



INSTITUT FÜR ENERGIE-  
UND UMWELTFORSCHUNG  
HEIDELBERG



# Kriterienset zur Bewertung von Technologiekonfigurationen für elektrische Lkw

Heidelberg / Dresden / Berlin, Stand: 13.12.2023

## Hintergrund und Ziel

---

Im Projekt enERSyn geht es um die Bewertung von Technologien für die Energieversorgung elektrischer Lkw. Dabei soll untersucht werden, welche Technologien komplementär zur stationären (Schnell-)Ladung eingesetzt werden könnten und welche Vorteile sich durch deren Einsatz erzielen ließen. Im Fokus stehen dabei insbesondere Systeme zum dynamischen Laden während der Fahrt, sogenannte „Electric Road Systems“ (ERS).

Bisherige Forschungsarbeiten fokussierten auf den isolierten Vergleich verschiedener Energieversorgungssysteme unter standardisierten Bedingungen. Es zeigte sich dabei allerdings, dass dieser Blickwinkel nicht ausreicht, sondern eine systemische Betrachtung notwendig ist, da z.B. die Möglichkeit des dynamischen Ladens während der Fahrt Einfluss auf die nötigen Ausbaumengen stationärer Ladeinfrastruktur inkl. Netzanschlüssen und Flächenbedarfen, und damit auch auf Kosten und Ausbaugeschwindigkeit nimmt.

In enERSyn sollen daher nicht Einzeltechnologien, sondern Kombinationen verschiedener Technologiekonfigurationen (Fahrzeug + Infrastruktur) bewertet werden – zunächst in Gestalt typisierter Anwendungsfälle, später auf eine deutschlandweite Betrachtung skaliert. Ein solche Kombination könnten beispielsweise Batterie-Lkw für den Verteilerverkehr mit einem geringen Anteil an öffentlichem Schnellladen und Oberleitungs-Lkw für lange Tagesrouten mit hohem Energiebedarf sein. Die komplementären Technologiekonfigurationen sind also durch spezifische Anwendungsparameter (Reichweite, Energiezufuhr, ...) definiert. Als Grundlage für die umfassende Bewertung solcher Technologiekombinationen hinsichtlich technischer, ökonomischer, ökologischer, energiesystemischer und politischer Aspekte haben wir in einem ersten Schritt eine Bewertungsmatrix erstellt, die im weiteren Projektverlauf angewendet wird.

### Struktur der Bewertungsmatrix

Die Matrix soll der Bewertung denkbarer Kombinationen verschiedener Energieversorgungstechnologien für Lkw dienen. Grundsätzlich bedeutsame Dimensionen der Technologiebewertung lassen sich in verschiedene Cluster ordnen, die die einzelnen Kriterien zusammenfassen (→ Tabelle 1). Für jedes Kriterium wurde zusätzlich die zeitliche Relevanz eingeschätzt, die ausdrücken soll, in welchem Zeithorizont das jeweilige Kriterium von besonderer Bedeutung für die Technologiebewertung ist.

Cluster	Kriterium	Zeitliche Relevanz	
		2030	2045
Infrastrukturaufbau	1. Bedarf an Infrastrukturaufbau	X	X
	2. Investitionsvolumen	X	
	3. Ausbaugeschwindigkeit	X	
	4. Flächenbedarf	X	X
Technologie	5. Technologische Reife	X	
	6. Verfügbarkeit von Standards	X	
Nutzung	7. Nutzerakzeptanz	X	
	8. Operationeller Anpassungsbedarf	X	(X)
Energiesystem	9. Wirkung auf Stabilität des Energiesystems	(X)	X
	10. Potenzielle Flexibilität der Lastkurve	(X)	X
	11. Netzintegration	X	X
Wirtschaftlichkeit	12. Fahrzeugkosten	X	X
	13. Zu erwartende Energiekosten	X	X
Kritikalität	14. Bedarf an kritischen Rohstoffen	(X)	X
Politik	15. Entscheidungsnotwendigkeit der Politik	X	

Tabelle 1: Kriterien zur Technologiebewertung mit zeitlicher Relevanz (X: Sehr relevant, (X): Eher relevant)

Darüber hinaus gibt es einige Synthesekriterien, die sich zusammenfassend aus mehreren anderen Kriterien ergeben und übergeordnete Aspekte beschreiben (→ Tabelle 2).

Synthesekriterien	Kriterium	Zeitliche Relevanz	
		2030	2045
	A. Geschwindigkeit von Antriebswende und Emissionsminderung	X	
	B. Langfristiger Beitrag zur Klimaneutralität		X
	C. Risiken durch Pfadabhängigkeiten	X	X

Tabelle 2: Synthesekriterien mit zeitlicher Relevanz

## Bewertungsmatrix

Die folgende Struktur soll die einzelnen Bewertungskriterien genauer erläutern. Dazu wird das Kriterium zunächst motiviert und die jeweilige Fragestellung aufgezeigt. Außerdem werden Überschneidungen mit anderen Kriterien und die Quantifizierbarkeit über potentielle Indikatoren aufgeführt. Perspektivisch kann dann so für jedes Kombinationsszenario ein Steckbrief mit den Ergebnissen der Kriterienbewertung entstehen. Neben den dargestellten Punkten sollen künftig noch Informationen über Datenquellen, mögliche Ansprechpartner und die jeweilige Relevanz des Kriteriums hinzugefügt werden.

<b>Kriterium</b> 1. Bedarf an Infrastrukturaufbau		<b>Cluster</b> Infrastrukturaufbau	
<b>Motivation</b> Die Einführung elektrischer Antriebstechnologien im Schwerlastverkehr erfordert technologieunabhängig den Aufbau von öffentlicher und privater (Lade-)Infrastruktur. Die Kenntnis des konkreten Infrastrukturbedarfs ist mit Blick auf die Umsetzung eines Technologiehochlaufs und die Wirtschaftlichkeit essentiell.		<b>Fragestellung</b> Welcher Infrastrukturbedarf wird für die jeweilige Technologiekonfiguration in Abhängigkeit der Verkehrsanforderung erwartet? Welche Charakteristika weist die Infrastruktur auf (öffentlich, privat, zentral, kleinteilig, usw.)?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> 2. Investitionsvolumen 3. Ausbaugeschwindigkeit 4. Flächenbedarf 11. Netzintegration	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> Technische Mengengerüste der Infrastruktur in Abhängigkeit der Verkehrsleistung/ -menge  Migrationsaufwand in bestehenden Straßenraum	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Der konkrete Infrastrukturbedarf in Form von technologiefeinen Mengengerüsten ist anhand der Leistungsanforderungen des zu erwartenden Verkehrs modellbasiert quantifizierbar.  Die Quantifizierung des Infrastrukturbedarfs ist vor einer Modellrechnung nur als grobe Abschätzung möglich. (Lade-)Infrastruktur und Netzinfrastuktur werden in separaten Kriterien betrachtet.	

<p><b>Kriterium</b></p> <p>2. Investitionsvolumen</p>		<p><b>Cluster</b></p> <p>Infrastrukturaufbau</p>	
<p><b>Motivation</b></p> <p>Das Investitionsvolumen für die (Lade-)Infrastruktur ist ein maßgeblicher Faktor für die Umsetzung und den Ausbau von Technologien und kann eine initiale Hürde für deren Einführung darstellen.</p>		<p><b>Fragestellung</b></p> <p>Wie hoch sind die notwendigen Investitionen, um die Infrastruktur abhängig vom betrachteten Einsatzszenario zu implementieren?</p>	
<p><b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b></p> <p>1. Bedarf an Infrastrukturaufbau</p> <p>3. Ausbaugeschwindigkeit</p> <p>11. Netzintegration</p>	<p><b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b></p> <p>Spezifische Investitionskosten in Abhängigkeit der Verkehrsleistung</p>	<p><b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b></p> <p>Die infrastrukturellen Anfangsinvestitionen lassen sich in Abhängigkeit des erforderlichen spezifischen Infrastrukturbedarfs durch Berechnungsmodelle quantifizieren.</p> <p>Die Betrachtung der Lebenszykluskosten (LCC) inklusive Betriebs- und Instandhaltungskosten ist für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Technologien essentiell – dieses Kriterium adressiert zunächst nur die initialen Infrastrukturinvestitionen als Teil der LCC.</p>	

<b>Kriterium</b>		<b>Cluster</b>	
3. Ausbaugeschwindigkeit		Infrastrukturaufbau	
<b>Motivation</b>		<b>Fragestellung</b>	
Eine entsprechend hohe Ausbaugeschwindigkeit der erforderlichen (Lade-)Infrastruktur für alternative Antriebstechnologien ist eine Prämisse für die Erreichung der Klimaziele im angestrebten Zeitraum.		Wie schnell kann die benötigte Infrastruktur stufenweise unter Berücksichtigung der Erreichung der Klimaziele errichtet werden?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b>	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b>	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Bedarf an Infrastrukturaufbau</li> <li>5. Technologische Reife</li> <li>6. Verfügbarkeit von Standards</li> <li>11. Netzintegration</li> </ul>	<p>Kumulierter Zeitbedarf für die Phasen Planung, Genehmigung, Errichtung und Inbetriebnahme unter Berücksichtigung der aktuellen technologischen Reife.</p>	<p>Die Quantifizierung der Ausbaugeschwindigkeit ist lediglich in Form einer qualifizierten Abschätzung auf Basis von existierenden Erfahrungen, Herstellerangaben und Analogieschlüssen zu verwandten Technologien/Anwendungen möglich.</p> <p>Die realisierbare Ausbaugeschwindigkeit der Infrastruktur wird durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt, die hohen Unsicherheiten unterliegen (z.B. Planungs- und Genehmigungsdauer, Skaleneffekte, Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften, etc.).</p>	

<b>Kriterium</b> 4. Flächenbedarf		<b>Cluster</b> Infrastrukturaufbau	
<b>Motivation</b> Die Flächenverfügbarkeit für Infrastrukturanlagen ist begrenzt. Es ist davon auszugehen, dass technologieunabhängig ein zusätzlicher Flächenbedarf für Lade- und Netzinfrastruktur erforderlich wird. Ein zu großer Flächenbedarf kann ein Hemmnis für den Infrastrukturaufbau und somit für den Technologiehochlauf darstellen.		<b>Fragestellung</b> Wie viel zusätzlicher Flächenbedarf ist für Lade- und Netzinfrastruktur zu erwarten? Können Bestandsflächen für Energiebereitstellungsinfrastruktur (z.B. Tankstellen) genutzt werden und welcher Aufwand ist damit verbunden?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> 1. Bedarf an Infrastrukturaufbau	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> Zusätzlicher Flächenbedarf in Abhängigkeit der erwarteten Verkehrsleistung	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Zusätzlicher Flächenbedarf ist durch Kenntnis der erforderlichen (Lade-)Infrastruktur qualitativ und quantitativ abschätzbar. Der Flächenbedarf wird ab Netzanschlusspunkt betrachtet.	

<b>Kriterium</b> 5. Technologische Reife		<b>Cluster</b> Technologie	
<b>Motivation</b> Die technologische Reife ist ein entscheidender Faktor, um den Entwicklungsstand, die Funktionstüchtigkeit und die Ausrollfähigkeit einer Technologie zu beurteilen. Dabei sind insbesondere Sicherheit, Erprobungsgrad, Standardisierung, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems von Bedeutung. Darüber hinaus bildet sie die Grundlage zur Einschätzung der Marktreife entsprechender Systeme und ihrer Komponenten.		<b>Fragestellung</b> Wie hoch ist die technologische Reife und welchen Erprobungsgrad weisen die Technologien auf?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> 3. Ausbaugeschwindigkeit 6. Verfügbarkeit von Standards	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> TRL (Technology Readiness Level)	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Die technologische Reife ist semiquantitativ bewertbar. Dabei werden u.a. Normung und Standardisierung, RAMS-Kriterien, mögliche Risikofaktoren und der Erprobungsgrad berücksichtigt.	



<b>Kriterium</b> 6. Verfügbarkeit von Standards		<b>Cluster</b> Technologie	
<b>Motivation</b> Standards vereinfachen Technologieentwicklung und ermöglichen eine sichere und schnelle Einführung neuer Technologien sowie Interoperabilität.		<b>Fragestellung</b> Existieren Normen oder Spezifikationen für systemkritische Komponenten, Prozesse bzw. Schnittstellen und sind diese diskriminierungsfrei implementierbar?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> 5. Technologische Reife	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> Identifikation und Evaluierung abgeschlossener, laufender und geplanter Normungs- und Standardisierungsaktivitäten	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Eine Bewertung und Einschätzung der Normungs- und Standardisierungsaktivitäten ist vor allem qualitativ und semiquantitativ möglich.	

<b>Kriterium</b> 7. Nutzerakzeptanz		<b>Cluster</b> Nutzung	
<b>Motivation</b> Akzeptanz der Betreiber ist für einen schnellen Markthochlauf der Technologien wichtig.		<b>Fragestellung</b> Art und Grad des Anpassungsbedarfs von Logistikabläufen durch die neue Technologie	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> 8. Operationeller Anpassungsbedarf	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> Akzeptanz auf einer Skala 1-10 auf Basis existierender Nutzerbefragungen	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Qualitativ anhand von Befragungen	

<b>Kriterium</b> 8. Operationeller Anpassungsbedarf		<b>Cluster</b> Nutzung	
<b>Motivation</b> Je höher die Änderungen in den Abläufen durch die neue Technologie sind, desto geringer können die nutzerseitige Akzeptanz ausfallen und Schwierigkeiten beim Umstieg entstehen.		<b>Fragestellung</b> Was sind die Erwartungen von Lkw-Betreibern für den Umstieg auf die jeweilige Technologiekonfiguration? Wie hoch sind Bereitschaft und Skepsis für den Umstieg?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> 7. Nutzerakzeptanz	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> Maß der Abweichung von konventionellen Abläufen durch andere Tank- und Ladestrategien und Einschränkungen der Nutzlast und Dispositionsfreiheit.	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Qualitativ; Standzeiten oder Ähnlichkeit zu bestehenden Profilen könnten ggf. quantifiziert werden	

<b>Kriterium</b>		<b>Cluster</b>	
9. Wirkung auf Stabilität des Energiesystems		Energiesystem	
<b>Motivation</b>		<b>Fragestellung</b>	
<p>Verschiedene Technologien können sich positiv oder negativ auf unterschiedliche Aspekte der Energiesystemstabilität auswirken. Dies ist für die Wahrung der Versorgungssicherheit von großem Interesse. Dabei wird als Basisannahme von einem nutzerorientierten und nicht energiesystemorientierten Betrieb der Fahrzeuge ausgegangen.</p>		<p>Abschätzung, wie sich verschiedene Antriebstechnologien auf unterschiedliche Aspekte der Energiesystemstabilität auswirken?</p> <p>Von Interesse sind hier z.B. die vorzuhaltende gesicherte Erzeugungsleistung, extreme Lastgradienten, Verhalten im Fehlerfall, Systemdienstleistungen wie Regelleistung sowie Netzengpässe.</p>	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b>	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b>	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b>	
6. Verfügbarkeit von Standards	Auswirkung auf Spitzen(residual)lasten und -gradienten	Teilweise durch Stromsektormodellierung und ggf. Stromnetzmodellierung möglich; Hier soll besonders auf Wirkung eines nicht systemorientierten Betriebes betrachtet werden.	
7. Nutzerakzeptanz			
8. Operationeller Anpassungsbedarf	Auswirkung auf Bedarf sowie mögliche Bereitstellung von Regelleistung und anderen Systemdienstleistungen	Ansonsten qualitative Diskussion	
10. Flexibilität der Lastkurve			
11. Netzintegration	Auswirkung auf Häufigkeit und Schwere von Netzengpässen		

<b>Kriterium</b>		<b>Cluster</b>	
10. Potenzielle Flexibilität der Lastkurve		Energiesystem	
<b>Motivation</b>		<b>Fragestellung</b>	
Die untersuchten Technologien unterscheiden sich mit Blick auf ihre Potenziale, Strom zeitlich möglichst flexibel aus dem Netz zu beziehen. Wünschenswert ist insbesondere die Verlagerung des Strombezugs in Stunden, in denen es ein großes Angebot fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung gibt.		Abschätzung des Potenzials verschiedener Technologien, den Strombezug in Stunden zu verlagern, in denen es ein großes Angebot fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung und damit niedrige Großhandels-Strompreise gibt.  Ggf. auch, inwiefern sich verschiedene Technologien perspektivisch zusätzlich für eine Rückspeisung ins Netz eignen könnten (Vehicle-to-Grid).	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b>	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b>	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b>	
5. TRL	Last- und Residuallast-Kurven (v.a. Extremwerte)	Quantifizierung maximaler Lastverschiebungsmöglichkeiten in gegebenen Stunden	
6. Verfügbarkeit von Standards	Differenzen der Lastzeitreihen	Systemeffekte der Lastverschiebung quantifizierbar durch Stromsektormodellierung	
7. Nutzerakzeptanz	Änderung des Bedarfs an anderen Flexibilitätsoptionen im Stromsektor		
8. Operationeller Anpassungsbedarf	Ggf. Senkung der Gesamtkosten des Stromsektors ggü. unflexibler Referenz		
9. Wirkung auf Stabilität des Energiesystems			
11. Netzintegration			
13. Zu erwartende Energiekosten			

<p><b>Kriterium</b></p> <p>11. Netzintegration</p>		<p><b>Cluster</b></p> <p>Energiesystem</p>	
<p><b>Motivation</b></p> <p>Für einen Technologie-Rollout ist es essentiell, dass die vorgelagerten Energienetzstrukturen auf Verteilnetzebene (Mittel- und Hochspannung) die verkehrlichen Leistungsanforderungen zuverlässig erfüllen können. Die Integration der Ladeinfrastruktur in die Stromnetze ist dabei aufgrund langer Planungs- und Realisierungszeiträume für den Netzausbau als eine zentrale Herausforderung für den Hochlauf anzusehen.</p>		<p><b>Fragestellung</b></p> <p>Wie kann die technische Migration der Ladeinfrastruktur in die vorgelagerten Energienetzstrukturen realisiert werden? Welcher Aufwand ist für die Netzintegration hinsichtlich Netzverstärkungen und Netzausbau zu erwarten? Wodurch ist eine Minderung der erforderlichen Netzanschlussleistung realisierbar?</p>	
<p><b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1. Bedarf an Infrastrukturaufbau</li> <li>2. Investitionsvolumen</li> <li>3. Ausbaugeschwindigkeit</li> <li>9. Wirkung auf Stabilität des Energiesystems</li> <li>10. Flexibilität der Lastkurve</li> </ul>	<p><b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b></p> <p>Leistungsanforderung pro (Netz-)Anschluss                  Analyse bestehender Energienetzstrukturen                  Mögliche und erforderliche Netzausbaumaßnahmen</p>	<p><b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b></p> <p>Semiquantitative Abschätzung der erforderlichen Netzintegrationsmaßnahmen und qualitative Diskussion. Quantitative Analyse ist anhand konkreter Fallbeispiele möglich.</p> <p>Die Kenntnis über bestehende Verteilnetzstrukturen setzt eine Abstimmung mit Netzbetreibern voraus. Die Randbedingungen variieren standortabhängig stark.</p>	

<p><b>Kriterium</b></p> <p>12. Fahrzeugkosten</p>	<p><b>Cluster</b></p> <p>Wirtschaftlichkeit</p>	
<p><b>Motivation</b></p> <p>Die nutzerseitige Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge ist eine wesentliche Voraussetzung für einen Technologiehochlauf und eine entsprechende Marktdurchdringung. Die Berücksichtigung der Anschaffungs-, Betriebs- und Instandhaltungskosten der Fahrzeuge ist bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen essentiell.</p>	<p><b>Fragestellung</b></p> <p>Welche Kosten fallen über den Fahrzeuglebenszyklus auf Nutzerseite an?</p>	
<p><b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b></p> <p>7. Nutzerakzeptanz</p> <p>13. Zu erwartende Energiekosten</p>	<p><b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b></p> <p>Anschaffungskosten, spezifische Betriebs- und Instandhaltungskosten</p>	<p><b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b></p> <p>Quantifizierbar durch Vollkostenbetrachtung.</p> <p>Vertiefende Betrachtung der Energiekosten als sensitiven Parameter der TCO-Berechnung in Krit. 13.</p>

<p><b>Kriterium</b></p> <p>13. Zu erwartende Energiekosten</p>	<p><b>Cluster</b></p> <p>Wirtschaftlichkeit</p>	
<p><b>Motivation</b></p> <p>Die Energiekosten sind ein wesentlicher Teil der TCO der Lkw und somit ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugbetriebs.</p>	<p><b>Fragestellung</b></p> <p>Die Großhandels-Preisbestandteile des Ladestroms hängen davon ab, in welchen Stunden welche Menge an Ladestrom bezogen wird, und damit von der Lastkurve. Welche Unterschiede bestehen also zwischen den Technologien mit Fokus auf Großhandels-Preisbestandteile?</p> <p>Mögliche Erweiterung: Potenzial zur Senkung der Energiekosten durch PV-Eigenerzeugung (Prosumer).</p>	
<p><b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b></p> <p>7. Nutzerakzeptanz</p> <p>8. Operationeller Anpassungsbedarf</p> <p>10. Flexibilität der Lastkurve</p> <p>11. Netzintegration</p> <p>12. Fahrzeugkosten</p>	<p><b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b></p> <p>Energiesystem-Differenzkosten</p> <p>Alternativ oder ggf. komplementär Betrachtung von Ladestrom-Großhandelspreisen</p>	<p><b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b></p> <p>Möglich durch Stromsektormodellierung</p>

<b>Kriterium</b>		<b>Cluster</b>	
14. Bedarf an kritischen Rohstoffen		Nachhaltigkeit	
<b>Motivation</b>		<b>Fragestellung</b>	
Die Energiekosten sind ein wesentlicher Teil der TCO der Lkw und somit ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugbetriebs.		Mit welchem Bedarf an kritischen Rohstoffen ist die Technologie verbunden? Wie viel Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit und Kupfer werden für Infrastruktur und Fahrzeuge benötigt?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b>	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b>	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b>	
1. Bedarf an Infrastrukturaufbau	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rohstoffbedarf pro Fzg.-km, gewichtet mit der</li> <li>2. Kritikalität der Rohstoffe: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abbaukapazitäten</li> <li>- Konzentration der Produktion</li> <li>- Primärmaterialbedarf</li> <li>- Nachfragewachstum</li> </ul> </li> </ol>	Quantitativ (basierend auf bekanntem Materialbedarf der Technologien und existierenden Einschätzungen / Metriken zur Kritikalität)	



<b>Kriterium</b>		<b>Cluster</b>	
15. Entscheidungsnotwendigkeit der Politik		Politik	
<b>Motivation</b>		<b>Fragestellung</b>	
Entscheidungsbereitschaft- und Notwendigkeit auf politischer Ebene beeinflussen das Handeln privater Akteure und die Geschwindigkeit der Antriebswende.		Wie sehr ist der Roll-Out der Technologie abhängig von staatlichen Entscheidungen? Wie stark muss in der Markteinführungsphase staatlich gefördert und subventioniert werden? Wie sehr beeinflusst die staatliche Entscheidungsnotwendigkeit die Risikoabschätzung der Akteure?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b>	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b>	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b>	
3. Investitionsvolumen	Einordnung der Technologiekonfigurationen hinsichtlich der Entscheidungsnotwendigkeit.	Nur qualitativ anhand der erforderlichen Einzelentscheidungen	

Die Ergebnisse dieser 15 Kriterien sollen in drei übergeordneten Synthesekriterien zusammengefasst werden:

Kriterium	Cluster	
A. Geschwindigkeit von Antriebswende und Emissionsminderung	Synthese	
<b>Motivation</b> Eine schnelle Antriebswende hat den größten Hebel für Emissionseinsparungen.	<b>Fragestellung</b> Wie hoch sind die aus den Einzelkriterien ableitbare technologiespezifische Hochlaufgeschwindigkeit und kurzfristige Emissionsminderung? Wie schnell ist die Einbindung der jeweiligen Technologie in bestehende Regularien möglich (z.B. EU ZEV Regulierung)?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bedarf an Infrastrukturaufbau</li> <li>2. Investitionsvolumen</li> <li>3. Ausbaugeschwindigkeit</li> <li>4. Flächenbedarf</li> <li>5. Technologische Reife</li> <li>6. Verfügbarkeit von Standards</li> <li>7. Nutzerakzeptanz</li> <li>8. Operationeller Anpassungsbedarf</li> <li>11. Netzintegration</li> <li>12. Fahrzeugkosten</li> <li>13. zu erwartende Energiekosten</li> </ol>	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> CO <sub>2</sub> -Äq./km der jeweiligen Technologiekombination im Status Quo Voraussichtlich realisierbare Flottengröße innerhalb eines gegebenen Zeitraums	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Teilweise möglich über THG- und Flottenabschätzung. Ansonsten qualitative Zusammenführung der Kriterien mit ihrer jeweiligen Wechselwirkung.

<b>Kriterium</b> B. Langfristiger Beitrag zur Klimaneutralität		<b>Cluster</b> Synthese	
<b>Motivation</b> Technologieentscheidungen können das Langfristziel der Klimaneutralität stark beeinflussen.		<b>Fragestellung</b> Ist die jeweilige Technologiekombination für das Ziel der Klimaneutralität 2045 geeignet? Sind Fahrzeuge und Infrastruktur national und darüber hinaus skalierbar? Können die Vorketten der Fahrzeuge und der Energie vollständig dekarbonisiert werden? Wie sehr tragen die einzelnen Technologiekombinationen zu einem dekarbonisierten Technologieportfolio bei?	
<b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b> 4. Flächenbedarf 9. Wirkung auf Stabilität des Energiesystems 10. Flexibilität der Lastkurve 12. Fahrzeugkosten 13. zu erwartende Energiekosten 14. kritische Rohstoffe	<b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b> CO <sub>2</sub> -Äq./km langfristig (inklusive Fahrzeugherstellung, -entsorgung und Energiebereitstellung) Globale Skalierbarkeit der Technologiekombination?	<b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b> Teilweise quantifizierbar. Ansonsten qualitative Zusammenführung der vielen Kriterien unter Berücksichtigung der jeweiligen Wechselwirkung.	

<p><b>Kriterium</b></p> <p>C. Risiken durch Pfadabhängigkeiten</p>	<p><b>Cluster</b></p> <p>Synthese</p>	
<p><b>Motivation</b></p> <p>Pfadabhängigkeiten können die Durchsetzung systemisch sinnvoller Technologien verzögern oder verhindern.</p>	<p><b>Fragestellung</b></p> <p>Bestehen technologische, regulatorische, institutionelle, finanzielle, energiesystemische oder mentale Pfadabhängigkeiten, die die Einführung der Technologiekombinationen erschweren oder welche, die sich durch sie ergeben?</p>	
<p><b>Überschneidungen und Wechselwirkungen mit anderen Kriterien</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bedarf an Infrastrukturaufbau</li> <li>2. Investitionsvolumen</li> <li>3. Ausbaugeschwindigkeit</li> <li>5. Technologische Reife</li> <li>6. Verfügbarkeit von Standards</li> <li>7. Nutzerakzeptanz</li> <li>8. Operationeller Anpassungsbedarf</li> <li>11. Netzintegration</li> <li>15. Entscheidungsnotwendigkeit der Politik</li> </ol>	<p><b>Indikatoren und Bezugsgrößen</b></p> <p>Keine</p>	<p><b>Quantifizierbarkeit und Einschränkungen</b></p> <p>Nur qualitativ möglich, eventuell Indikatorwerte aus den überschneidenden Kriterien.</p>