



## Abschlussbericht

**Zuwendungsempfänger:**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

**Förderkennzeichen:** 03SFK5B0

**Vorhabenbezeichnung:**

**Kopernikus-Projekt Ariadne**

**Evidenzbasiertes Assessment für die Gestaltung der deutschen**

**Energiewende auf dem Weg zur Klimaneutralität – Teilvorhaben B0**

**Zeitraum:**

1. Juni 2020 – 31. August 2023

# Inhaltsverzeichnis

II.	Eingehende Darstellung .....	3
1.	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	3
2.	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	13
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	13
4.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	13
5.	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	14
6.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	14

*Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

## II. Eingehende Darstellung *(bis zu 20 Seiten)*

### 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendung wurde zweckgebunden entsprechend dem Antrag vom 28.02.2020 einschließlich Ergänzungen aus den Anträgen vom 19.01.2022 und 27.02.2023 innerhalb des Zuwendungszeitraums und für berücksichtigungsfähige Kosten verwendet.

Um Entscheidungsträger/innen angesichts der Komplexität der Transformation des Verkehrssektors umfassend über Handlungsalternativen für die Verkehrswende informieren zu können, wurde im Gesamtvorhaben eine sektorale Fokusanalyse Verkehrssektor (AP7) integriert in einen iterativen, wissenschaftsinformierten Deliberationsprozess mit Bürgerinnen und Bürgern sowie anderen Stakeholdern, in der eine gemeinsam erarbeitete, evidenzbasierte Evaluation und Priorisierung von Technologien und Politikinstrumenten für den Verkehrssektor im Lichte mehrerer gesellschaftlich relevanter Ziele: Klimaschutz (CO<sub>2</sub>-Wirksamkeit), faire Verteilung sowie weitere aus Bürgerperspektive auftauchende Ziele stattfinden sollte, um politische Entscheidungsträgerinnen und -träger zu befähigen, gesellschaftlich akzeptable, d.h. Zielkonflikte minimierende Maßnahmen im Verkehrssektor zu ergreifen, welche die 2030- und 2050-Klimaschutzziele erreichen zu helfen. Aufgrund der aktualisierten Fokussierung der Bundesrepublik auf Klimaneutralität im Jahr 2045, wurde das Jahr 2050 durch dieses ersetzt. Dazu sollten die folgenden wesentlichen Fragen innerhalb der Fokusanalyse bearbeitet und beantwortet werden:

- a) Was sind die wichtigsten Technologien und Politikmaßnahmen, um die 2030- bzw. 2050 Klimaschutzziele im Verkehrssektor (Personenverkehr, Güterverkehr) zu erreichen? Welche CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungswirkungen können die betrachteten Technologien und Politikmaßnahmen direkt nach Einführung entfalten und welche in 2030 und in 2050?
- b) Welche Verteilungseffekte zeigen verschiedene Handlungsoptionen im Verkehrssektor (insbesondere Personenverkehr) jeweils für verschiedene gesellschaftliche Gruppen? Sind regulatorische Maßnahmen (wie CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards) bezüglich ihrer Belastungen für verschiedene gesellschaftliche Gruppen sozialverträglicher als CO<sub>2</sub>-Steuern?
- c) Welche Auswirkungen haben Politikoptionen (v.a. für den Personenverkehr) bezüglich weiterer Problem-, Werte- und Zieldimensionen, die sich aus der wissenschaftsinformierten Bürger/innen-Deliberation sowie repräsentativen Haushalts-Panel-Befragungen ergeben? Wie werden die Politikoptionen schließlich aus Bürgerperspektive bewertet?

Im Rahmen von neun Unteraufgaben (Tasks) wurden jeweils einzelne Aspekte zur Beantwortung dieser Fragen bearbeitet, so in Task 7.1 die gemeinsame Erarbeitung, Priorisierung und Evaluation von Technologien und Politikinstrumenten mit Bürgerinnen und Bürgern, in Task 7.2 das begleitende qualitative Deliberationsformat, in Task 7.3 quantitative Panelbefragungen, in Task 7.4 die Ausgestaltung und Analyse einzelner Politikoptionen, in Task 7.5 deren Bewertung aus wissenschaftlicher und Bürger/innen-Sicht, in Task 7.6 die Definition von ganzen Szenarien aus Technologiepfaden und Politikmaßnahmen, in Task 7.7 deren Modellierung, in Task 7.8 und Analyse sowie in Task 7.9 die Bereitstellung der Daten und Ergebnisse für andere Arbeitspakete.

Dem DLR oblagen dabei folgende Aufgaben und Verantwortlichkeiten (aus Gesamtvorhabenbeschreibung):

- 1) Koordination und Leitung des Arbeitspaketes
- 2) Leitung Tasks 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9
- 3) Analyse des Ist-Zustandes im Sektor Verkehr
- 4) Entwicklung und Untersuchung von Einzelmaßnahmen im Personenverkehr und Güterverkehr hinsichtlich verkehrlicher Wirkungen und CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungswirkungen, Mitarbeit bei der Analyse der Verteilungswirkung
- 5) Mitarbeit bei der Entwicklung der Szenarien der Verkehrswende
- 6) Modellbasierte Analyse der Szenarien für den Personen- und Güterverkehr
- 7) Übergabe der Modellergebnisse zu verkehrlichen Wirkungen und CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungswirkungen der Verkehrswende (Szenarien) in die zentrale ARIADNE Datenbank

Zusätzlich:

- 8) Differenzierte Erforschung des Markthochlaufs alternativer Antriebe, sowie der Präferenzen, Vorstellungen und Bewertungen der deutschen Bevölkerung zu Verkehrswendemaßnahmen im Güterverkehr
- 9) kurzfristig erforderliche Erarbeitung und Modellierung zweier zusätzlicher Szenarien/ Transformationspfade

Zusätzlich lag im Projekt ein breites Spektrum von Umweltzielen im Fokus, um die Akzeptanz der Energiewende zu fördern, externe Kosten zu senken und die Erreichung der Klimaziele sicherzustellen, sie ganzheitlich zu betrachten. Dafür galt es im Arbeitspaket Systemische Wirkungen (AP2) die Umweltwirkungen, Wirkungen auf die öffentliche Gesundheit sowie Ressourcenverbräuche und Wechselwirkungen zu adressieren. Absehbar sind z. B.

gesteigerte Ressourcenverbräuche von kritischen Materialien bei gleichzeitiger Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Ressourcen. Eingebettet in das Vorhaben wurden deshalb zusätzlich die Arbeiten des DLR zur Bewertung von Ressourcenverbräuchen.

Dem DLR oblagen dabei folgende Aufgaben und Verantwortlichkeiten (aus Gesamtvorhabenbeschreibung):

- 10) Untersuchung des Bedarfs an Transportinfrastrukturen für u.a. Wasserstoff, Kohlenwasserstoffe
- 11) Wirkungsanalyse Umwelt mit Fokus auf kritische Materialien

### **Erzielte Ergebnisse**

- Zu 1) Die erfolgreiche Koordination und Leitung des Arbeitspakets AP7 erfolgte über den gesamten Projektzeitraum im Rahmen von institutionalisierten und protokollierten Austauschformaten innerhalb des Arbeitspakets, innerhalb der Tasks und außerhalb des Arbeitspakets, z.B. im Rahmen eines erweiterten Projekt-Steuerkreises.
- Zu 2) Die erfolgreiche Leitung der Tasks erfolgte entsprechend.
- Zu 3) Zur Analyse des Ist-Zustands der Energiewende im Verkehrssektor wurden unter Mithilfe des DLRs zum einen bestehende Sichten der Bürgerinnen und Bürger qualitativ sowie quantitativ untersucht. Zum anderen wurden die historischen und aktuellen Ausprägungen der Kernindikatoren untersucht und bewertet, konkret Markt- und Flottenzusammensetzungen in Bezug auf Antriebe bzw. Energieträger, Fahr- und Verkehrsleistungen, sowie Energieverbräuche und Emissionen.
- Zu 4) Insgesamt wurden während des Projektzeitraums zahlreiche Einzelmaßnahmen, wirksam auf nationaler oder europäischer Ebene, in verschiedenen Ausprägungen entwickelt und auf ihre Wirkung untersucht, so z.B. CO<sub>2</sub>-Bepreisungsansätze, Flottengrenzwerte, fiskalische Maßnahmen, infrastrukturelle Maßnahmen, regulatorische Maßnahmen. Eine Beispielübersicht und einfach zu erschließende Wirksamkeitsvisualisierung aus der gemeinsamen Erarbeitung mit Bürgerinnen und Bürgern kann unter <https://ariadneprojekt.de/explorationsmodul-verkehrswende/> eingesehen werden.
- Zu 5) Im Zuge der Zusammenarbeit mit AP2 wurde eine im Laufe des Projektzeitraums angepasste Matrix von Technologie- (Fokus auf Technologieoffenheit, Elektromobilität, Wasserstoffwirtschaft oder E-Fuel-Kapazitäten) und Politik-Szenarien (Paradigmen für Politikmixe wie Regulierung, Markt, Digitalisierung, Neue Mobilität oder

Energiesouveränität) inkl. der jeweiligen Grundannahmen erarbeitet und dokumentiert, die als Grundlage für die Modellierungstätigkeiten diene.

- Zu 6) Die Analyse der Szenarien erfolgte mittels der Kopplung der DLR-Modelle VECTOR21 (vom Institut für Fahrzeugkonzepte, speziell zum Hochlauf versch. Antriebe innerhalb des deutschen Pkw- und Lkw-Marktes), DEMO (vom Institut für Verkehrsforschung zur Simulation der aktuellen und zukünftigen Nachfrage im Personenverkehr und Abschätzung der Güterverkehrsnachfrage), sowie Berechnungen von Energie- und Emissionsbilanzen.
- Zu 7) Die Modellergebnisse sind unter <https://data.ece.iiasa.ac.at/ariadne/#> zugänglich.
- Zu 8) Für jedwedes/n Szenario bzw. Politikmix wurden differenzierte Markthochläufe im deutschen Pkw- und Lkw-Markt erforscht. Die Erforschung der Vorstellungen und Bewertungen der deutschen Bevölkerung zu Verkehrswendemaßnahmen im Güterverkehr wurde empirisch mittels einer Fragebogenstudie vorgenommen.
- Zu 9) Es erfolgte eine abschließende außerplanmäßige Aktualisierung der Ariadne-Technologieszenarien, dokumentiert unter <https://data.ece.iiasa.ac.at/ariadne/#> und visualisiert unter <https://tracker.ariadneprojekt.de/de/transport/>.

Die eingangs gestellten Fragen zu AP7, lassen sich zusammenfassend wie folgt beantworten:

- Zu a) „Bis zum Jahr 2030 hat die direkte Elektrifizierung das größte Treibhausgas-(THG)-Emissionsminderungspotenzial im Verkehrssektor. Da für Pkw und teilweise auch für die Lkw schon jetzt kommerziell wettbewerbsfähige und technisch ausgereifte batterieelektrische Lösungen verfügbar sind, können sich kurzfristige Dekarbonisierungsanstrengungen auf diese Segmente konzentrieren. Selbst mit einem massiven Anstieg des Anteils batterieelektrischer Fahrzeuge werden die Sektorziele aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz bis zum Jahr 2030 nicht erreicht und müssen entsprechend von anderen Sektoren kompensiert werden. Die kurzfristigen Minderungspotenziale durch eine reine Antriebswende sind durch die Langlebigkeit der fossilen Bestandsfahrzeuge begrenzt. Selbst bei einer deutlichen Kostendegression von batterieelektrischen Fahrzeugen, sehr schnellem Ladeinfrastrukturausbau und hohen CO<sub>2</sub>-Preisen werden kurzfristig zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein, um das Verkehrssektor-Ziel im Jahr 2030 zu erreichen. Hierfür kommen vor allem Maßnahmen zur Änderung des Mobilitätsverhaltens, wie der Wechsel auf andere Verkehrsträger, in Frage. Die indirekte Elektrifizierung (Nutzung der Energieträger Wasserstoff und E-Fuels) bildet bis zum Jahr 2045 in Teilbereichen des Güter-, Personenschienen- und

Busverkehrs sowie für den Flugverkehr eine sinnvolle und für Verbrenner-Restbestände bei den Pkw eine notwendige Alternative zur direkten Elektrifizierung. Die Nutzung dieser Energieträger erfordert jedoch im Vergleich zur direkten Elektrifizierung einen erheblich größeren Einsatz an Energie, insbesondere erneuerbarem Strom. [...]

Es wird klar, dass für die Erreichung des Ziels von null THG-Emissionen im Jahr 2045 mithilfe der Antriebswende bereits jetzt Maßnahmen ergriffen werden müssen, die über geplante und teilweise sogar über noch diskutierte Maßnahmen hinausgehen. Die folgenden Instrumente sind für eine Antriebswende notwendige bzw. so genannte No-Regret-Instrumente, weil effektiv und nachhaltig im Sinne von technologieunabhängig förderlich. Ein schneller und massiver Ausbau der Erneuerbaren Energien ist unabhängig vom Technologiepfad notwendig, um die nachgefragte Energie tatsächlich auch indirekt CO<sub>2</sub>-neutral zur Verfügung zu stellen. Ein sehr schneller Ausbau von Lade- bzw. Tankinfrastruktur beseitigt Hemmnisse, sich doch für den Kauf eines E-Pkws anstatt eines Verbrenners zu entscheiden. Die Neuzulassungen von E-Pkw im Zeitraum nach 2030 profitieren besonders von dann bereits vorhandenem Zugang zu Lade- bzw. Tankinfrastruktur. Strengere CO<sub>2</sub>-Standards für Neufahrzeuge nehmen weiterhin die Hersteller in die Pflicht und garantieren eine Angebotsweiterung an E-Pkw. Ein starkes CO<sub>2</sub>-Preis-Signal erhöht signifikant die Kosten nicht emissionsfrei zurückgelegter Kilometer. Eine relative Attraktivitätssteigerung von E-Pkw-Käufen und die Attraktivitätsminderung von Verbrenner-Käufen führen kurzfristig zu einem steileren Anstieg an E-Pkw-Käufen und können so durch sozial-normative Effekte auch den langfristigen Trend zur vollständigen Antriebswende unterstützen.

Fazit: Das Ziel von null THG-Emissionen im Verkehrssektor im Jahr 2045 kann mit den hinterlegten Annahmen erreicht werden. Voraussetzungen [...] bilden ausreichend vorhandener grüner Strom, technologische Entwicklungen, die zu einer deutlichen Kostendegression von alternativen Antrieben führen, ein deutlich verbesserter Zugang zu Lade- bzw. Tankinfrastruktur sowie scharfe CO<sub>2</sub>-Standards und ein starkes CO<sub>2</sub>-Preis-Signal. Dadurch wären womöglich im Jahr 2045 im Vergleich zu heute keine drastischen Veränderungen in der Verkehrsnachfrage (gefahrenen Personen- bzw. Tonnenkilometer und modale Verlagerungen) notwendig. Jedoch, die Erreichung der Ziele aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz bis 2030 wird nicht gewährleistet. Die Transformation durch eine reine Antriebswende ist eher träge. Es bedarf zusätzlicher Maßnahmen, die eine Änderung des Mobilitätsverhaltens fördern. Industriepolitische Maßnahmen zur Förderung der Antriebswende schaffen zwar Rahmenbedingungen, die tatsächlichen

Auswirkungen auf z. B. daraus resultierende Emissionsminderungen sind über Verhalten von Verbraucherinnen und Verbrauchern vermittelt. Deshalb stellt deren Akzeptanz von weiterhin notwendigen Maßnahmen eine der größten Herausforderungen dar.“ (Koller et al., 2021).

Mit besonderem Fokus auf Einzelmaßnahmen: „Die Klimaschutzziele für das Jahr 2030 sind im Verkehrssektor nur mit starken zusätzlichen Treibhausgasreduktionen erreichbar. Die [Anm.: bis dato] beschlossenen Maßnahmen können laut gegenwärtigen Projektionen nur einen Bruchteil jener Emissionen reduzieren, welche für die Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor notwendig wären. [...] Wir zeigen, dass die wirkungsstärksten Maßnahmen tendenziell eine geringe Zustimmung in der Bevölkerung erfahren, wobei die Lastenverteilung keinen sichtbaren Einfluss auf die Bevölkerungsakzeptanz hat. Maßnahmen, die in der Bevölkerung mehrheitlich unterstützt werden, führen nach gegenwärtigen Projektionen nur zu geringen Treibhausgasreduktionen, so dass die Erreichung der Klimaziele 2030 ohne kontroverse Maßnahmen wie höhere CO<sub>2</sub>-Preise oder einer flächendeckenden Maut unwahrscheinlich ist. Um die Befürwortung von gegenwärtig kontroversen Maßnahmen zu erhöhen, ist es notwendig, sichtbare Rückverteilungsmechanismen zu etablieren, Maßnahmen durch gruppenspezifische Kommunikation zu begleiten und die Einführung von Politikinstrumenten strategisch zu sequenzieren.“ (Levi et al., 2021).

Mit besonderem Fokus auf das Thema Energiesouveränität: „Sinnvolle kurz- und mittelfristige Strategien zur Erreichung und Erhaltung der sektorübergreifenden Energiesouveränität im Verkehrssektor bieten Synergieeffekte in Bezug auf die Erreichung der KSG-Ziele. Sie können sich im Sinne der weiteren Annäherung an die sektoralen KSG-Ziele bis 2030 und der Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2045 auszahlen und dazu beitragen, andere Sektoren in Bezug auf den Transformationsdruck insbesondere bis 2030 zu entlasten [...]. Auch in der langen Frist nach 2030 zeigen die getroffenen Maßnahmen [Anm.: zur Erhaltung kurzfristiger Energiesicherheit] ihre Wirksamkeit. Insbesondere die beschleunigte Antriebswende im energieintensiven Pkw-Verkehr vermindert sowohl die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen als auch den Endenergiebedarf des Sektors insgesamt. Neben langfristigen Effizienzsteigerungen zahlen auch die in der kurzen und mittleren Frist getroffenen Maßnahmen zur Vermeidung und Verlagerung auf die Einsparung von Energie bis 2045 ein. Zu nennen ist hier insbesondere die fahrleistungsabhängige Pkw-Maut, die zum einen den aufgrund von mittel- und langfristig günstigerer Pkw-Nutzung zu erwartenden zusätzlichen Pkw-

Verkehr mindert und zum anderen den Wegfall von Energiesteuereinnahmen kompensiert. Unterstützt wird diese Verlagerung durch das kostenfreie Angebot im Öffentlichen Personennahverkehr, das jedoch auch unerwünschte Verlagerungseffekte von den aktiven Modi anreizt. Im Jahr der geforderten Klimaneutralität 2045 verringern die Maßnahmen die Abhängigkeit von CO<sub>2</sub>-neutralen Flüssigkraftstoffen, die zur vollständigen De-Fossilisierung des Pkw-Verkehrs benötigt werden [...].“ (Luderer et al., 2022).

Mit Fokus auf verschiedener Politikparadigmen: „Die größte CO<sub>2</sub>-Minderung [Anm.: bis 2030] erreicht der Pfad „Neue Mobilität“ [Anm.: Zentrales Merkmal dieses Politikpfades ist die weitreichende Umgestaltung des gesamten Verkehrssystems durch Änderungen im Mobilitätsverhalten, in der Stadtplanung und weiteren Infrastrukturen. Fahrzeuge mit fossilem Antrieb werden nicht nur durch Nullemissionsfahrzeuge ersetzt, sondern neue, geteilte Mobilitätsformen, ÖPNV und Fuß- und Radverkehr stehen im Mittelpunkt der Verkehrsplanung. Annahmen und verkehrspolitische Instrumente unter <https://ariadneprojekt.de/explorationsmodul-verkehrswende/>]. Mit 78,9 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> liegen die Emissionen des Verkehrs unter dem Zielwert des Bundes-Klimaschutzgesetzes für 2030 (85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>). Die anderen Pfade [Anm.: „Regulierung“, „Digitalisierung“ und „Markt“] erreichen bis 2030 das für den Verkehrssektor gesetzte Ziel des Klimaschutzgesetzes nicht.“ (Kopernikus-Projekt Ariadne, 2022).

- Zu b) Mit Fokus auf verschiedene Politikparadigmen: „Der Regulierungspfad macht durch seine Maßnahmen hauptsächlich die Anschaffung eines Verbrenners teurer. Dies belastet niedrige Einkommen stärker, die auf das Auto angewiesen sind. Das Kosten für das Fahren eines Autos werden in diesem Pfad nur moderat höher.“ Im Digitalisierungspfad bleiben Verbrenner „weiterhin für eine große Mehrheit der Bevölkerung erschwinglich. Vielfahrende und -reisende (meist einkommensstarke Haushalte) sind stärker vom CO<sub>2</sub>-Preis betroffen.“ Im Marktpfad werden trotz „des hohen CO<sub>2</sub>-Preises [...] Haushalte mit niedrigem Einkommen entlastet, da insgesamt mehr Geld für eine Pro-Kopf-Rückverteilung zur Verfügung steht. Wird z.B. eine Kopf-Pauschale ausgezahlt, machen Haushalte mit niedrigem Einkommen Gewinn, da ihr Mobilitätsverhalten im Vergleich zu Haushalten mit höheren Einkommen weniger CO<sub>2</sub>-lastig ist, z.B. weil sie weniger fliegen oder kleinere Autos fahren.“ Im Pfad „Neue Mobilität“ würden sowohl „einkommensstarke als auch -schwache Haushalte [...] weniger Geld für Mobilität ausgeben müssen. Autos werden nicht viel teurer und es gibt mehr günstige Alternativen

durch öffentliche Verkehrsmittel. Durch den relativ hohen CO<sub>2</sub>-Preis [..., Anm.: und die Rückerstattung aus seinen Einnahmen] werden Haushalte mit geringerem Einkommen zusätzlich entlastet.“ (Kopernikus-Projekt Ariadne, 2022).

Mit Fokus auf CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards, insbesondere ein Verbrennerneuzulassungsverbot: „Die Verteilungseffekte eines Verbrenner-Neuzulassungsverbots ab 2035 oder 2030 sind nicht nennenswert: Im Neuwagenmarkt betrifft das Verbot keine Haushaltsgruppe besonders, da angenommen wird, dass ZEV bei der Einführung des Verbots keine höheren Anschaffungspreise mehr aufweisen und es damit zu keinen Mehrkosten gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotor kommt. Der Neuzulassungsanteil von ZEV ist sowohl im Jahr 2030 als auch im Jahr 2035 für die Haushalte mit geringem Einkommen nicht geringer als für Haushalte mit hohem Einkommen. Geringe Verteilungseffekte ergeben sich über den Gebrauchtwagenmarkt. Durch das Verbot kommt es rund fünf Jahre nach Einführung des Verbots zu einer Verknappung von guten gebrauchten Verbrennern und die durchschnittliche Qualität von Verbrennern im Gebrauchtwagenmarkt sinkt. Hierdurch ergeben sich für alle Einkommensgruppen etwas geringere Anschaffungskosten für gebrauchte Verbrenner, während sich der Preis von gebrauchten ZEV nur unwesentlich ändert. Haushalte mit geringem Einkommen profitieren etwas stärker von geringeren Anschaffungskosten für gebrauchte Benziner, sie müssen aber auch die etwas geringere Qualität der Fahrzeuge in Kauf nehmen. Insgesamt impliziert dies eine leicht progressive Verteilungswirkung des Verbots, dessen finanzielle Bedeutung allerdings gering ist.“ (Seibert, Bolz, Koch, & Baldenius, 2022).

Zu c) „Der überwiegende Teil der deutschen Bevölkerung hat [Anm.: in der Erhebungswelle 2021] eine positive Haltung gegenüber der Verkehrswende und befürwortet die zentralen verkehrspolitischen Zielsetzungen. Die Menschen sind allgemein an dem Thema interessiert und erachten eine breite aktive gesellschaftliche Unterstützung sowie weitere politische Maßnahmen als wichtige Voraussetzungen für den Erfolg des Transformationsprozesses. Mit den Fortschritten der Verkehrswende sind die meisten Befragten unzufrieden. Die zentralen Herausforderungen und Probleme beim Umbau des Verkehrssystems sehen die Bürgerinnen und Bürger vor allem in dem Ausbau alternativer Verkehrsinfrastruktur, in den steigenden Kosten und der Verfügbarkeit umweltfreundlicher Verkehrsmittel. Allgemein befürworteten die Befragten Pull-Maßnahmen stärker als Push-Maßnahmen. Ausnahmen sind die Verschärfung der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Benzin- und Diesel-PKW, eine Reform der Kfz-Steuer in Richtung eines Bonus-Malus-Systems, die Abschaffung der steuerlichen Bevorteilung von Dieselmotoren

sowie ein Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h. Unter den Bürgerinnen und Bürgern besteht Uneinigkeit hinsichtlich der Zuversicht, die eigene Mobilität in absehbarer Zukunft umweltfreundlicher gestalten zu können. Ein Großteil kann sich vorstellen, mehr Wege mit dem Fahrrad zurückzulegen. Eine vollständige Abschaffung des eigenen Autos kommt für die wenigsten in Frage. Eine verbesserte Qualität umweltfreundlicher Mobilitätsangebote wird als der wesentliche Treiber für eine schrittweise Abkehr vom eigenen Auto gesehen. Elektroautos stellen mittlerweile für viele Haushalte eine denkbare Alternative zu Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben dar. Dennoch gibt es auch reichlich Kritik und Zweifel an dieser Technologie. Allgemein herrscht eine hohe Zufriedenheit mit der Lebensqualität am Wohnort. Einige Auswirkungen des Verkehrs auf die Umwelt werden jedoch als belastend wahrgenommen. Mit der bestehenden Verkehrsinfrastruktur und klimafreundlichen Verkehrsangeboten sind weniger als die Hälfte zufrieden. Für die erfolgreiche Gestaltung der Verkehrswende und die Stärkung des sozialen Zusammenhalts vor Ort werden Beteiligungsmöglichkeiten von den Befragten als relevant erachtet. Konkrete Überlegungen hinsichtlich der gewünschten Rolle der eigenen Kommune im Zuge der Verkehrswende können helfen, die bevorstehenden Veränderungen zu erleichtern und das gemeinschaftliche Engagement zu stärken. Nur eine Minderheit der Befragten ist der Ansicht, dass die Verkehrswende dem Wirtschaftsstandort Deutschland insgesamt schaden oder dadurch der eigene Arbeitsplatz gefährdet wird. Die aktuellen und erwarteten Belastungen in Folge steigender Mobilitätskosten werden vor allem von Haushalten mit niedrigen Einkommen mit Sorge betrachtet. Die wahrgenommenen Chancen und Risiken für die eigene Beschäftigung halten sich die Waage.“ (Wolf, Fischer, & Huttarsch, 2021,

[https://ariadneprojekt.de/media/2022/11/Soziales\\_Nachhaltigkeitsbarometer\\_2021.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2022/11/Soziales_Nachhaltigkeitsbarometer_2021.pdf)). Für die Ergebnisse zu den Erhebungswellen 2022 und 2023 siehe Wolf, Huttarsch,

Fischer und Ebersbach (2022,

[https://ariadneprojekt.de/media/2022/09/iass\\_soziales\\_nachhaltigkeitsbarometer\\_2022\\_web.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2022/09/iass_soziales_nachhaltigkeitsbarometer_2022_web.pdf)) sowie Wolf, Ebersbach und Huttarsch (2023,

[https://ariadneprojekt.de/media/2023/07/Soziales\\_Nachhaltigkeitsbarometer\\_2023\\_KopernikusProjektAriadne.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2023/07/Soziales_Nachhaltigkeitsbarometer_2023_KopernikusProjektAriadne.pdf)), sowie Levi, Wolf und Sommer (2023,

[https://ariadneprojekt.de/media/2023/03/Ariadne-](https://ariadneprojekt.de/media/2023/03/Ariadne-Analyse_LokalerKlimaschutzeinstellungen_Maerz2023.pdf)

[Analyse\\_LokalerKlimaschutzeinstellungen\\_Maerz2023.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2023/03/Ariadne-Analyse_LokalerKlimaschutzeinstellungen_Maerz2023.pdf)). Zusätzliche Ergebnisse

qualitativer Untersuchungen finden sich in Blum et al. (2021,

[https://ariadneprojekt.de/media/2021/02/2021\\_Februar\\_Ariadne-Report\\_Fokusgruppen.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2021/02/2021_Februar_Ariadne-Report_Fokusgruppen.pdf)), Blum, Treichel-Grass und Kowarsch (2022, [https://ariadneprojekt.de/media/2022/07/Ariadne-Report\\_Buergerkonferenz-Verkehrswende\\_Juli2022.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2022/07/Ariadne-Report_Buergerkonferenz-Verkehrswende_Juli2022.pdf)), sowie Blum, Wolf, Huttarsch und Kowarsch (2023, [https://ariadneprojekt.de/media/2023/05/Ariadne-Analyse\\_Begleitforschung-Buergerdeliberation\\_Mai2023-1.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2023/05/Ariadne-Analyse_Begleitforschung-Buergerdeliberation_Mai2023-1.pdf)).

- Zu 10) Es wurde ein zeitlich und räumlich aufgelöstes europäisches Energiesystemmodell auf Basis des REMix-Frameworks für die Untersuchung des Bedarfs an Transportinfrastrukturen für Strom, Wasserstoff und Methan in emissionsfreien, integrierten Zukunftsenergiesystemen entwickelt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Bewertung der Rolle von zukünftigen Energieimporten aus den Nachbarregionen des europäischen Festlands sowie der Wirkung unterschiedlicher Annahmen zur Realisierbarkeit eines transeuropäischen Transportnetzausbaus. Dafür wurden verschiedene abstrahierte Szenarien zu Energieimporten und Leitungsausbau definiert und das Modell auf diese angewendet.
- Zu 11) Es erfolgte eine umfassende Literaturlauswertung und Experteninterviews zur Weiterentwicklung zweier bestehender Datenbanken (1: der aktuelle und erwartete zukünftige spezifische Rohstoffbedarf von zentralen Energie- und Verkehrs-Technologien, 2: Szenarien der Entwicklung der Marktanteile von Sub-Technologien (z.B. verschiedenen Batterietypen) innerhalb einer Technologieklasse).

Zusammenfassen lassen sich die Ergebnisse wie folgt:

Die Ergebnisse zu 10) zeigen, dass die Entscheidung über die Importstrategie große Auswirkungen auf die optimale Ausgestaltung und den Betrieb der Energieinfrastruktur hat. Hinsichtlich des Transports von Wasserstoff erweist sich die Umwidmung von Erdgaspipeline als eine gegenüber dem Leitungsausbau zu bevorzugende Option (siehe Wetzell, Gills, & Bertsch, 2023).

Die Ergebnisse zu 11) zeigen, dass in vielen zentralen Technologien für die Energie- und Verkehrswende kritische Materialien eine wichtige Rolle spielen, um die Funktionalität und kostengünstige Performanz der Technologien zu gewährleisten. Durch die globale Transformation wird der Bedarf an vielen potentiell kritischen Materialien z.T. überall deutlich und schnell ansteigen, z.B. bei Lithium, Dysprosium, Cobalt, Iridium, Tellur, Vanadium etc. steht zu erwarten, dass der Bedarf für Energie- und Verkehrstechnologien

den Gesamtbedarf (für alle Anwendungen) dominiert. Es können sich kurz- bis mittelfristige Materialengpässe ergeben, da eine kurzfristige Ausweitung der Produktion für viele Materialien nur bedingt möglich ist, bzw. die Erschließung neuer Lagerstätten einen erheblichen zeitlichen Vorlauf erfordert. An sich könnte der Bedarf an (Primär-)Material prinzipiell reduziert werden durch eine Erhöhung der Materialeffizienz (zwischen Mine und Endprodukt), durch eine Verlängerung der Lebensdauer der Technologien oder durch die Entwicklung recycling-freundlicher Technologien und den parallelen Aufbau einer Recycling-Infrastruktur. Insbesondere aber zeigt es sich, dass die Entwicklung von neuen Technologien, die auf bestimmte kritische Materialien weitestgehend oder völlig verzichten (wie z.B. in LFP-Batterien im Gegensatz zu vielen anderen Lithium-Ionen-Batterietypen kein Cobalt eingesetzt wird), ein großes Potential hat, den Rohstoffbedarf zu reduzieren und potentielle Rohstoffengpässe abzumildern. Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen, die den zukünftigen Bedarf an Energie-Infrastrukturen reduzieren, z.B. eine Verkleinerung der Fahrzeugflotte ermöglichen, können ebenso zur Reduktion des Rohstoffbedarfs und zur Abmilderung von Preisrisiken beitragen (siehe Schlichenmaier & Naegler, 2021 und 2022).

## **2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises ist die Position „0837 Personalkosten“ mit einem Anteil von 98,8% in Bezug auf die gesamten nachkalkulatorischen Kosten.

## **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Das Thema Energiewende erfordert einen systemwissenschaftlichen Ansatz, d.h. interdisziplinäre integrierte technische, ökonomische, als auch soziale Analysen über Institutionen hinweg ausgewogen eingebettet in die Exploration und Berücksichtigung von gesellschaftlichen Wertevorstellungen und Akteursgruppen. Um das nötige Orientierungswissen bereitzustellen, wurde in den diversen Arbeiten des Teilvorhabens allen diesen Merkmalen gerecht geworden. Insbesondere mit dieser Bearbeitungstiefe hat sich die Kopernikus- bzw. Ariadne-Forschung des BMBF als Marke präsent und anerkannt in Medien, Politik und Gesellschaft etabliert.

## **4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Fortschreibung der politischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Verwertung ist insofern gewährleistet, als das im Rahmen von Ariadne unter Mithilfe des DLRs zahlreiche interaktive Konzepte und Werkzeuge entstanden sind, die auch nach Projektablauf Bestand haben und die Möglichkeit bieten, die Ergebnisse fokussiert einzusehen bzw. zu aktualisieren und zu erweitern. Mit dem langen Zeithorizont der Betrachtungen in Ariadne

bleiben die Ergebnisse mind. mittelfristig sehr aktuell. Für sämtliche Stakeholder wurden Produkte und Plattformen geschaffen, um ihnen einen adressatengerechten Zugang zu Daten und Ergebnissen zu liefern.

Die Methodik und die Ergebnisse dienen zur Gewinnung weiterer Projekte und erhöhen deutlich die Zuwendungschancen bei Projekten zum Thema Energie, Klima plus X (in diesem Falle Verkehr).

Die so genannten Ariadne-Szenarien sind Grundlage und werden Grundlage weiterer wissenschaftlicher Veröffentlichungen sein. Sie bilden eine erweiterbare Basis, um zum Beispiel zusätzliche sektorale politische Maßnahmen abzubilden und dabei die übersektorale Perspektive einzubinden bzw. auf Referenzentwicklungen zugreifen zu können.

Die Ergebnisse bilden den aktuellen wissenschaftlichen Standard (auch international) an modellierten Szenarien auf Basis der gemeinsamen Nutzung von Bottom-Up-Modellierung (sektorspezifisch) und Integrated Assessment (cross-sektoral). Sowohl die Rahmendaten(-erzeugung) als auch die Ergebnisse werden fortlaufend genutzt und fortgeschrieben, auch außerhalb des Projektkontexts. Das Vorgehen der gemeinsamen Modellierung diente bereits als Blaupause zur Gewinnung weiterer Projekte.

## **5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Kurz vor oder während der Durchführung erschienen zahlreiche Veröffentlichungen in ähnlichen Projekten bzw. von Institutionen im selben Forschungsumfeld. Dazu gehörten auszugsweise die Studie „Klimaneutrales Deutschland: In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals.“ (Prognos AG, Öko-Institut e.V., & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH), das BCG Gutachten für den BDI „Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft“ (2021), Projektionsberichte und ein Papier zur ökonomischen Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland des UBA oder auch „A Societal Transformation Scenario for Staying Below 1.5°C“ der Heinrich-Böll-Stiftung (2020) oder „The role of critical minerals in energy transitions“ (2021) der IEA. Sie bildeten wichtigen Input in Bezug auf betrachtete Szenarienbestandteile bzw. sogar Eingangsdaten für eine systematische Vergleichsanalyse im Rahmen von:

[https://ariadneprojekt.de/media/2022/03/2022-03-16-Big5-Szenarienvergleich\\_final.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2022/03/2022-03-16-Big5-Szenarienvergleich_final.pdf).

Insgesamt änderte sich während des Projekts mehrfach der deutsche und europäische politische Rahmen sowie die geo-politischen Rahmenbedingungen. Diesen Änderungen wurde fortwährend Rechnung getragen.

## 6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Luderer, G., Günther, C., Sörgel, D., Kost, C., Benke, F., Auer, C., **Koller, F.**, Herbst, A., Reder, K., Böttger, D., Ueckerdt, F., Pfluger, B., Wrede, D., Strefler, J., Merfort, A., Rauner, S., Siala, K., & **Schlichenmaier, S.** (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich (Zusammenfassung). In Luderer, G., Kost, C., Sörgel, D. (Eds.). Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Ariadne-Report, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.  
<https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>

**Koller, F., Winkler, C., Liedtke, G., Österle, I., Mocanu, T., Seibert, D., Deniz, Ö., Matteis, T., Bergfeld, M.,** Sehn, V., Kattelman, F., Haun, M., Dirnaichner, A. (2021). Verkehr. In Luderer, G., Kost, C., & Sörgel, D. (Eds.). Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Ariadne-Report, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>

Levi, S., Wolf, I., Flachsland, C., Koch, N., **Koller, F.**, & Edmondson, D. (2021): Klimaschutz und Verkehr: Zielerreichung nur mit unbequemen Maßnahmen möglich. Ariadne-Analyse, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

Luderer, G. **et al.** (2021): ARIADNE Scenario Explorer (Datensatz).  
<https://data.ece.iiasa.ac.at/ariadne/#/login?redirect=%2Fworkspaces>

Luderer, G. **et al.** (2021): ARIADNE Scenario PathFinder. <https://pathfinder.ariadneprojekt.de/>

**Schlichenmaier, S., & Naegler, T.** (2021): „Kritische Materialien für die Energiewende“, in Luderer, Kost und Sörgel (Herausgeber): „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich“. Ariadne-Report, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

Luderer, G., Bartels, F., Blesl, M., Burkhardt, A., Edenhofer, O., Fahl, U., Gillich, A., Herbst, A., Hufendiek, K., Kaiser, M., Kittel, L., **Koller, F.**, Kost, C., Pietzcker, R., Rehfeld, M., Schreyer, F., **Seibert, D.**, & Sievers, L. (2022). Deutschland auf dem Weg aus der Gaskrise – Wie sich Klimaschutz und Energiesouveränität vereinen lassen. Ariadne-Kurzdossier, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. <https://doi.org/10.48485/pik.2022.004>

**Seibert, D., Bolz, M.-S.,** Koch, N., & Baldenius, T. (2022). Klima- und Verteilungswirkung eines Verbrenner-Neuzulassungsverbots von Pkw in Deutschland und die Rolle des CO<sub>2</sub>-Preises. Ariadne-Analyse, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

**Kopernikus-Projekt Ariadne** (2022). Explorationsmodul Verkehrswende.  
<https://ariadneprojekt.de/explorationsmodul-verkehrswende/>

Edmondson, D., Flachsland, C., aus dem Moore, N., Koch, N., **Koller, F.**, Gruhl, H., Brehm, J., & Levi, S. (2022). Bewertung der klimapolitischen Instrumentenmix-Pfade: Eine Anwendung auf den deutschen Sektor für leichte Nutzfahrzeuge. Ariadne-Hintergrund, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. (Deutsch und Englisch)

**Schlichenmaier, S., & Naegler, T.** (2022): "May material bottlenecks hamper the global energy transition towards the 1.5°C target?", *Energy Reports*, 8.  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.025>

Ueckerdt, F., Pfluger, B., Odenweller, A., Günther, C., Knodt, M., Kemmerzell, J., Rehfeldt, M., Bauer, C., Verpoort, P., **Gils, H.C.**, & Luderer, G. (2021). Durchstarten trotz Unsicherheiten – Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie. Ariadne -Kurz Dossier, Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.

**Seibert, D., Mocanu, T., Österle, I., Matteis, T., & Koller, F.** (2023). Decarbonizing the German transport sector: Why the 2030 sector targets are likely to be missed. In 2022 Conference Proceedings Transport Research Arena, TRA Lisbon 2022, 72, pp. 2784-2791. Elsevier B.V.. Transport Research Arena (TRA) Conference, 14.-17. Nov. 2022, Lissabon, Portugal.  
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.821>

Mocanu, T., Seibert, D., Koller, F., & Putatunda, A. (2023). Towards a GHG-neutral German transport sector: Modelling possible pathways and scenarios. European Transport Conference 2023 (ETC), 6.-8. Sep. 2023, Mailand, Italien.

**Kopernikus-Projekt Ariadne** (2023). Transformation Tracker – Ist die Energiewende auf Kurs?.  
<http://tracker.ariadneprojekt.de/>

**Wetzel, M., Gils, H.C.,** Bertsch, V. (2023). Green energy carriers and energy sovereignty in a climate neutral European energy system. *Renewable Energy*, 210.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.015>

Geplant:

**Seidel, S., Seiffert, R., & Dubernet, I.** (planned). Exploring Customer Preferences for Alternative Last-Mile Delivery in e-commerce: A Stated Preference approach with Payment Considerations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* .

Wolf, I., **Koller, F.** (planned). Effect of price signals on self-reported use of modes in passenger transport.



## Abschlussbericht

**Zuwendungsempfänger:**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

**Förderkennzeichen:** 03SFK5B0

**Vorhabenbezeichnung:**

**Kopernikus-Projekt Ariadne**

**Evidenzbasiertes Assessment für die Gestaltung der deutschen**

**Energiewende auf dem Weg zur Klimaneutralität – Teilvorhaben B0**

**Zeitraum:**

1. Juni 2020 – 31. August 2023

# Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht.....	3
1.	Aufgabenstellung.....	3
2.	Ablauf des Vorhabens.....	3
3.	Wesentliche Ergebnisse.....	4

*Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

# **I. Kurzbericht**

## **1. Aufgabenstellung**

Seitens des DLR sollte (a) die Leitung des Arbeitspakets 7 „Sektorale Fokusanalyse Verkehrswende“, die Durchführung und Bewertung von Szenarien-Modellrechnungen zu Verkehrs- und Energienachfrage sowie Energie- und Emissionsbilanz und die Erarbeitung der dafür zugrunde gelegten Politikoptionen, die auch als sehr wichtiger Input für die gesamtsystemische Wirkungsanalyse im Arbeitspaket 2 dienen, erfolgen. Außerdem sollte (b) in Arbeitspaket 2 der Bedarf an (kritischen) Ressourcen für Energieszenarien ermittelt werden, die die Grundlage für eine ganzheitliche Folgenabschätzung der Szenarien darstellen.

## **2. Ablauf des Vorhabens**

Zu (a) wurden Untersuchungen einer Vielzahl an möglichen verkehrspolitischen Maßnahmen und verschiedenen Technologien insbesondere mittels Datenanalysen und Modellierungen, integriert in einen iterativen, wissenschaftsinformierten Deliberationsprozess mit Bürger und Bürgerinnen, getätigt. Im Verlauf des Vorhabens wurden dazu Rahmenbedingungen/ -daten bestimmt, Szenarien- und Datenkonzepte erstellt und fortlaufend adaptiert, Politikmaßnahmen ausgestaltet und Bewertungskriterien festgelegt, alles in Modelle (Flotten- und Nachfrage, Energie und Emissionen) implementiert und diverse Modellrechnungen durchgeführt. Deren Ergebnisse wurden mit Gesamtsystemmodellen gespiegelt, harmonisiert, verfeinert und validiert. Die DLR-Modelle dienten dabei als Leitmodelle. Daten wurden über eine standardisierte Datenbank ausgetauscht. Für (b) wurde einerseits eine Schnittstelle zwischen dem Integrated Assessment Model (IAM) REMIND des Projektpartners PIK und dem Tool des DLR zur Bestimmung des Rohstoffbedarfs aufgebaut, andererseits ein zeitlich und räumlich aufgelöstes europäisches Energiesystemmodell auf Basis des REMix-Frameworks für die Untersuchung des Bedarfs an Transportinfrastrukturen für Strom, Wasserstoff und Methan in emissionsfreien, integrierten Zukunftsenergiesystemen entwickelt auf verschiedene abstrahierte Szenarien zu Energieimporten und Leitungsausbau angewendet. Außerdem erfolgte eine umfassende Literaturlauswertung und Experteninterviews zur Weiterentwicklung zweier bestehender Datenbanken (1: der aktuelle und erwartete zukünftige spezifische Rohstoffbedarf von zentralen Energie- und Verkehrs-Technologien, 2: Szenarien der Entwicklung der Marktanteile von Sub-Technologien (z.B. verschiedenen Batterietypen) innerhalb einer Technologieklasse). Im Rahmen des Projektes wurden diese Datenbanken um (1) die potentiell kritischen Materialien Ag, Cd, Ce, Ga, Gd, Ge, In, Ir, K, La, Mn, Ni, Pt, S, Sc, Se, Sr, Te, V, Y, und Zr bzw. (2) Marktanteil-Szenarien

insbesondere für PV-Anlagen, CSP-Kraftwerke, fossile Kraftwerke, Kernkraftwerke, Elektrolyseure und Brennstoffzellen ergänzt bzw. aktualisiert.

### **3. Wesentliche Ergebnisse**

Zusammenfassend aus der Analyse zu Technologie- und Politikscenarien lässt sich festhalten, dass bis zum Jahr 2030 die direkte Elektrifizierung das größte Treibhausgas-(THG)-Emissionsminderungspotenzial im Verkehrssektor hat. Jedoch, die Erreichung der Ziele aus dem KSG bis 2030 wird nicht gewährleistet. Die Transformation durch eine reine Antriebswende ist eher träge. Es bedarf zusätzlicher Maßnahmen, die eine Änderung des Mobilitätsverhaltens fördern. Die tatsächlichen Wirkungen industriepolitischer Förderungen z. B. im Hinblick auf Emissionsminderungen sind über Verhalten von Verbraucherinnen und Verbrauchern vermittelt. Deshalb stellt deren Akzeptanz von weiterhin notwendigen Maßnahmen eine der größten Herausforderungen dar. Das Ziel von null THG-Emissionen im Verkehrssektor im Jahr 2045 kann erreicht werden. Voraussetzungen bilden ausreichend vorhandener grüner Strom, technologische Entwicklungen, die zu einer deutlichen Kostendegression von alternativen Antrieben führen, ein verbesserter Zugang zu Lade- bzw. Tankinfrastruktur sowie scharfe CO<sub>2</sub>-Standards und ein starkes CO<sub>2</sub>-Preis-Signal. Auch kurz- und mittelfristige Strategien zur Erreichung und Erhaltung der sektorübergreifenden Energiesouveränität können zur Annäherung an die sektoralen KSG-Ziele bis 2030 und Klimaneutralität im Jahr 2045 auszahlen.

Zusammenfassend aus der Analyse zum Bedarf an Ressourcen lässt sich festhalten, dass kurz bis mittelfristige Rohstoffengpässe je nach Szenario und Roadmap insbesondere bei Lithium, Cobalt, Nickel (genutzt in mobilen und stationären Batterien), Iridium (in Elektrolyseuren), Dysprosium (in Permanentmagneten für Elektromotoren und getriebelose Windkraftanlagen) und Vanadium (in stationären Batterien) aufgrund eines kurzfristig global schnell ansteigenden Bedarfs erwartet werden können. Der Verfügbarkeit für die Energie- und Verkehrswende geht zwar mit einem erheblichen geopolitischen Risiko einher, allerdings wird dieses überkompensiert durch den Rückgang des geopolitischen Risikos, das sich aus der Verwendung konventioneller Energieträger ergibt. Der Rohstoffbedarf und damit einhergehende Versorgungsrisiken können prinzipiell reduziert werden durch eine Erhöhung der Materialeffizienz (zwischen Mine und Endprodukt), durch eine Verlängerung der Lebensdauer von Technologien, durch die Entwicklung recycling-freundlicher Technologien und den parallelen Aufbau einer Recycling-Infrastruktur, durch Neuentwicklungen, die auf bestimmte kritische Materialien weitestgehend oder völlig verzichten (z.B. LFP-Batterien) sowie durch Effizienz- und Suffizienzmaßnahmen, die den zukünftigen Bedarf an Energie-Infrastrukturen reduzieren.