

Resilienz als neues Infrastruktur-Paradigma?

Governance-Herausforderungen der Elektrifizierung im Straßengüterverkehr

Michael Lüken ¹, Michael Lehmann^{1,2}

¹: Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.

²: Fachhochschule Erfurt

14.10.2026

TH Wildau

Verkehrswissenschaftliches Kolloquium



Überblick

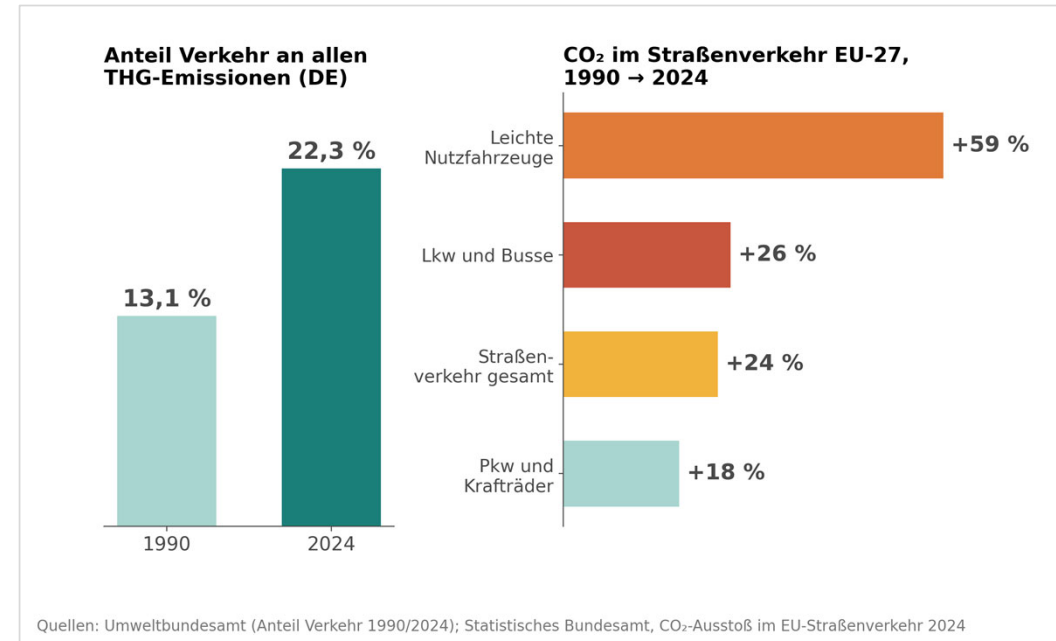
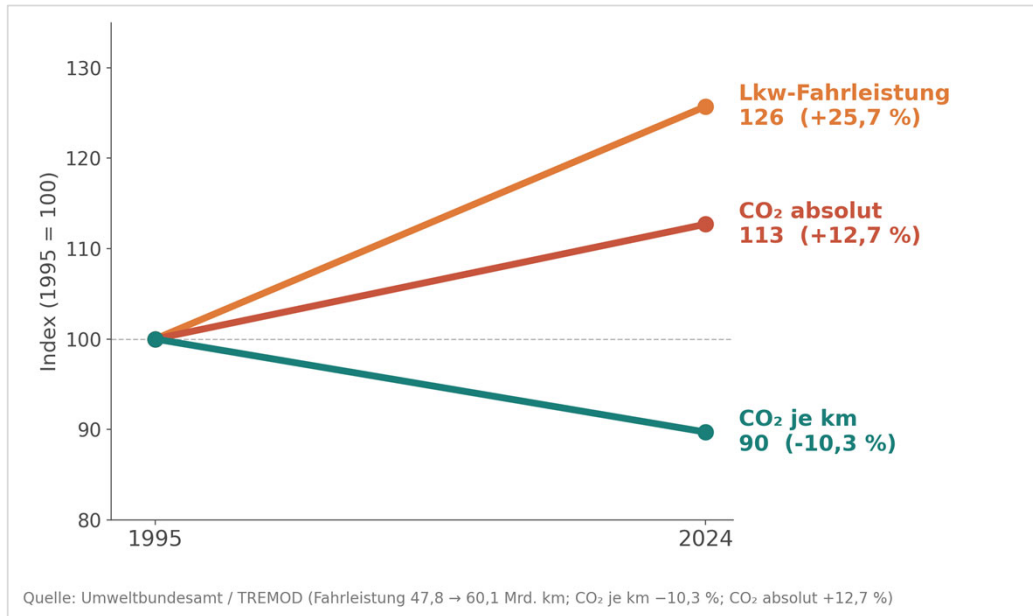
1. Electric Road Systems (ERS): Eine Technologieoption für klimaneutralen Straßengüterverkehr
2. Das Konzept der Resilienz – und ihr Verhältnis zur Effizienz
3. Resilienzbewertung von ERS

Überblick

1. **Electric Road Systems (ERS): Eine Technologieoption für klimaneutralen Straßengüterverkehr**
2. Das Konzept der Resilienz – und ihr Verhältnis zur Effizienz
3. Resilienzbewertung von ERS

Straßengüterverkehr: Effizienzgewinne wurden vom Wachstum aufgezehrt

- Deutschlands Klimaziel: Emissionen bis 2030 um 65 % gegenüber 1990 mindern, bis 2045 Klimaneutralität erreichen.
- Im Verkehrssektor gab es bisher kaum eine Verbesserung.
- Lkw sind pro Kilometer sauberer geworden, die Gesamtemissionen sind wegen Zunahme des Lkw-Verkehrs trotzdem gestiegen („rebound“).
- Der Straßengüterverkehr ist strukturell „hard to abate“, Verlagerung auf die Schiene ist ebenfalls schwierig.



Technologiepfade im Straßengüterverkehr

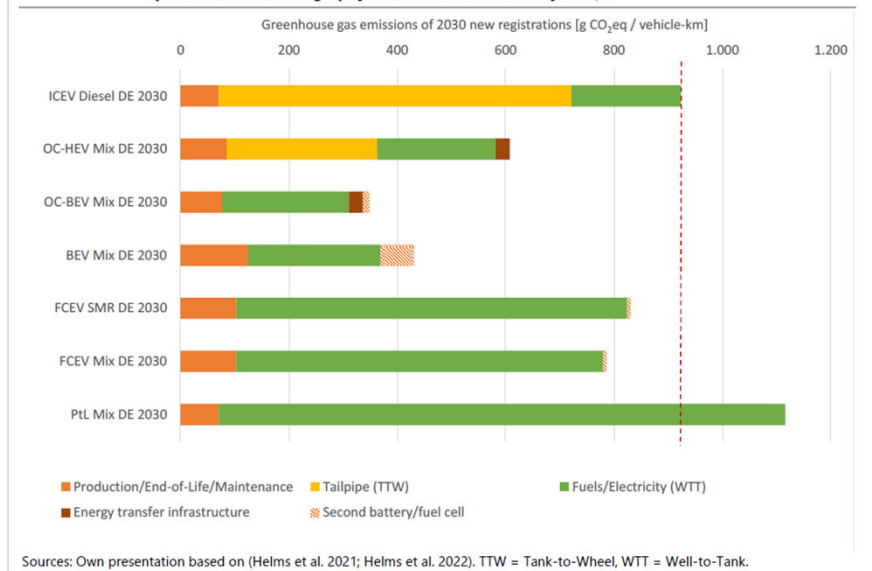
Technologieoptionen:

- Referenzpunkt 1: **ICEV Diesel** (Verbrennungsmotor mit Dieselkraftstoff).
- Antriebskonzept **BEV** (Batterie-elektrisch) ist **FCEV** (Wasserstoff-Brennstoffzelle) und **PtL** (strombasierte Kraftstoffe) hinsichtlich der Treibhausgas-Reduktion überlegen. (dem ICEV Diesel sowieso)
- Herausforderungen für den BEV im Segment der schweren Lkw, insbesondere auf der Langstrecke:
Strombedarf und Ladezyklen, Größe und Gewicht der benötigten Batterie, Kosten bzw. Preissensitivität (geringe Margen).

Idee Oberleitungs-Lkw:

- Nachladen der Batterie während der Fahrt. Ein Kernnetz von ca. 4.000 km umfasst über 65 % des Lkw-Fernverkehrs auf Autobahnen.
- Referenzpunkt 2: BEV (auch wenn noch nicht im Markt etabliert)
- Konzept „**OC**“ (overhead catenary) ist grundsätzlich mit allen Antrieben (BEV, FCEV, ICEV Diesel) kombinierbar.

Figure 20: Greenhouse gas emissions of articulated trucks (40 t GVV) registered in 2030 with different drive trains or fuel types including infrastructure for road side energy transfer. Typical usage parameters in Germany (800,000 km mileage over 7 years of operation, 11 t average payload, German electricity mix).



Gnann et al. (2023)

Hacker et al. (2020): Wirtschaftlichkeit, Umweltwirkung und Ausbauszenarien von Oberleitungs-Lkw in Deutschland: Eine Synthese. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.

Gnann et al. (2023): BOLD - Accompanying research for overhead catenary trucks in Germany. Final report. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.

Electric Road Systems (ERS)

- ERS = **System aus Komponenten am Fahrzeug und an der Straße.**
- Technische Alternativen: Oberleitung, Bodenstromschienen, induktive Systeme.
- **Erprobung (Feldversuche)** in Deutschland (2019-2024), Schweden, USA. Fazit: ERS ist herausfordernd, aber technisch machbar.
- Fokus in DE auf Oberleitung und Fahrzeug mit Stromabnehmer: etablierte Technologie, höherer TRL als Bodenstromschienen oder induktiv.
- Perspektivisch: **Integration in ein Gesamtsystem aus Stromerzeugung, Stromnetz, Stromverbrauch und Digitalisierung** des Verkehrs (z. B. autonomes Fahren).



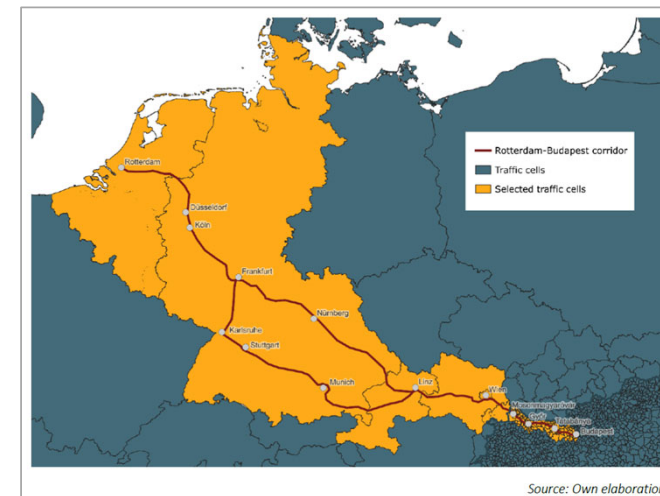
Eigene Abbildung (M. Lehmann, mit KI-Unterstützung generiert.)



<https://www.autobahn.de/planen-bauen/projekt/e-highway>

Electric Road Systems (ERS): Vom Pilotprojekt zur Korridorstrategie

- bisher: Feldversuche im Rahmen nationaler Forschungsförderung.
Nach Abschluss der Feldversuche (2024): Wie geht es weiter?
- **Verkehrspolitische Herausforderung:** Grenzüberschreitende Verkehre, Einbettung einer Lösung in europäische Konzepte (z. B. TEN-T-Korridore).
- E-CORE: **Machbarkeitsstudie zur Einführung eines ERS-Korridors** im TEN-T-Netz von Budapest bis Rotterdam.
 - Erarbeitung eines Instrumentariums zur Planung und Auslegung von Korridoren,
 - Ausrollung der bisher nur national fokussierten Forschung zum Thema ERS auf europäische Verhältnisse,
 - Ermittlung des Potenzials von ERS hinsichtlich der Rekuperation bzw. des bidirektionalen Ladens.



Oasser et al. (2026)

Qasseer, Ola; Török, Ádám; Bozó, András; Rajna, Botond; Soltész, Emese; Réder, Gábor; Szander, Norina; Bajor, Péter; Miksztai, Péter (2026): E-CORE Study on the section „Austrian border – Budapest”. Project final study.

Plötz, P. et al. (2024): The possible future of electric road systems in Europe – time to decide and act. Perspective, Environmental Research: Infrastructure and Sustainability,

M. Lüken, M. Lehmann: Resilienz als neues Infrastruktur-Paradigma?

TH Wildau, 14.10.2026

„Lohnt“ sich ERS volkswirtschaftlich im Vergleich zum BEV-Lkw ohne ERS?

- **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung:** Vergleich BEV-Lkw mit ERS zu BEV-Lkw ohne ERS.
- **Zusätzliche Investitionen für Aufbau und Betrieb der Infrastruktur** – Kostenersparnis im Fahrzeug (kleinere Batterie).
- Frage im Hintergrund: Wie wird die Infrastruktur finanziert?
- **Ergebnis: Ob ERS sich rechnet, hängt von unsicheren Parametern ab** (Batteriepreise, Baukosten je km). Die Effizienzbewertung liefert unter Unsicherheit keine robuste Entscheidung. Gleichzeitig schließt sich das Zeitfenster – technisch durch fallende Batteriepreise und wachsende statische Ladeinfrastruktur, institutionell durch langfristige Verträge.

Nettonutzen ERS ggü. reinem Batterie-Lkw, Mio. € (Barwert 2030–2060), Korridor Rotterdam–DE
grün = ERS vorteilhaft · orange = Batterie-only vorteilhaft · Rahmen = Basisannahme

Sehr günstige Batterien (Mauler et al. 2021)	476	371	265	159	53	-6	-53	-158	-264	-370
Near Market	506	401	295	189	83	25	-23	-128	-234	-340
Mittel aller Studien (Basis)	648	542	437	331	225	166	119	14	-92	-198
Scientific	670	564	458	352	247	188	141	35	-71	-177
Teurere Batterien (Other)	713	607	501	395	290	231	184	78	-28	-134
	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,28	3,50	4,00	4,50	5,00
	ERS-Baukosten in Mio. € je km (beide Richtungen)									

Zymelka et al. (2025)

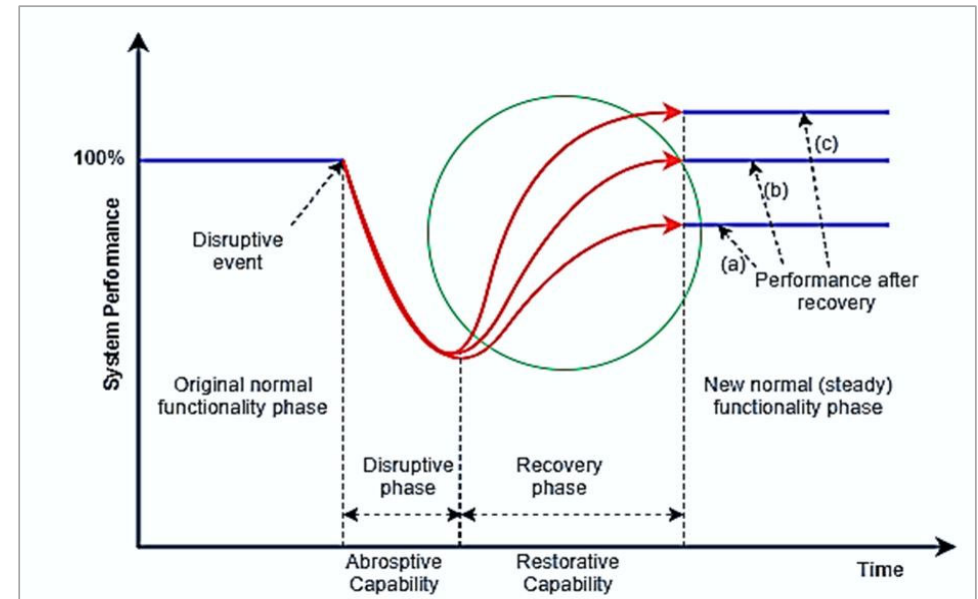
Zymelka, Ł., Ghisolfi, V., Tavasszy, L. (2025): Electric Road System: Social Cost Benefit Analysis. TNO 2024v2 R12015, 6. Mai 2025. Den Haag: TNO.

Überblick

1. Electric Road Systems (ERS): Eine Technologieoption für klimaneutralen Straßengüterverkehr
- 2. Das Konzept der Resilienz – und ihr Verhältnis zur Effizienz**
3. Resilienzbewertung von ERS

Resilienz

- Herkunft: Physik und Materialwissenschaften (18. Jahrhundert), Anwendungen in Psychologie (ab 1950er), Ökologie und Wirtschaftswissenschaften (ab 1970er).
- Definition (nach Christopher und Peck 2004): **A system's ability to recover to its original state [Kurve b] or even to transition to a new and improved state [Kurve c] following an external disruptive event.**
 - 1) Auslöser ist ein **exogener, rascher** Schock.
 - 2) Resilienz ist **nicht gleich Stabilität** oder **Robustheit**.
- Systemmerkmale zur Verbesserung der Resilienz sind zum Beispiel Redundanz und Agilität.



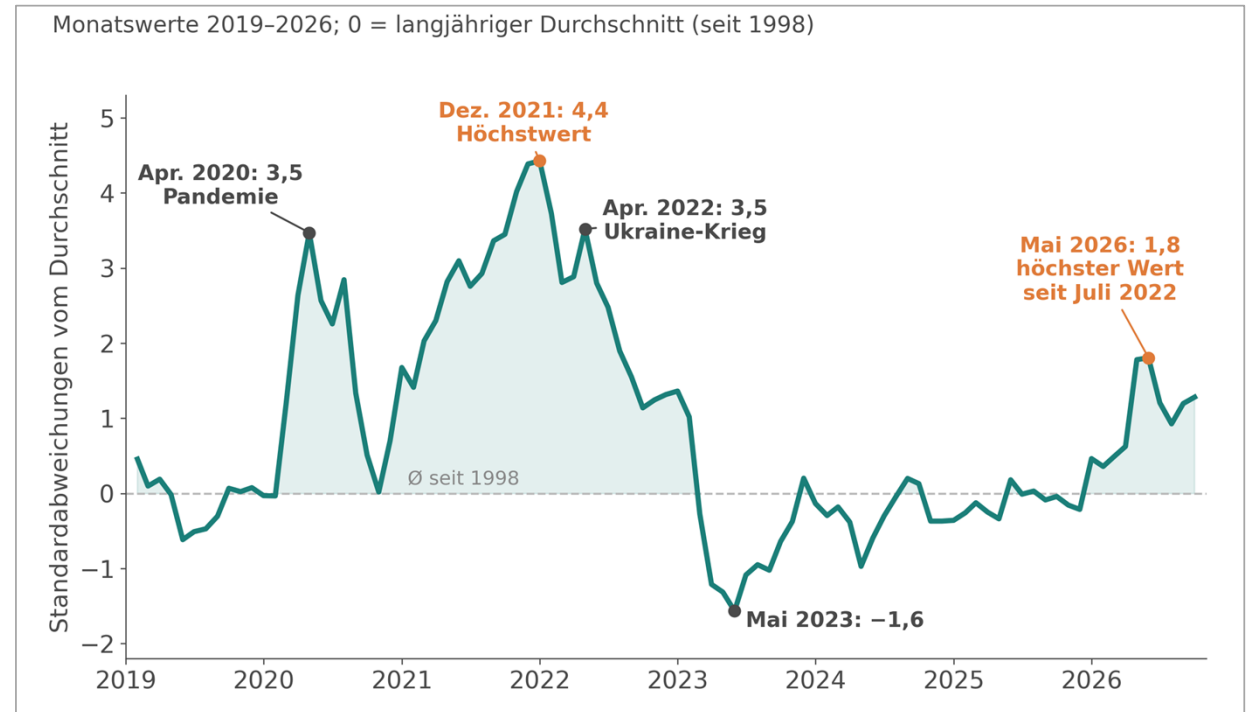
Christopher und Peck (2004)

Christopher, M., Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. International Journal of Logistics Management, 15(2), 1–13.

Sarker, P., & Lester, H. D. (2019). Post-disaster recovery associations of power systems dependent critical infrastructures. Infrastructures, 4(2), 30

Effizienz und Resilienz – ein Zielkonflikt?

- **Fallbeispiel: Störungen von Lieferketten** seit 2020, Auswirkungen auf den „**Global Supply Chain Pressure Index**“ (Abb. rechts)
 - ab Frühjahr 2020: Corona-Pandemie,
 - März 2021: MS Ever Given blockiert den Suezkanal für sechs Tage
 - ab Frühjahr 2022: Krieg in der Ukraine
 - ab Frühjahr 2026: Iran-Krieg
- **Trend zu „schlanken“ Lieferketten durch Vermeidung von Redundanz (vor 2020)** macht Lieferketten unter den Rahmenbedingungen ab 2020 störanfällig. => Der betrachtete Zeitraum spielt für die Bewertung eine Rolle.
- **Fokus in VWL auf Märkte im Gleichgewicht** – über die Auswirkung von exogenen Schocks ist (noch) wenig bekannt.



Eigene Darstellung auf Basis der Daten in Federal Reserve Bank of New York (2026).

Goel, R. K. et al. (2021). Supply chain performance and economic growth: The impact of COVID-19 disruptions. *Journal of Policy Modeling*, 43(2), 298-316.

Hynes, W. et al. (2022). Systemic resilience in economics. *Nature Physics*, 18(4), 381-384.

Lüken, M. (2023): Resilience - An emerging paradigm in Economics? Lessons from Studying Georgia's Energy System and European Battery Material Supply Chains. Challenges of Globalization in Economics and Business International Scientific Conference, Tbilisi (Georgia), November 2023. <https://www.researchgate.net/publication/375329038>.

Federal Reserve Bank of New York (2026): Global Supply Chain Pressure Index (GSCPI). Monatsdaten, Datenstand September 2026. Online: <https://www.newyorkfed.org/research/policy/gscpi>

Überblick

1. Electric Road Systems (ERS): Eine Technologieoption für klimaneutralen Straßengüterverkehr
2. Das Konzept der Resilienz – und ihr Verhältnis zur Effizienz
3. **Resilienzbewertung von ERS**

Resilienz des Straßengüterverkehrs: Zwei Dimensionen

Abhängigkeitsresilienz

Versorgung mit Energieträgern und Rohstoffen

- Abhängigkeit von Ölimporten (ICEV Diesel)
- Abhängigkeit von Batterierohstoffen wie Lithium, Kobalt, Nickel (BEV; bei OC-BEV durch kleinere Batterien geringer)
- Abhängigkeit vom elektrischen Netzausbau und Ausbaugeschwindigkeit sowie EE-Erzeugung
- Risiken: Preis- und Lieferschocks, geopolitische Abhängigkeiten

Betriebsresilienz

Funktionsfähigkeit des Systems im Störfall

- Netzstabilität und Netzbelastung durch das Laden. Planbarkeit des Lkw-Verkehrs: ERS kann als zeitlich und quantitativ steuerbare Last dienen.
- Ausfälle von Infrastruktur
- Abhängigkeit von einzelnen Infrastrukturbetreibern
- Grenzüberschreitende Koordination im Störfall

Qasseer et al. (2026)

Bünting, A.; Sprung, C.; Dietrich, F.; Bierau-Delpont, F.; Vorholt, F.; Gieschen, J.-H.; Kowal, J.; Marscheider, J.; Zehbe, K.; Trunk, M.; Lüken, M.; Bechberger, M.; Oehl-Schalla, N.; Korzynietz, R.; Solmaz, S.; Wolf, S.; Neupert, S.; Kirchhofer, T.; Beermann, V. (2023): Resilient Supply Chains in the Battery Industry. Publikation der Begleitforschung der Projektträgerschaft Batteriezellfertigung des BMWK.

Zwei Beispiele für Abhängigkeiten und Risiken verschiedener Technologiepfade

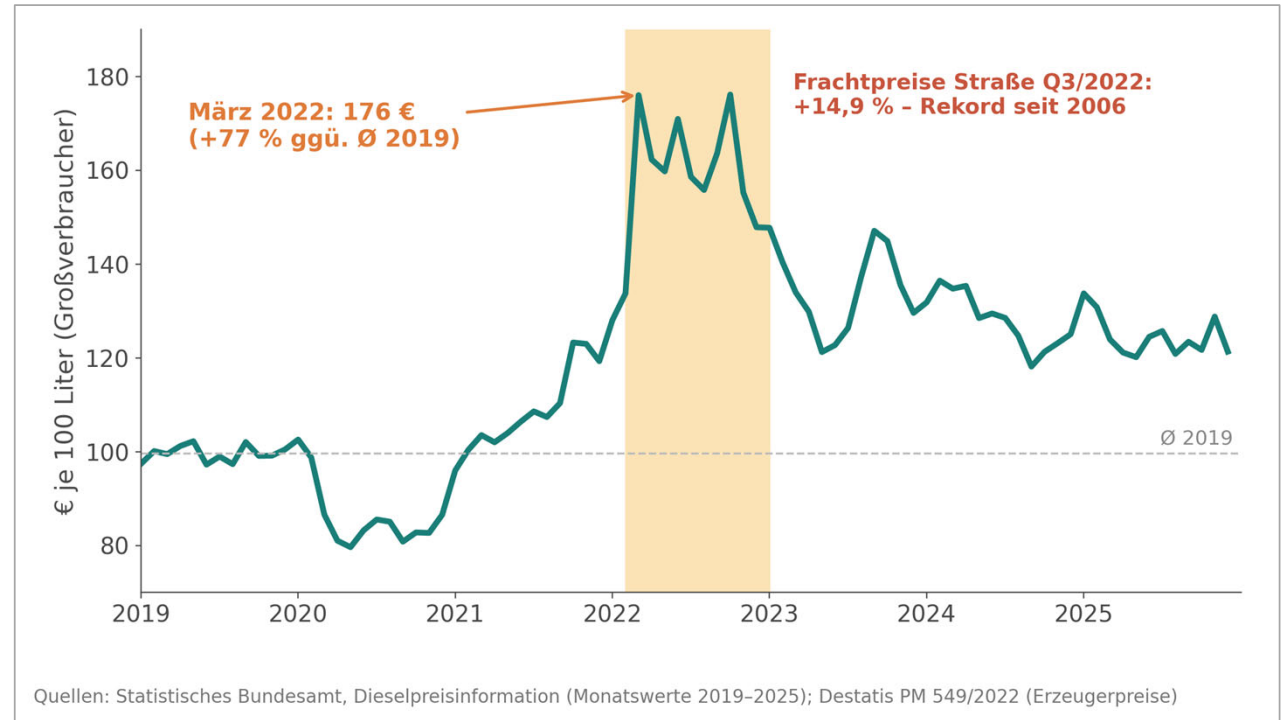
Fossiler Pfad: Dieselschock 2022

- März 2022: Dieselpreis für Großverbraucher 176 €/100 l, +77 % gegenüber Ø 2019
- Frachtpreise Straße Q3/2022: +14,9 % – stärkster Anstieg seit Beginn der Statistik 2006

Neuer Pfad: Batterien und Rohstoffe

- 2022: Batteriepackpreise steigen erstmals seit Beginn der Erhebung 2010 (+7 % auf 151 \$/kWh)
- 2025: Batteriemetallpreise steigen wieder.
- Versorgungsrisiken bei chinesischem Lithium, Kobalt-Exportquoten der Dem. Republik Kongo

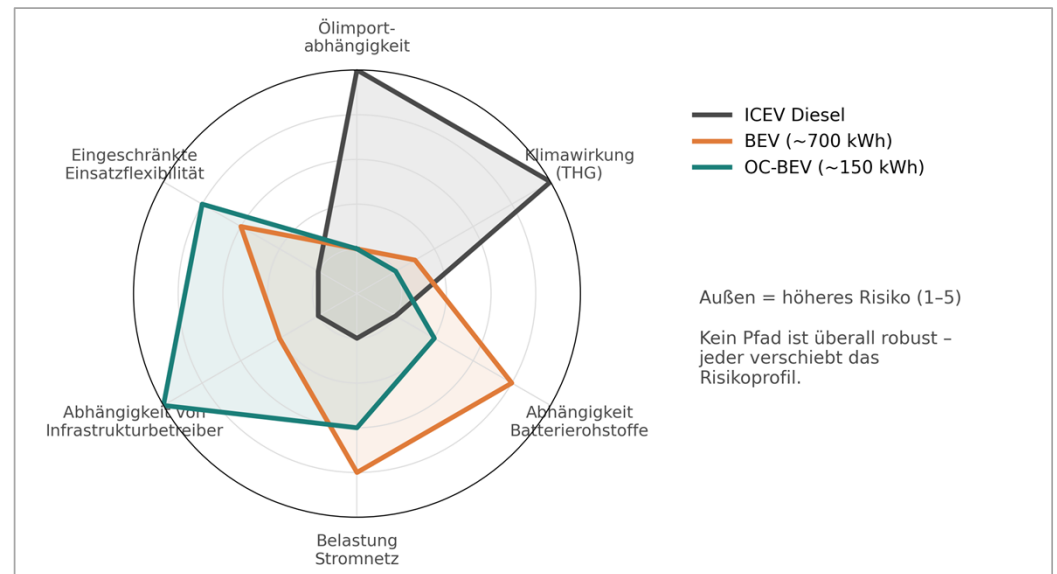
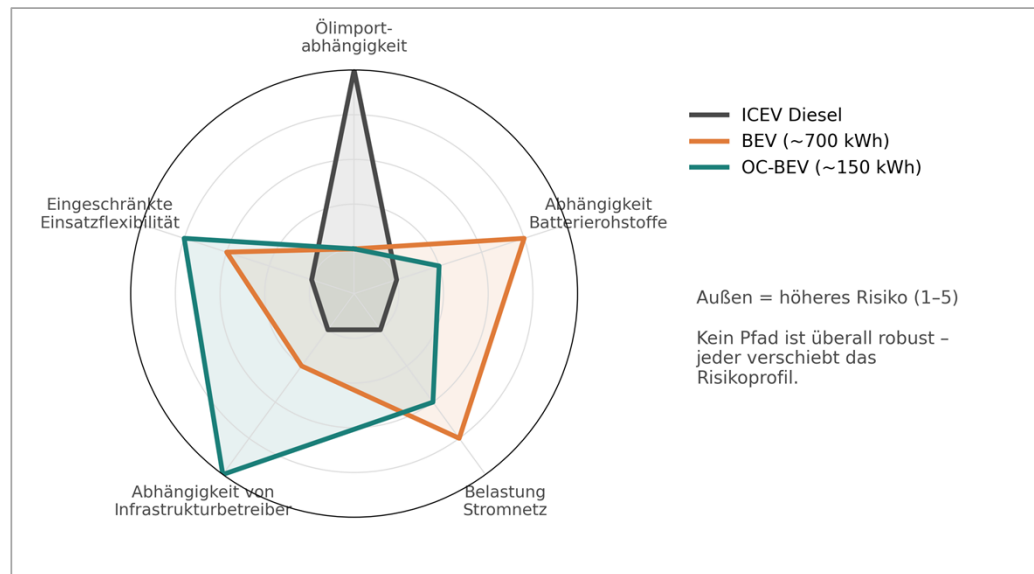
Die Wahl des Technologiepfads verschiebt Abhängigkeiten, hebt sie aber nicht komplett auf.



Destatis (Dieselpreisinformation; PM 549/2022); BloombergNEF Battery Price Surveys 2023 und 2025

Resilienz bewerten – aber nach welchen Kriterien?

- **Effizienzbewertungen blenden Schocks aus:** In Kosten-Nutzen-Analysen bleiben z. B. Rohstoffabhängigkeit und Auswirkungen auf Stromnetze unquantifiziert.
- **Aber auch Resilienzbewertung ist nicht eindeutig:** Dieselben drei Pfade, ein zusätzliches Kriterium – ein anderes Gesamtbild.
- → Die Kriterienwahl ist selbst eine politische Entscheidung. (Wer trifft sie?)



Eigene qualitative Einschätzung auf Basis von Zymelka et al. (2025), Qasseer et al. (2026), Gnann et al. (2023)

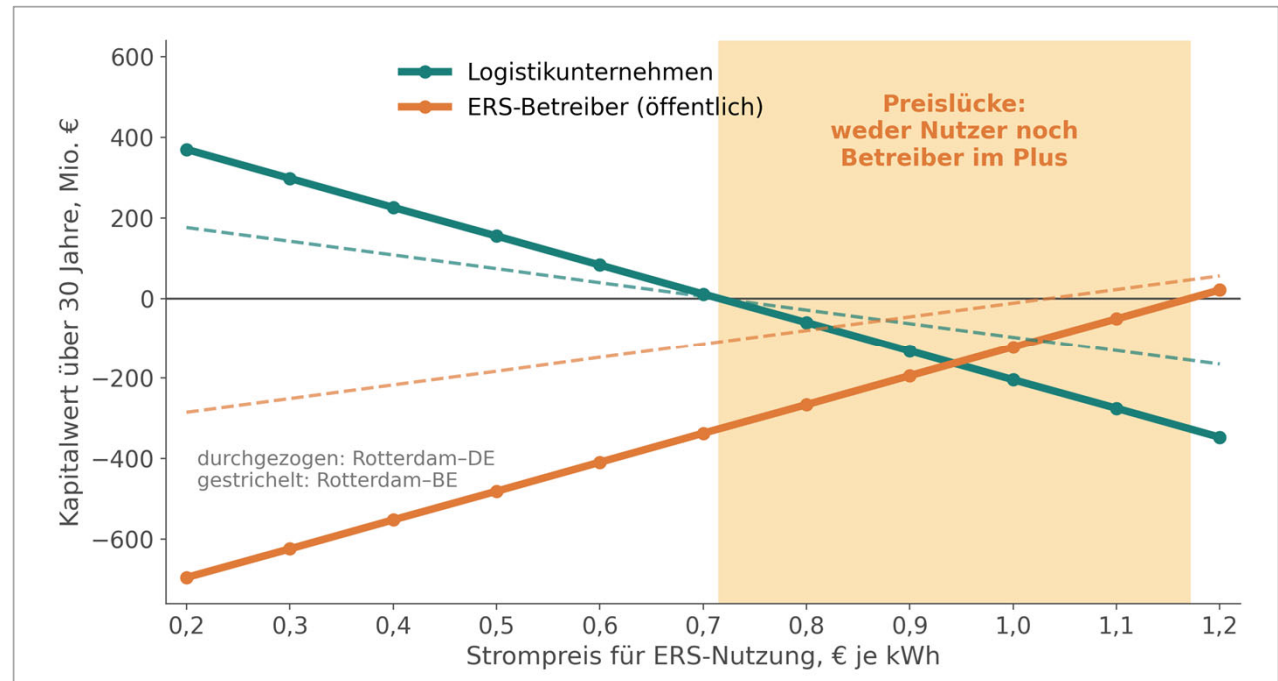
„Lohnt“ sich ERS betriebswirtschaftlich?

Trägt sich der ERS-Korridor betriebswirtschaftlich?

- Logistikunternehmen profitieren bei einem Strompreis bis ca. 0,70 €/kWh
- Für den Infrastruktur-Betreiber rechnet sich ERS ab ca. 1,15–1,20 €/kWh
- „Preislücke“: Dazwischen ist keine Seite im Plus. Die „Resilienz-Rendite“ kann nicht eingepreist werden.

Lösung durch staatliche Zuschüsse?

- Ein Korridor ist ein natürliches Monopol – kein Wettbewerb zwischen Anbietern.
- Staatliche Subvention als eine Art „Resilienz-Prämie“.
- Vgl. zum Tankrabatt auf Benzin- und Dieselpreis für Endverbraucher: reaktive Resilienz-Prämie, um das auf fossilen Kraftstoffen basierende System zu stabilisieren.



Zymelka et al. (2025)

Zymelka et al. (2025), Qasseer et al. (2026)

Barrieren für die Umsetzung des Korridors

Die Chancen auf Umsetzung des Korridors sind derzeit gering.

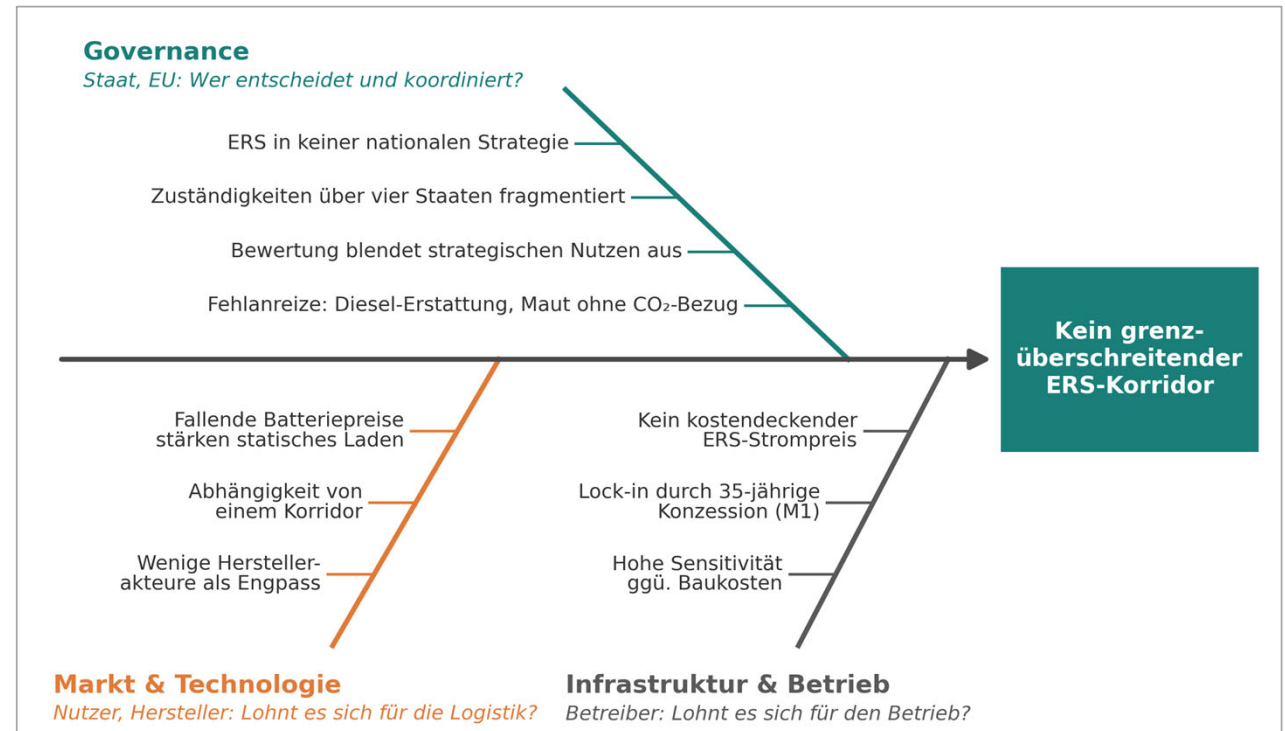
- Analyse der Umsetzungsbarrieren (Ishikawa-Diagramm, Abb. rechts).
- Ergebnis: Es fehlt nicht an Technik, Daten und volkswirtschaftlichem Nutzen, sondern an der politischen Entscheidung.
- **Verantwortungsdiffusion:** Geflecht an politischen Akteuren (mehrere Nationalstaaten, EU, z. T. Regionen), die an einem Strang ziehen müssten.

Drei Akteure, drei Entscheidungen

- **Nutzer:** investieren erst, wenn das Netz da ist.
- **Betreiber:** bauen erst, wenn die Nutzer da sind.
- **Staat und EU:** Könnten das „Henne-Ei-Problem“ lösen, vermeiden aber eine gemeinsame Entscheidung und Koordination.

Qasseer et al. 2026, Zymelka et al. 2025, Gnann et al. 2023 (BOLD)

M. Lüken, M. Lehmann: Resilienz als neues Infrastruktur-Paradigma?



TH Wildau, 14.10.2026

17

Zusammenfassung und Ausblick

Fazit

- Infrastrukturentscheidungen wie die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs wurden bislang primär nach Effizienz- und Kostenkriterien bewertet.
- Vor dem Hintergrund verschobener politischer Prioritäten und wirtschaftlicher Realitäten ist Resilienz ein eigenständiges Bewertungskriterium mit mehreren Indikatoren.

Ausblick

- Welche Planungs- und Governance-Instrumente wären nötig, um Resilienz neben Effizienz systematisch in Infrastrukturentscheidungen zu verankern?
- Wie lange „lohnt“ es sich, Systementscheidungen unter Unsicherheit offen zu halten?



Eigene Abbildung (M. Lehmann, mit KI-Unterstützung generiert.)

Zusammenfassung und Ausblick

Fazit

- Infrastrukturentscheidungen wie die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs wurden bislang primär nach Effizienz- und Kostenkriterien bewertet.
- Vor dem Hintergrund verschobener politischer Prioritäten und wirtschaftlicher Realitäten ist Resilienz ein eigenständiges Bewertungskriterium mit mehreren Indikatoren.

Ausblick

- Welche Planungs- und Governance-Instrumente wären nötig, um Resilienz neben Effizienz systematisch in Infrastrukturentscheidungen zu verankern?
- Wie lange „lohnt“ es sich, Systementscheidungen unter Unsicherheit offen zu halten?

„If you think risk management is expensive ... try an accident!“
(Weisheit im Projekt- und Risikomanagement)

„If you think resilience is expensive ... try a crisis!“



Eigene Abbildung (M. Lehmann, mit KI-Unterstützung generiert.)

Resilienz als neues Infrastruktur-Paradigma?

Governance-Herausforderungen der Elektrifizierung im
Straßengüterverkehr

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Michael Lüken ¹, Michael Lehmann^{1,2}

¹: Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.

²: Fachhochschule Erfurt

14.10.2026

TH Wildau

Verkehrswissenschaftliches Kolloquium

Kontakt:

Michael Lüken, bmlueken@yahoo.de

