren wie z.B. Mobilitätsgerechtigkeit, einschließlich der Erreichbarkeit kritischer Infrastrukturen oder der Daseinsvorsorge für vulnerable Bevölkerungsgruppen an Bedeutung als Resilienz Kennzahlen gewonnen, um die Inklusivität von Transportsystemen in Krisensituationen zu gewährleisten (Pregolato et al., 2017).

Über die genannten Kennzahlen hinaus konzentrieren sich Resilienzindikatoren ebenfalls auf die Wiederherstellungsdynamik des Systems sowie dessen langfristige Anpassungsfähigkeit (Hosseini et al.,

2016; Wang et al., 2024). Die Wiederherstellungsdynamik ist ein Maß, wie schnell und effizient ein Verkehrssystem nach Störungen wieder ein normales oder akzeptables Leistungsniveau erreichen kann. Als Indikatoren hierfür werden die Wiederherstellungszeit, der Durchsatz des Verkehrsflusses sowie temporäre Auslastungs- und Überlastungsgrade herangezogen. Im Gegensatz dazu spiegelt die langfristige Anpassungsfähigkeit die Fähigkeit des Systems wider, aus vergangenen Störungen zu lernen, die Widerstandsfähigkeit gegen zukünftige Schockereignisse zu verbessern, Veränderungen im Transport- und Verkehrsverhalten zu integrieren sowie neue Technologien und Infrastrukturverbesserungen einzubinden. Wesentliche Aspekte der Anpassungsfähigkeit umfassen Infrastrukturredundanz, verkehrsträgerübergreifende Flexibilität, Investitionen in intelligente Technologien oder die Reaktionsfähigkeit in strategischen Planungsprozessen.

3. Klimawandelprojektionen für Deutschland

Klimawandelprojektionen für Deutschland weisen auf signifikante Veränderungen bei Temperaturen, Niederschlagsmustern und Wasserständen hin (Crespi et al., 2023).

Deutschland hat bereits eine ausgeprägte Erwärmung erfahren, es ist davon auszugehen, dass dieser Trend anhalten wird. Gemäß dem Deutschen Wetterdienst (Deutscher Wetterdienst, 2025) verzeichnete Deutschland im Jahr 2024 die höchste Durchschnittstemperatur seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1881. Die gemessene Temperatur lag bei 10,9 °C – was eine Steigerung von 2,7 °C im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 und 1,6 °C über dem Zeitraum 1991–2020 entspricht. Prognosen zufolge wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts – abhängig vom gewählten Emissionsszenario – ein weiterer Temperaturanstieg von 1,1 bis 4,6 °C gegenüber dem Zeitraum 1971–2000 erwartet. Die Anzahl der Hitzetage (Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C) lag im Jahr 2024 im Durchschnitt bei etwa 12,5 und wird insbesondere im Süden Deutschlands voraussichtlich deutlich steigen (Umweltbundesamt, 2025).

Es ist davon auszugehen, dass die Niederschlagsmuster sich voraussichtlich ebenfalls signifikant verändern werden. Eine Analyse der Niederschlagswerte seit 1881 zeigt eine signifikante Zunahme des jährlichen Niederschlags um etwa 9 %. Der Zeitraum von Juli 2023 bis Juni 2024 war das niederschlagsreichste Zwölfmonatsintervall seit Beginn der Wetteraufzeichnungen in Deutschland, mit einer durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 1.070 Litern pro Quadratmeter. Zukünftige Projektionen deuten auf eine Zunahme der Niederschlagsmenge in den

Wintermonaten sowie auf eine Abnahme der Niederschlagsmenge in den Sommermonaten hin. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte der Winterniederschlag um bis zu 25 % zunehmen, während der Sommerniederschlag in einigen Regionen um bis zu 40 % abnehmen könnte.

Veränderte Niederschlagsmuster und erhöhte Verdunstung infolge höherer Temperaturen dürften sich erheblich auf die Wasserstände auswirken. In Deutschland kam es bereits zu signifikanten Niedrigwasserereignissen, insbesondere während der heißen und trockenen Sommer der Jahre 2018 bis 2020. Diese Niedrigwasserperioden hatten tiefgreifende Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt, insbesondere auf den Rhein, der als Deutschlands wichtigste Wasserstraße gilt. Während der Niedrigwasserphase im Jahr 2018 sank die insgesamt transportierte Gütermenge auf deutschen Binnengewässern um etwa 25 Millionen Tonnen im Vergleich zum Vorjahr, was einem Rückgang von 11,1 % entspricht (Umweltbundesamt, 2025). Ohne Klimaschutzmaßnahmen könnte die Rheinschifffahrt bis zum Jahr 2100 mit über 45 Niedrigwassertagen pro Jahr konfrontiert sein (Ebner von Eschenbach et al., 2022).

4. Klimawandel und urbane Verkehrssysteme

Die beiden Ansätze – Wirkungsbewertung sowie Strategien zur Minderung und Anpassung an klimabedingte Ereignisse – sind für die Bewertung der Resilienz im Bereich der urbanen Mobilität von zentraler Bedeutung. In diesem Abschnitt werden diese beiden Aspekte behandelt, indem zentrale Themen skizziert werden (Batur et al., 2024; Bedoya-Maya et al., 2024; Böcker et al., 2016; Böcker et al., 2013; Böcker et al., 2019; Deublein et al., 2021; Galich & Nienland, 2023; Markolf et al., 2019; Mayer et al., 2020; Melkonyan et al., 2024; Roth et al., 2023).

4.1. Extreme Ereignisse und deren Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten in Städten

Belastung und Abnutzung der Infrastruktur sowie Veränderungen des Mobilitätsverhaltens sind Konsequenzen extremer Wetterereignisse, die eine zentrale Rolle für die Resilienz städtischer Verkehrssysteme spielen. Aus infrastruktureller Sicht kann extreme Hitze zu Verformungen, Aufwölbungen oder Aufbrüchen von Straßenbelägen (Blow-ups, Spurrillen), Ausdehnung und Verformung von Schienen und Weichen sowie einer erhöhten Belastung durch Risse und strukturelle Schäden an Brücken und Tunneln führen. Abgesehen von der Infrastruktur besteht die Möglichkeit, dass Batterien in den Fahrzeugen überhitzen, Klimaanlage ausfallen, der Reifenverschleiß zunimmt oder Logistikprozesse durch Hitzestress bei

den Mitarbeitenden, verminderte Lagerungsmöglichkeiten oder Fahrzeugausfälle negativ beeinflusst werden.

Starkregenereignisse können eine Vielzahl von Folgen haben, darunter Überschwemmungen und Überflutungen von Straßen und Schienenwegen, Destabilisierung und Zerstörung von Straßen- und Bahntrassenabschnitten infolge von Hangrutschen und Unterspülungen, Hindernisse auf Straßen- und Schienenwegen sowie die Aufweichung von Gleisbetten. Darüber hinaus können die Fahrbahngriffigkeit verringert, Aquaplaning-Unfälle verursacht, die Sicht eingeschränkt und Entwässerungssysteme überlastet werden. Darüber hinaus können aufgrund hoher Wasserstände Einschränkungen hinsichtlich der Schifffbarkeit auftreten. Der Betrieb von Fähren und Schiffen wird durch niedrige Wasserstände beeinträchtigt, was zu einer modalen Verkehrsverlagerung führt. Dies resultiert in einer erhöhten Nachfrage nach Transporten auf Straßen und Schienen, was eine zusätzliche Belastung der Infrastruktur zur Folge hat.

Diese Ereignisse haben folglich auch Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten – besonders auch bei vulnerablen Personengruppen – und die Organisation von Transportprozessen. Durch Hitze und Hitzestress kann die körperliche und mentale Gesundheit (z.B. sinkende Konzentrationsfähigkeit) und körperliche Gesundheit (z.B. Flüssigkeitsmangel, Hitzeschlag, Herzinfarkt, Sonnenbrand) beeinflusst werden, so dass weniger aktive Mobilität durchgeführt werden kann bzw. neben der Veränderung der Verkehrsmittelwahl auch die Wahl der Abfahrtszeiten neu justiert werden muss oder Wege und Fahrten ganz vermieden werden.

Darüber hinaus ist eine Anpassung der Arbeitszeiten möglich, da körperliche Arbeiten (z.B. erhöhte Erschöpfung) eingeschränkt durchgeführt werden können. Hitzefrei an Schulen und ein verstärkter Homeoffice-Anteil können zu Veränderungen der Abfahrtszeiten und der Verkehrsnachfrage führen. Zudem können alternative Routen (z.B. Wege mit Schatten und geringer Steigung) gewählt werden und die Zielwahl (z.B. mehr Aktivitäten am Wasser) kann beeinflusst werden. Die Sensibilisierung und Bewusstseinsbildung der Bevölkerung in Bezug auf die gesundheitlichen Konsequenzen haben das Potenzial, signifikante Veränderungen zu induzieren, deren Effekte jedoch noch nicht vollständig absehbar sind und bislang kaum in Modellen abgebildet werden. Die Mehrheit der Effekte sind ebenfalls durch Starkregen (z.B. Anpassung Verkehrsmittelwahl, Verschiebung der Abfahrtszeiten bzw. Verlagerung der Fahrt auf einen anderen Tag) bedingt. Darüber hinaus ist mit einer vermehrten Anpassung der Routen durch gesperrte

Straßen, längeren Reisezeiten durch reduzierte Geschwindigkeiten sowie einer Anpassung der Fahrweise zu rechnen.

Tabelle 1 zeigt die Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf die Verkehrsmittelwahl und das Mobilitätsverhalten in Abhängigkeit von der Verkehrsart. Individualverkehr umfasst den Personenverkehr, bei dem Personen durch die persönliche Wahl das Fortbewegungsmittel und die Mobilität bestimmen, wie Pkw, Motorrad, Fahrrad oder zu Fuß gehen. Der kollektive Verkehr (öffentlicher Personennahverkehr – ÖPNV) umfasst primär Straßenbahnen, Busse, Züge, U-Bahnen und Fähren. Dieser ist für alle Personen zugänglich und zeichnet sich in der Regel durch festgelegte Zeiten und Routen aus, die in Fahrplänen ausgewiesen sind. Der Güterverkehr ist definiert als der Transport von Gütern auf den Verkehrswegen Straße, Schiene, Wasser und Luft unter Nutzung von Lastkraftwagen, Zügen, Flugzeugen und Schiffen.

4.2. Anpassungs- und Minderungsstrategien im Mobilitätsverhalten

Im Hinblick auf den Klimawandel erweist es sich als entscheidend, die Resilienz und Nachhaltigkeit von Verkehrssystemen zu stärken. Zu diesem Zweck sind Anpassungs- und Minderungsstrategien zu entwickeln, die auf die Verkehrsnachfrage, die Systemleistung, die Verkehrsmittelwahl und das Reiseverhalten abzielen. Strategische Maßnahmen – wie dynamisches Verkehrsmanagement, verbesserte Infrastrukturgestaltung, multimodale Integration und nachfrageorientierte Planung – ermöglichen es Systemen, Schocks zu absorbieren und gleichzeitig wesentliche Verbindungen aufrechtzuerhalten. Tabelle 2 gibt einen Überblick über Anpassungs- und Minderungsstrategien im individuellen, kollektiven und Güterverkehr als Reaktion auf extreme Wetterereignisse.

5. Modellierung des Straßenverkehrs unter klimabedingte Ereignisse – Fallstudie der Stadt Duisburg

Zur Quantifizierung der Resilienz eines Verkehrssystems im Kontext klimabedingter Ereignisse wurden Analysen auf Stadtebene durchgeführt. Als Untersuchungsregion wurde die Stadt Duisburg im Ruhrgebiet des westlichen Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (NRW) ausgewählt. Duisburg ist die fünfzehntgrößte Stadt Deutschlands und die fünftgrößte in NRW. Der Stadtteil Duisburg-Ruhrort ist Standort des größten und bedeutendsten Binnenhafens Deutschlands und fungiert somit als zentraler Knotenpunkt für Logistik und Verkehr. Darüber hinaus sind der Ausbau der Trimodalität sowie der Übergang zu alternativen Verkehrsformen klimabedingte Anpassungsmaßnahmen.

Tabelle 1: Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf das Mobilitätsverhalten

	Extreme Hitze	Starker Regen	Niedrige Wasserstände
Individualverkehr (IV)	- Reduzierte Mobilität durch weniger Aktivitäten im Freien. - Verlagerung der Reisezeiten auf kühlere Tageszeiten. - Kürzere Entfernungen bei Fuß- und Radwegen. - Bevorzugung schattiger Routen oder unterirdischer Wege. - Zunahme (klimatisierende) Autonutzung.	- Wechselwirkungen Umstieg vom ÖPNV (Haltestelle nicht erreichbar) auf das Auto und vom Auto auf den ÖPNV (Verkehrssicherheit). - Reiseverzögerungen oder -Wegfall/Verschiebung der Aktivität infolge überfluteter Straßen und eingeschränkter Sichtverhältnisse.	- Anpassung der Verkehrswege und -gewohnheiten durch veränderte Wasserstraßenzugänglichkeit. - Anstieg alternativer Verkehrsmittel.
Kollektiver Verkehr (ÖPNV)	- Höhere Nachfrage nach klimatisierten Transportmitteln. - Zunehmendes Interesse an Ride-Hailing-Diensten. - Erhöhte Spitzenbelastung am Morgen und Abend.	- Kapazitätsengpässe im ÖPNV. - Verlagerung vom Rad- und Fußverkehr zum ÖPNV. - Reiseverzögerungen aufgrund überfluteter Straßen und Störungen der Bahnleittechnik. - Ausfall von Fahrten. - Dynamische Fahrplananpassungen und flexible Bedienformen.	- Beeinträchtigung fährbasierter öffentlicher Verkehrssysteme. - Höhere Nachfrage nach straßen- und schienenbasierten Alternativen. - Längere Pendelzeiten.
Güterverkehr	- Verlagerung auf klimatisierte Transporte und kürzere Lieferfenster zur Vermeidung von Qualitätseinbußen temperaturempfindlicher Waren. - Verzögerungen infolge von Geschwindigkeitsbeschränkungen bei überhitzten Schienen. - Reduzierte Transportleistungen durch Hitzebelastungen der Fahrer und Verlader.	- Eingeschränkter Lkw-Verkehr durch überflutete Straßen und schlechte Sichtverhältnisse. - Eingeschränkter Schienengüterverkehr. - Verlagerung vom Straßen- zum Schienengüterverkehr zur Umgehung überfluteter Straßen. - Unvorhersehbare Lieferzeiten und verlängerte Transportdauer. - Erhöhtes Verkehrsaufkommen auf alternative Routen.	- Eingeschränkte Kapazität oder vollständiger Ausfall des Binnenschiffverkehrs. - Verlängerte Transportzeiten durch Überlastung alternativer Verkehrsträger (Straße/Schiene). - Vermehrter Einsatz intermodaler Strategien (z.B. Kombination von Schiene und Straße). - Steigende Logistikkosten infolge von Unterbrechungen in der Lieferkette.

Tabelle 2: Anpassungs- und Minderungsstrategien für das Mobilitätsverhalten

	Extreme Hitze	Starker Regen	Niedrige Wasserstände
Individualverkehr (IV)	- Förderung aktiver Mobilitätsformen außerhalb der Spitzenzeiten bzw. bei kühleren Temperaturen. - Förderung klimatisierter und elektrisch betriebener Fahrzeuge. - Etablierung städtischer Beschattungsmaßnahmen und kühlender Korridore. - Einsatz hitzeadaptiver Navigationssysteme.	- Förderung flexibler Reisezeiten. - Verbesserung der Wetterinformationssysteme zur Reiseplanung. - Ausbau der Entwässerungsinfrastruktur.	- Verbesserung der intermodalen Erreichbarkeit. - Förderung alternativer Routen zur Umgehung betroffener Fährverbindungen.
Kollektiver Verkehr (ÖPNV)	- Nachrüstung von Haltestellen und Fahrzeugen mit hitzeresilienten Technologien. - Optimierung des Fahrplans zur Verkürzung von Wartezeiten.	- Infrastrukturverbesserung an Haltestellen und Knotenpunkten. - Bereitstellung von Echtzeitinformationen bei Störungen.	- Umleitung oder Reduktion des Fährbetriebs. - Nachfrageverlagerung auf Bahn und Bus bei geringer Schiffbarkeit. - Einsatz von Flachwasserfahrzeugen.
Güterverkehr	- Verlagerung auf nächtliche Lieferungen zur Vermeidung von Hitzebelastung. - Nutzung temperaturkontrollierter Logistiksysteme. - Diversifizierung der Transportkorridore zur Vermeidung überlasteter und hitzeanfälliger Strecken.	- Anpassung der Lieferpläne an sturmgefährdete Zeiträume. - Verbesserung von Straßenlastüberwachungssystemen. - Einsatz dynamischer Routenplanung zur Umfahrung überfluteter Bereiche.	- Diversifizierung der Frachtkorridore unter Einbezug von Schiene und Straße. - Einsatz multimodaler Strategien zur Sicherstellung der Lieferkettenkontinuität. - Ausbau von Hafeninfrastrukturen zur Unterstützung von Flachwasseroperationen.

Im Rahmen des vom BMFTR geförderten Projekts R2K-Klim+ (R2K-Klim+, 2025) wurden die Auswirkungen von Klimasignalen (z.B. Niedrigwasser, Starkregen und städtische Hitze) auf Verkehrs- und Logistikströme in Duisburg untersucht. Die Resilienzanalyse erfolgte durch den Vergleich von Simulationsdaten zu Angebot und Nachfrage vor und nach den Ereignissen. Für die Simulationen wurden das Verkehrsmodell der Stadt Duisburg mit der Software PTV Visum verwendet. Das Modell integriert sowohl den Personen- als auch den Wirtschaftsverkehr.

5.1. Verkehrsmodellierung unter einem Starkregenszenario

Die Auswirkungen von Starkregen auf die Resilienz des Verkehrsnetzes wurden untersucht, indem Niederschlagskarten mit dem Verkehrsnetz von Duisburg überlagert wurden. Die Niederschlagsdaten wurden von der geomer GmbH mithilfe des Modells FloodAreaHPC bereitgestellt (FloodAreaHPC, 2025). Für die Analyse wurde ein Szenario mit einer Niederschlagsmenge von 90 mm/h und einer zweistündigen Folgephase erstellt. Die durch Überflutung beeinträchtigten Straßensegmente wurden identifiziert und anhand der Wasserstände auf der Straßenoberfläche klassifiziert. Die Anpassungen der Geschwindigkeiten erfolgte in Abhängigkeit mit den beobachteten Wasserständen auf der Fahrbahnoberfläche, wobei die Einstautiefe-Funktion (depth-disruption function) angewendet wurde (Pregolato et al., 2017). Konkret wurden die Freiflussgeschwindigkeiten proportional für Überflutungstiefen bis zu 25 cm reduziert, um die Auswirkungen von Oberflächenwasser auf die Fahrzeugbewegungen widerzuspiegeln. Straßenabschnitte mit Wassertiefen über 25 cm und einer überfluteten Fläche von mehr als 100 m² wurden als unpassierbar eingestuft (Coles et al., 2017). Im Anschluss wurde eine Verkehrssimulationsmodellierung durchgeführt, um die resultierenden Auswirkungen auf die Gesamtleistung des Verkehrssystems unter den gegebenen Wasserständen auf der Fahrbahn zu bewerten.

Das Verkehrsaufkommen, als ein zentraler Resilienzindikator, wurde unter Extremwetterbedingungen berechnet und mit dem Szenario unter klimatischen Normalbedingungen verglichen. Abbildung 3 zeigt die berechnete Anomalie des Verkehrsbelastungs-Kapazitäts-Verhältnisses (V/K) für jede Straßenverbindung, welche die Verkehrsqualität nach der ersten Stunde Starkregen widerspiegelt. Die höchsten Verkehrsbelastungen nach dem Störereignis entfallen auf die Autobahnen, wobei der Ausfall von Autobahnen. Insbesondere der Ausfall der A3 und A59 kann sich nachteilig auf die Erreichbarkeit und Reisezeiten auswirken. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass

das System bei Starkregeneignissen mit einer Intensität von 90 mm/h nur etwa 5 % seiner typischen, ungestörten Kapazität vorhalten kann. Dies deutet auf eine signifikante Anfälligkeit gegenüber starkem Niederschlag hin, wodurch die Mobilität und Transportprozesse erheblich beeinträchtigt werden und die Straßenkonnektivität deutlich reduziert ist. Darüber hinaus war die Wiederherstellung des Transportsystems innerhalb von drei Stunden unzureichend. Dies veranschaulicht die Dringlichkeit einer Optimierung der Resilienzmaßnahmen. Die verlängerte Wiederherstellungszeit veranschaulicht die Verletzlichkeit kritischer Infrastrukturen, insbesondere der Autobahnen.

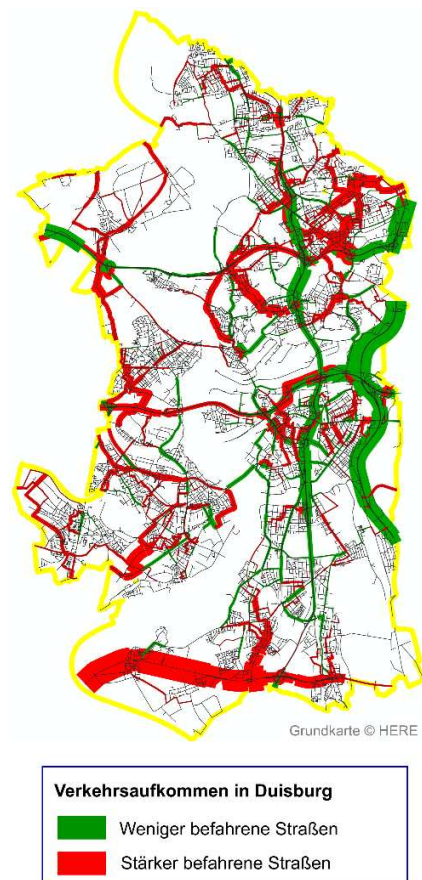


Abbildung 3: Verkehrsvolumen-Anomalie des Individualverkehrs nach der ersten Stunde von 90 mm/h Starkregen

5.2. Verkehrsmodellierung unter einem Niedrigwasserszenario

Die Auswirkungen niedriger Wasserstände auf das Verkehrssystem – insbesondere aufgrund der verringerten Kapazität für den Gütertransport auf Binnenwasserstraßen – führen zu einem signifikanten Modal Shift hin zu alternativen Transportmitteln (d.h. Güterzüge und Lkw-Verkehre). Die von Prognos AG geschätzten Gütermengen (in Tonnen), die bei extrem niedrigen Wasserständen auf den Straßentransport verlagert wurden (Prognos AG, 2025), spiegeln die gesamten Import- und Exportfrachtvolumina der

Region Duisburg wider. Für ein extremes Niedrigwasserereignis wird das Importvolumen auf etwa 91.000 Tonnen und das Exportvolumen auf etwa 153.000 Tonnen pro Monat geschätzt. Die Bewertung der Resilienz des städtischen Straßennetzes gegenüber dem erhöhtem Verkehrsaufkommen erfolgte unter Berücksichtigung des zusätzlichen Transportvolumens und einer proportionalen Zuordnung zu den kalibrierten Quell-Ziel-Matrizen des Verkehrsmodells. Abbildung 4 veranschaulicht die täglichen Schwankungen des Verkehrsaufkommens unter diesen Bedingungen. Die Analyse zeigt, dass das städtische Straßennetz im Allgemeinen eine stabile Resilienz gegenüber einer Zunahme des Lkw-Aufkommens durch Niedrigwasser aufweist. Die höchsten Verkehrsbelastungen konzentrieren sich entlang der Zufahrtsstraßen und im Umfeld des Duisburger Hafens (Duisport) auf, was auf lokale Schwachstellen in der Verkehrsinfrastruktur hindeutet.

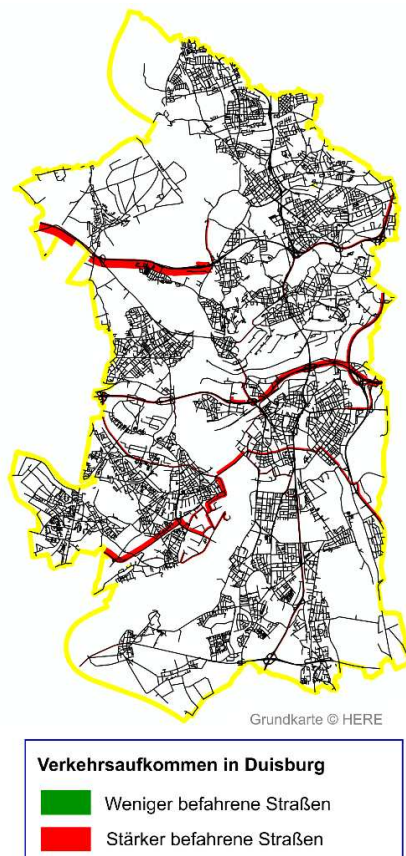


Abbildung 4: Verkehrsvolumen-Anomalie des Güterverkehrs infolge der Modalverschiebung

Dabei ist zu beachten, dass diese Simulation vereinfacht nur einen Tag abbildet. Die Kapazität und Funktionalität des Duisports selbst weist grundsätzlich eine hohe Resilienz gegenüber Niedrigwasserereignissen auf. Dennoch sollten die Auswirkungen solcher Ereignisse aus logistischer Sicht berücksichtigt werden, insbesondere im Hinblick auf Planungsprozesse, Umschlagszeiten und mögliche Engpässe bei

dem Umschlag von Gütern. Wiederkehrende oder langanhaltende Niedrigwasserphasen könnten kumulative Effekte auf die Transportkette haben und erfordern daher eine vorausschauende logistische Strategie, um die Zuverlässigkeit und Effizienz der Transporte sicherzustellen.

5.3. Verkehrsmodellierung unter einem Extremhitzenzenario

Die Auswirkungen extremer Temperaturen auf die individuelle Mobilität sind vielschichtig und beeinflussen sowohl die Wahl des Verkehrsmittels als auch das Mobilitätsverhalten sowie die räumlich-zeitliche Verteilung der Verkehrsströme. Erhöhte Temperaturen führen häufig zu signifikanten Anpassungen im individuellen Mobilitätsverhalten sowie in den logistischen Abläufen. So neigen Personen bei großer Hitze dazu, ihre täglichen Wege zu verkürzen, zu verschieben oder ganz zu vermeiden, während Logistikunternehmen ihre Betriebszeiten und Routenstrategien entsprechend anpassen. Hohe Temperaturen sind in der Regel mit einem Rückgang der aktiven Mobilitätsformen wie Zufußgehen oder Radfahren verbunden, insbesondere wenn thermische Komfortgrenzen überschritten werden. Wird die Verkehrsnachfrage nicht auf kühlere Zeiten oder Tage verschoben, kann dies zu einer temporär verstärkten Nutzung motorisierter Verkehrsmittel und des öffentlichen Nahverkehrs führen, was die vorhandenen Kapazitäten bzw. die städtische Infrastruktur zusätzlich belastet.

Um den Einfluss extremer Hitze auf das Verkehrssystem abzubilden, wurde die zeitliche Verteilung der Verkehrsnachfrage angepasst, indem Reisezeiten in kühlere Tageszeiten verlagert wurden. Konkret wurden die Verkehrsaufkommen in den frühen Morgen- und späten Abendstunden um 5 % erhöht und zur Mittagszeit – wenn die Temperaturen ihren Höchstwert erreichen – um 10 % reduziert. Die daraus resultierenden Verkehrsvolumina des motorisierten Individualverkehrs wurden mit einem Basisszenario (Normaltag) verglichen und in Abbildung 5 dargestellt. Die Analyse zeigt, dass die Resilienz der Hauptverkehrsstraßen der Stadt insbesondere in den Morgenstunden deutlich beeinträchtigt ist, da sich die Verkehrsnachfrage zeitlich konzentriert. Dies kann auf eine temporäre Überlastung des Netzes hindeuten, die unter Hitzestressbedingungen zu einer verstärkten Stauanfälligkeit und verminderter Systemeffizienz führen kann.

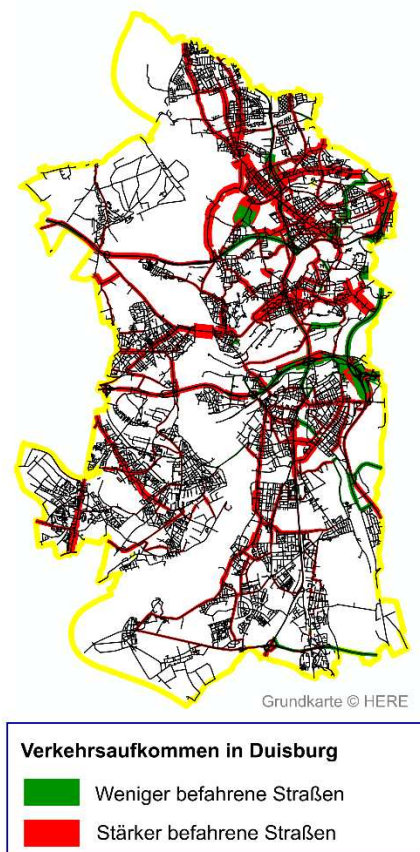


Abbildung 5: Verkehrsvolumen-Anomalie des Individualverkehrs infolge der Verschiebung von Reisezeiten

6. Fazit und Ausblick

6.1. Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse

Entscheidend für eine erfolgreiche Klimaanpassung – auch an Extrem- und Schockereignisse ist die Bewertung der Resilienz, um auf dessen Basis geeignete Anpassungsmaßnahmen zu identifizieren, zu priorisieren und umzusetzen. Anpassungsmaßnahmen können sehr vielfältig und zielen darauf ab, die Resilienz zu erhöhen oder die Vulnerabilität gegenüber den beobachteten oder erwarteten Ereignissen zu reduzieren. Diese Studie zeigt das Konzept der Resilienz in urbanen Verkehrssystemen, wobei sowohl Bewertungsansätze als auch zentrale Indikatoren berücksichtigt wurden. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen extremer Wetterereignisse auf das Mobilitätsverhalten analysiert sowie Anpassungsstrategien untersucht. Angesichts der evidenten Bedrohungen der Stadt- und Verkehrsinfrastrukturen, die sich aus den klimatischen Veränderungen und Extremwetterereignissen ergeben, sowie der Sicherstellung der Mobilität ist die Entwicklung von Prognoseszenarien unabdingbar, um derartige Ereignisse und deren potenzielle Auswirkungen mit Verkehrsmodellen abzubilden. Am Beispiel der Stadt Duisburg wurde mithilfe von Verkehrsmodellen untersucht,

wie Individual- und Güterverkehrsströme auf Szenarien mit Starkregen, Hitzewellen und Niedrigwasser reagieren.

Die Analyse zeigt, dass unterschiedliche Wetterereignisse verschiedene Verkehrsmittel auf jeweils spezifische Weise beeinflussen: Starkregen beeinträchtigt insbesondere den motorisierten Individualverkehr durch verringerte Straßenkapazitäten, während Niedrigwasser vor allem den Güterverkehr betrifft, da dieser auf die Straße verlagert wird. Hitzewellen wiederum beeinträchtigen weniger die physische Infrastruktur, führen aber zu Veränderungen im Mobilitätsverhalten und zu zeitlichen Verschiebungen von Fahrten oder Transporten. Das Duisburger Verkehrsnetz weist insgesamt eine moderate Resilienz auf, wobei lokale Schwächen insbesondere in den Autobahnanbindungen zu vermerken sind.

Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit integrierter Anpassungsstrategien. Diese Strategien betonen die Bedeutung technologischer Innovationen, veränderter Verhaltensmuster und angepasster Infrastrukturen zur Stärkung der Resilienz in individuellen, kollektiven und logistischen Verkehrssystemen. Um ein umfassenderes Verständnis der Auswirkungen extremer Wetterereignisse zu erlangen, empfiehlt es sich, Simulationen über einen Zeitraum von mehr als nur einem einzelnen Tag durchzuführen – idealerweise als Längsschnittanalyse über eine Woche oder länger. Die Umsetzung solcher Maßnahmen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Stadtplanern, Verkehrsbehörden, Wissenschaft und lokalen Akteuren, um die Vulnerabilität der Stadt gegenüber extremen Wetterereignissen zu verringern und gleichzeitig eine effiziente Mobilität sicherzustellen.

6.2. Zukünftige Forschungsrichtungen

Obwohl diese Studie eine Grundlage für das Verständnis der Resilienz urbaner Verkehrssysteme im Kontext des Klimawandels bietet, ergeben sich daraus mehrere vielversprechende Forschungsrichtungen.

Einbeziehung der Nutzerperspektive in die Resilienzanalyse

Bisherige Untersuchungen konzentrieren sich häufig auf systembezogene oder administrative Perspektiven und vernachlässigen das Verhalten der Verkehrsteilnehmer bei extremen Wetterereignissen. Aspekte wie Reaktionen auf Frühwarnungen, Risikowahrnehmung und Entscheidungen nach einer Störung (z. B. Wahl des Verkehrsmittels oder der Route) sind bisher kaum erforscht. Diese Verhaltensweisen

beeinflussen jedoch maßgeblich die Wiederherstellung von Netzwerken und die Reduzierung der Vulnerabilität. Durch die Integration verhaltensbezogener Erhebungen lassen sich genauere, quantifizierbare Erkenntnisse gewinnen, die die Aussagekraft von Resilienzanalyse erhöhen.

Weiterentwicklung der Resilienzanalyse durch Integration multimodaler Verkehrssysteme

Die meisten Studien zur Resilienz konzentrieren sich auf Einzelverkehrsträger und analysieren Nutzerverhalten isoliert. Angesichts zunehmender Multioptionalität und besserer intermodaler Verknüpfung gewinnen die Wechselwirkungen zwischen den Systemen an Bedeutung. Diese Interaktionen beeinflussen die Gesamtleistung des Verkehrsnetzes erheblich. Zukünftige Forschung sollte daher die Modellierung multilayerbasierter Verkehrssysteme und die Durchführung integrierter Analysen über verschiedene Verkehrsmittel hinweg priorisieren, um ein ganzheitlicheres Bild der Systemresilienz zu erhalten.

Verbesserung der Skalierbarkeit in der Verkehrsnetzwerkanalyse

Regionale Verkehrsstudien weisen in der Regel eine begrenzte Übertragbarkeit auf, was ihre Anwendbarkeit in größeren Zusammenhängen einschränkt. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Entwicklung effizienter Methoden konzentrieren, um eine skalierbare Leistungsbewertung großer Systeme – insbesondere in grenzüberschreitenden Logistiknetzwerken – zu ermöglichen.

Neue Technologien und ihr Einfluss auf die Resilienz von Verkehrsnetzen

Neue Technologien wie Elektrofahrzeuge (EVs) und autonome Fahrzeuge (AVs) können die Resilienz des Verkehrs potenziell steigern, jedoch auch neue Vulnerabilitäten mit sich bringen. EVs senken Emissionen und bieten durch bidirektionales Laden eine dezentrale Energiespeicherung, was bei Stromausfällen als Notversorgung dienen kann. Allerdings beeinträchtigen extreme Temperaturen die Effizienz und Reichweite der Batterien. AVs optimieren den Verkehrsfluss und reduzieren Staus, jedoch haben ihre Sensoren Schwierigkeiten bei starkem Regen, Nebel oder extremem Wetter. Beide Technologien erfordern klimaangepasste Infrastrukturen, um ihre Zuverlässigkeit unter zunehmenden Klimabelastungen aufrechtzuerhalten.

Literatur

Balal, E., Valdez, G., Miramontes, J., & Cheu, R. L. (2019). Comparative evaluation of measures for

urban highway network resilience due to traffic incidents. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(3), 304-317.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.05.001>

Batur, I., Alhassan, V. O., Chester, M. V., Polzin, S. E., Chen, C., Bhat, C. R., & Pendyala, R. M. (2024). Understanding how extreme heat impacts human activity-mobility and time use patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 136, 104431.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104431>

Bedoya-Maya, F., Shobayo, P., Beckers, J., & van Hassel, E. (2024). The impact of critical water levels on container inland waterway transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 131, 104190.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104190>

Böcker, L., Dijst, M., & Faber, J. (2016). Weather, transport mode choices and emotional travel experiences. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 360-373.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.021>

Böcker, L., Prillwitz, J., & Dijst, M. (2013). Climate change impacts on mode choices and travelled distances: a comparison of present with 2050 weather conditions for the Randstad Holland. *Journal of Transport Geography*, 28, 176-185.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.11.004>

Böcker, L., Priya Uteng, T., Liu, C., & Dijst, M. (2019). Weather and daily mobility in international perspective: A cross-comparison of Dutch, Norwegian and Swedish city regions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 491-505.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.07.012>

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & von Winterfeldt, D. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.
<https://doi.org/10.1193/1.1623497>

Calabrò, G., Araldo, A., Oh, S., Seshadri, R., Inturri, G., & Ben-Akiva, M. (2023). Adaptive transit design: Optimizing fixed and demand responsive multimodal transportation via continuous approximation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 171, 103643.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103643>

Chalkiadakis, C., Perdikouris, A., & Vlahogianni, E. I. (2022). Urban road network resilience metrics and their relationship: Some experimental findings. *Case Studies on Transport Policy*, 10(4), 2377-2392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.10.013>

Coles, D., Yu, D., Wilby, R. L., Green, D., & Herring, Z. (2017). Beyond 'flood hotspots': Modelling emergency service accessibility during flooding in York, UK. *Journal of Hydrology*, 546, 419-436. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.013>

Crespi, A., Renner, K., Zebisch, M., Schausser, I., Leps, N., & Walter, A. (2023). Analysing spatial patterns of climate change: Climate clusters, hotspots and analogues to support climate risk assessment and communication in Germany. *Climate Services*, 30, 100373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100373>

Deublein, M., Roth, F., Bruns, F., & Zulauf, C. (2021). *Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen*, BAST-Forschungsbericht FE 89.0330.

Deutsche-Wetterdienst. (2025). <https://www.dwd.de/>.

Diab, E., & Shalaby, A. (2020). Metro transit system resilience: Understanding the impacts of outdoor tracks and weather conditions on metro system interruptions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(9), 657-670. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1600174>

Ebner von Eschenbach, A. D., Helms, M., Maurer, T., Nilson, E., Hämmerle, M., Wurms, S., & Orlovius, A. (2022). *Untersuchung wasserwirtschaftlicher Optionen zur Sicherstellung zuverlässig kalkulierbarer Transportbedingungen am Rhein bei Niedrigwasser*. BfG-Bericht-2100, Koblenz. <https://doi.bafg.de/BfG/2022/BfG-2100.pdf>

Esmalian, A., Yuan, F., Rajput, A. A., Farahmand, H., Dong, S., Li, Q., Gao, X., Fan, C., Lee, C.-C., Hsu, C.-W., Patrascu, F. I., & Mostafavi, A. (2022). Operationalizing resilience practices in transportation infrastructure planning and project development. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 104, 103214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103214>

FloodAreaHPC. (2025). <https://www.geomer.de/software/floodarea.html>.

Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and society*, 15(4).

Galich, A., & Nieland, S. (2023). The Impact of Weather Conditions on Mode Choice in Different Spatial Areas. *Future Transportation*, 3(3), 1007-1028. <https://www.mdpi.com/2673-7590/3/3/56>

Gonçalves, L. A. P. J., & Ribeiro, P. J. G. (2020). Resilience of urban transportation systems. Concept, characteristics, and methods. *Journal of Transport Geography*, 85, 102727. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102727>

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 4(Volume 4, 1973), 1-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>

Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006>

Kahlenborn, W., Porst, L., Voss, M., Fritsch, U., Renner, K., Zebisch, M., Wolf, M., Schöenthaler, K., & Schausser, I. (2021). *Climate impact and risk assessment 2021 for Germany. Summary*.

Kötter, T., Weiß, D., Heyn, T., Grade, J., & Lennartz, G. (2018). *Stresstest Stadt – wie resilient sind unsere Städte? Unsicherheiten der Stadtentwicklung identifizieren, analysieren und bewerten*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Lu, Q.-L., Sun, W., Dai, J., Schmöcker, J.-D., & Antoniou, C. (2024). Traffic resilience quantification based on macroscopic fundamental diagrams and analysis using topological attributes. *Reliability Engineering & System Safety*, 247, 110095. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110095>

Markolf, S. A., Hoehne, C., Fraser, A., Chester, M. V., & Underwood, B. S. (2019). Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness. *Transport Policy*, 74, 174-186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.003>

Mattsson, L.-G., & Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems – A

discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 16-34.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>

Mayer, G., Großmann, S., Zulauf, C., Roth, F., Deublein, M., Kohl, B., Kammerer, H., & Dahl, A. (2020). *Resilienz der Straßenverkehrsinfrastruktur: Stand der Forschung und Potenziale im Management von außergewöhnlichen Ereignissen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 01.0199/2017/ARB, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach (unveröffentlicht)*.

McDaniels, T., Chang, S., Cole, D., Mikawoz, J., & Longstaff, H. (2008). Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation. *Global Environmental Change*, 18(2), 310-318.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.03.001>

Melkonyan, A., Hollmann, R., Gruchmann, T., & Daus, D. (2024). Climate mitigation and adaptation strategies in the transport sector: An empirical investigation in Germany. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 25, 101102.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101102>

Pregolato, M., Ford, A., Wilkinson, S. M., & Dawson, R. J. (2017). The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 67-81.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.020>

Prognos AG. (2025).
<https://www.prognos.com/de>.

R2K-Klim+. (2025). <https://r2k-klim.net/>.

Reed, D. A., Kapur, K. C., & Christie, R. D. (2009). Methodology for Assessing the Resilience of Networked Infrastructure. *IEEE Systems Journal*, 3(2), 174-180.
<https://doi.org/10.1109/JSYST.2009.2017396>

Roth, F., Zulauf, C., Rothenfluh, M., Dahl, A., Bruns, F., Brunner, R., & Roth, S. (2023). *Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur, BASt-Projekt FE69.00005*.

Salvo, G., Karakikes, I., Papaioannou, G., Polydoropoulou, A., Sanfilippo, L., & Brignone, A. (2025). Enhancing urban resilience: Managing flood-induced disruptions in road networks. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 31, 101383.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101383>

Serdar, M. Z., Koç, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2022). Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103452.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103452>

Sharif, M., & Wittowsky, D. (2025). Welche Effekte haben klimatische Extremereignisse auf das Verkehrssystem – ein Ansatz zur Resilienzbewertung am Beispiel der Stadt Duisburg. In H. Proff (Ed.), *New Players in Mobility: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte* (pp. 327-344). Springer Fachmedien Wiesbaden.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-46485-1_21

Sun, W., Paolo, B., & Davison, B. D. (2020). Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: the state of the art. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(3), 168-199.
<https://doi.org/10.1080/23789689.2018.1448663>

Umweltbundesamt. (2025). *Umweltindikatoren*.
<https://www.umweltbundesamt.de/>.

Wang, N., Wu, M., & Yuen, K. F. (2024). Modelling and assessing long-term urban transportation system resilience based on system dynamics. *Sustainable Cities and Society*, 109, 105548.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105548>

AutorInnenangaben

Mohammad Sharif
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Mobilitäts- und Stadtplanung
Universität Duisburg-Essen
Berliner Platz 6-8, 45127 Essen
E-Mail: mohammad.sharif@uni-due.de

Dirk Wittowsky
Professur
Institut für Mobilitäts- und Stadtplanung
Universität Duisburg-Essen
Berliner Platz 6-8, 45127 Essen
E-Mail: dirk.wittowsky@uni-due.de