



Thüringer Energieagentur, ThEGA

# Realdaten der emissionsfreien Thüringer Bus-Flotte

Analyse und Einordnung auf der Datenbasis von Ende 2024

**Autor:**

Matthias Schlegel (ThEGA)

**Mitwirkende:**

Maria Ehrich (ThEGA)

Rico Hofmann (ThEGA)

Anika Winkelhöfer (TMUENF)

Eric Zimmermann (TMUENF)

**Dokumentenversion:**

Dezember 2025



## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung .....	2
2. Zielbild und Ausgangslage .....	4
3. Tabellarischer Vergleich der Antriebsarten .....	4
4. Vergleichsgrafiken (Richtwerte) .....	5
5. Auswertung .....	6
5.1. Kostenentwicklung .....	7
5.2. Realer Energieverbrauch .....	8
5.3. Energiekosten .....	8
5.4. Haltbarkeit .....	9
5.5. Verbrauch Heizung .....	10
5.6. Verbrauch Kühlung .....	10
5.7. Reichweite .....	11
5.8. Schulung & Qualifikation: .....	11
5.9. Wartungskosten / Bremsverschleiß .....	11
5.10. Systemwirkungsgrad .....	12
6. Fazit .....	13
7. Quellen .....	14
Anlage 1: Chemische Zusatzheizungen in Elektrobus-Systemen .....	16
Anlage 2: Wartungskostenvergleich – E-Bus vs. Diesel (Thüringen 2024) .....	17
Anlage 3: Versicherung von batterieelektrischen Bussen: Die Praxis .....	18
Anlage 4: Hintergrund zur Lebensdauer von Brennstoffzellen .....	19

## 1. Zusammenfassung

Grundlage für die vorliegenden Auswertungen ist das Landesförderprogramm „CO<sub>2</sub>-arme Mobilität – Modellprojekt Elektrobussysteme in Thüringen“, das vom Thüringer Umweltministerium bis Ende 2023 umgesetzt wurde. Es unterstützte die Einführung von batterieelektrischen und wasserstoffbasierten Bussen, die zugehörige Lade- und Tankinfrastruktur sowie die Absicherung von Wartung und Reparatur in den Depots.

Die Auswertung der Betriebserfahrungen zeigt deutlich: Batterieelektrische Busse sind derzeit die wirtschaftlich tragfähigste emissionsfreie Lösung im öffentlichen Nahverkehr. Sie verursachen im Vergleich zum Diesel signifikant geringere Energie- und Wartungskosten und haben sich im thüringischen Linienbetrieb als zuverlässig und betrieblich gut integrierbar erwiesen. In den untersuchten Unternehmen konnten die geplanten Strecken mit den geförderten Bussen in der Regel problemlos bedient werden. Auch bei Fahrgästen und Fahrpersonal stoßen die Fahrzeuge auf Akzeptanz.

Ein Sonderfall ist das Wasserstoffbusprojekt in Weimar, das einzige seiner Art in Thüringen. Dort wurden 2023 drei Brennstoffzellenbusse in Betrieb genommen, flankiert von einer eigenen Wasserstofftankstelle und einer Wasserstoffwerkstatt für die notwendigen Wartungs- und Reparaturarbeiten auf dem Betriebshof. Dieses Projekt liefert wichtige Praxiserfahrungen zum Einsatz von Wasserstoff im Nahverkehr. Wasserstoffbetriebene Busse zeigen in Weimar, dass sie für bestimmte Spezialanwendungen – etwa bei langen Umläufen ohne Lademöglichkeit – eine Option sein können sind. Gleichzeitig liegen ihre laufenden Kosten derzeit deutlich über denen batterieelektrischer Fahrzeuge. Die technische Komplexität, der höhere Wartungsaufwand und die notwendige H<sub>2</sub>-Infrastruktur stellen zusätzliche Herausforderungen dar. Ein wirtschaftlich tragfähiger Einsatz setzt stabile Rahmenbedingungen, gesicherte Ersatzteil- und Serviceketten sowie eine sichere Versorgung mit grünem Wasserstoff voraus.

Der Gesamtaufwand (Total Cost of Ownership, TCO) für Dieselbusse bleibt ohne Förderung aktuell noch am geringsten – vor allem wegen der niedrigeren Anschaffungskosten. Bei den Betriebskosten schneiden Dieselbusse jedoch mittlerweile deutlich schlechter ab als batterieelektrische Fahrzeuge. Der Kostenvorteil beim TCO schrumpft mit jeder Investitionsförderung und jeder realen Einpreisung externer Umweltkosten.

Neben der technischen Leistungsfähigkeit spielt die soziale Einbindung eine wesentliche Rolle. Für Fahrdienst und Werkstatt sind gezielte Schulungen (Hochvolt, Fahrdynamik, Störfallabläufe) notwendig. Rückmeldungen zeigen eine hohe Akzeptanz der neuen Technologien bei Fahrpersonal und Passagieren, verweisen aber auch auf Mehrbedarf an



Qualifizierung und die Berücksichtigung von Ladezeiten in der Umlauf- und Pausenplanung.

Die Erfahrungen zeigen somit ein klares Bild: Batterieelektrische Busse sind im Regelbetrieb wirtschaftlich tragfähig und emissionsfrei einsetzbar. Wasserstoffbusse können punktuell sinnvoll ergänzt werden, sind aber derzeit nicht wettbewerbsfähig im breiten Linienbetrieb. Diesel bleibt – ohne Berücksichtigung seiner Umweltwirkungen – kurzfristig günstiger, aber langfristig nicht zukunftsfähig. Eine erfolgreiche Transformation erfordert weiterhin verlässliche politische Leitplanken, gezielte Förderung und betriebliche Planungssicherheit.

## 2. Zielbild und Ausgangslage

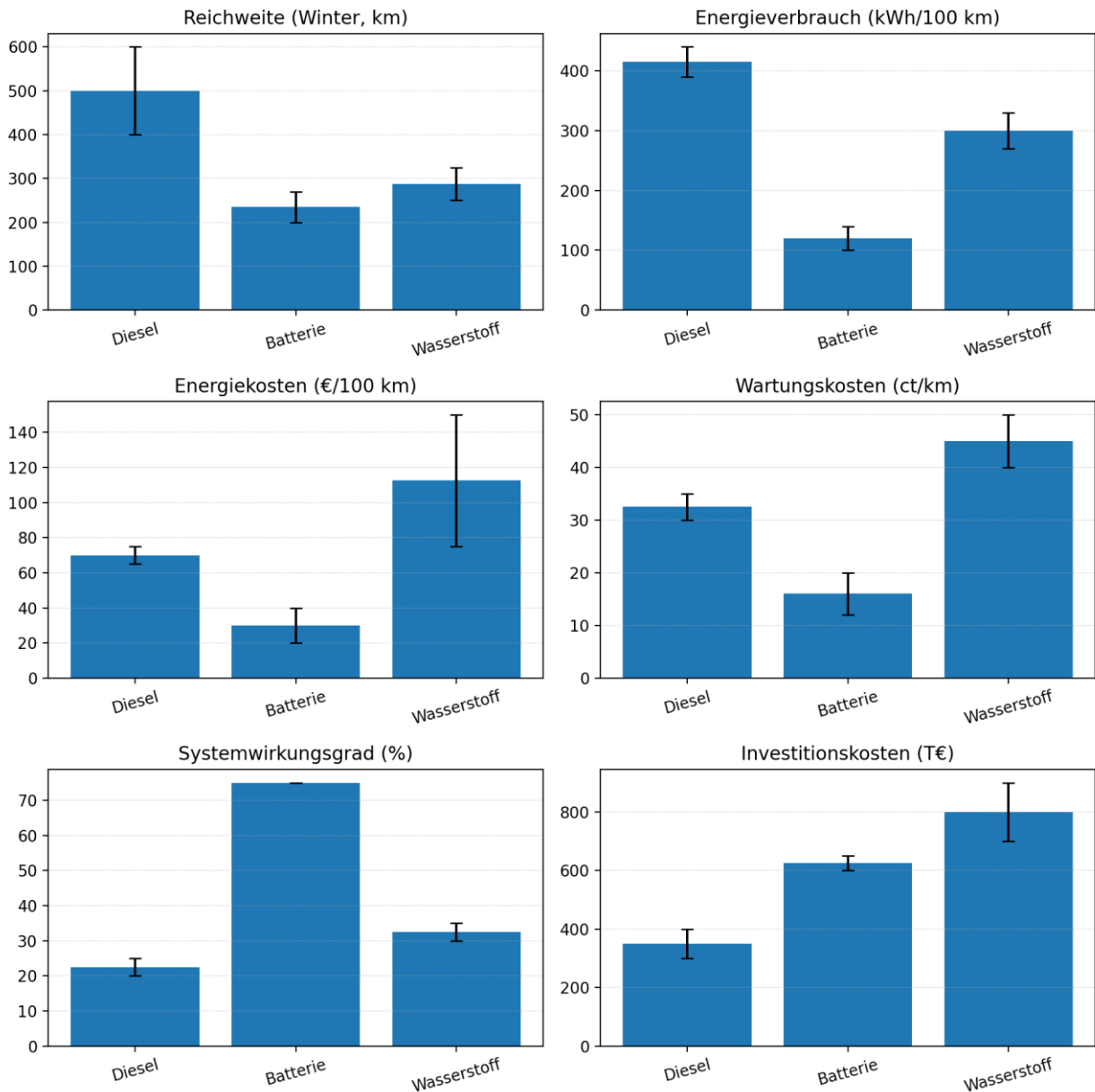
Das Thüringer Umweltministerium hat bis Ende 2023 insgesamt 32 emissionsfreie Busse gefördert. Für diese liegen für das Jahr 2024 nun entsprechende reale Verbrauchsdaten vor (vgl. ThEGA 2025). Diese werden in diesem Dokument zusammengefasst vorgestellt, um eine realistische Grundlage für die weitere Flottenplanung zu liefern. Ergänzt wurden diese, wo notwendig um Daten aus überregionalen Studien.

## 3. Tabellarischer Vergleich der Antriebsarten

	Diesel	Batterie	Wasserstoff
<b>Reichweite (Werte aus Thüringen, Winter)</b>	400–600 km	200–270 km (Solo), 150–200 km (Midi)	250 bis 325 km
<b>Durchschnittlicher Energieverbr. / 100 km</b>	390 –440 kWh (40 – 45 l)	100 - 140 kWh	270 – 330 kWh (8-10 l)
<b>Energiekosten / 100 km</b>	65–75 €	20 /40 € (mit/ohne PV, Depotladung)	> 75 €, je nach H <sub>2</sub> - Preis
<b>Wartungskosten / km</b>	Mittel > 30 ct	Niedrig < 20 ct (oft <15 ct)	Hoch >40 ct
<b>Systemwirkungsgrad</b>	20–25 %	ca. 75 %	ca. 30–35 %
<b>Lebensdauer</b>	Motor: 12 Jahre; 1–1,2 Mio. km	Batterie: 8–12 Jahre; 600 -1.000 tkm	Brennstoffzelle: 4-10 Jahre; 10.000 - 25.000 h
<b>Investitionskosten</b>	300–400 T€	600–650 T€ (Solo), 450–580 T€ (Midi)	700–900 T€
<b>Betriebskosten</b> (s. Kapitel 4.9)	mittel	niedrig	hoch
<b>CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Betrieb</b>	hoch	null*	null*
<b>Herausforderungen</b>	Emissionen	Ladeinfrastruktur, Heizung	Technik, H <sub>2</sub> -Preis, Ersatzteile
<b>Einsatzempfehlung</b>	flexibel	Stadt/Umland	lange Umläufe, Nischen
<b>Akzeptanz</b>	etabliert	hoch	verhalten positiv

#### 4. Vergleichsgrafiken (Richtwerte)

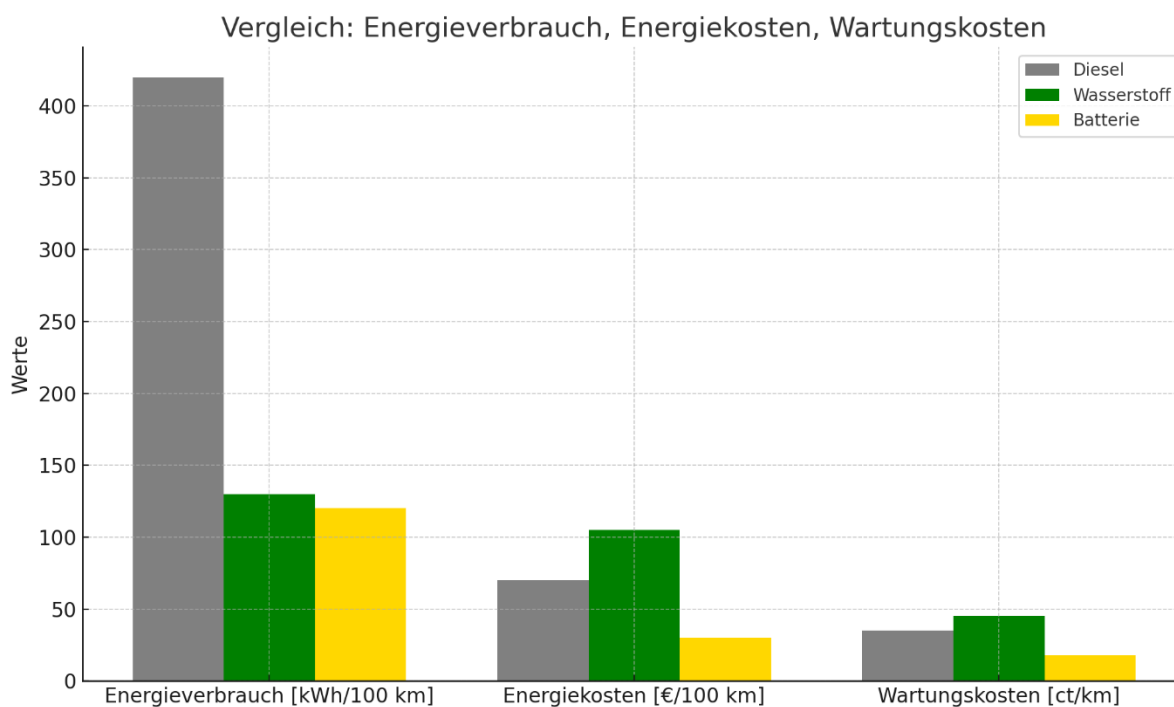
Vergleich zentraler Kennzahlen (Thüringen 2024, Richtwerte)



Hinweis: Balken zeigen Mittelwerte; Fehlerbalken zeigen die Spannweiten aus dem tabellarischen Vergleich (bzw. plausible Range bei H<sub>2</sub>/Wartungskosten).

\*Hinweis: „null“ bezieht sich hier auf Tank-zu-Rad. Für die Erreichung der Minderungsziele ist eine Quelle-zu-Rad-Betrachtung maßgeblich, inkl. Strommix bzw. H<sub>2</sub>-Herkunft. Szenarien mit steigendem EE-Anteil ermöglichen deutlichere Treibhausgas-Minderungen (vgl. BMWK 2024). In

den Thüringer Projekten ist Grüner Strom/Wasserstoff deshalb Voraussetzung für eine Förderung.



## 5. Auswertung

Im Folgenden werden häufig diskutierte Fragen zu emissionsfreien Fahrzeugen anhand realer Betriebsdaten aufgezeigt. Dabei wurde auf Basis der Thüringer Daten auch Erfahrungsberichte von Busunternehmen aus anderen Bundesländern und unabhängige Tests ergänzend herangezogen, um die Aussagekraft zu erhöhen.

## Betrachtete Kriterien

Für eine fundierte Bewertung der emissionsfreien Bus-Systeme wurden die folgenden Kriterien herangezogen: Kostenentwicklung, realer Energieverbrauch, Energiekosten, Haltbarkeit, Verbrauch für Heizung und Kühlung, Reichweite, Wartungsaufwand und Systemwirkungsgrad.

### 5.1. Kostenentwicklung

Die Kostenentwicklung stellt für Verkehrsunternehmen eine zentrale Entscheidungsgrundlage dar. Die nachfolgenden Daten und Trends basieren auf realen Angaben aus Thüringen und spiegeln sowohl Marktentwicklungen als auch die Erfahrungen geförderter Betriebe wider:

Die Gesamtkosten für emissionsfreie Busse setzen sich aus Anschaffungskosten, Betriebskosten (Strom, Wartung) sowie Infrastrukturkosten zusammen. In den vergangenen Jahren ist eine klare Tendenz erkennbar:

- Die **Anschaffungskosten** für batterieelektrische Solobusse lagen 2020 noch bei über 700.000 €, sind jedoch bis 2023 auf 600.000–650.000 € **gesunken**. Midibusse liegen je nach Ausführung zwischen 450.000 € und 580.000 €.
- Die durchschnittlichen **Investitionen** für Netzanschluss und Ladeinfrastruktur liegen bei Depotladung in Thüringen je nach Ladeleistung zwischen **25.000 und 45.000 € pro Fahrzeug**. Bei Schnelladelösungen mit Pantographen an Endhaltestellen steigen die Infrastrukturkosten je Ladepunkt auf ca. 160.000 €. In Thüringen wird überwiegend auf Depotladung gesetzt. Endhaltestellenladeinfrastruktur – etwa in Form von Pantographen – wurde bislang nur vereinzelt eingerichtet, da sie mit höheren technischen und finanziellen Anforderungen verbunden ist.
- Die **Betriebskosten** sind bei E-Bussen tendenziell **niedriger** als bei Dieseln, insbesondere durch **reduzierte Wartung** und **niedrigere Energiekosten** je km. Details dazu unter den Gliederungspunkten 4.3. (Energiekosten) und 4.8. (Wartungskosten)

Zum Thema Versicherung von E-Bussen siehe Anlage 3.

- Investitions-Förderprogramme auf Landes- und Bundesebene (z. B. über BMDV, EFRE) haben entscheidend zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beigetragen. Diese werden zum Ausgleich der Mehrkosten in den nächsten ca. 7 Jahren auch weiter notwendig sein.

- Die Investitionskosten für Wasserstoffbusse liegen aktuell bei 780.000–850.000 €, in Einzelfällen auch höher. Hinzu kommen Infrastrukturkosten (1–3 Mio. € pro Tankstelle) und hohe laufende Energiekosten. Thüringer Erfahrungen stützen diese Einschätzung bislang, aber nur auf kleiner Datenbasis.

Insgesamt zeigt sich: Während die Investitionskosten für Batteriebusse nach wie vor höher sind als bei Dieseln, sinkt die Differenz kontinuierlich. Gleichzeitig nähern sich die Gesamtkosten über die Lebensdauer einander an – insbesondere bei höherer Laufleistung.

## 5.2. Realer Energieverbrauch

**E-Busse:** Die real gemessenen Energieverbräuche der Thüringer E-Busse liegen im Durchschnitt bei rund **120 kWh/100 km**. Dieser Mittelwert berücksichtigt sowohl Solo- als auch Midibusse und reflektiert realistische Einsatzbedingungen inklusive Heizung und Fahrgastwechsel. Die Spanne lag in der Auswertung der Betreiberdaten zwischen 100 und 140 kWh/100 km. In nationalen Studien (vgl. *BMWK 2024*) werden ähnliche Werte bestätigt.

Zum Vergleich Dieseln (Richtwert): 40–45 l/100 km (vgl. Tabelle „Tabellarischer Vergleich der Antriebsarten“).

### Wasserstoffbetriebene Busse (Solaris Urbino 12 hydrogen, Thüringen):

Der Wasserstoffverbrauch liegt bei 8–10 kg H<sub>2</sub> je 100 km. Das entspricht etwa **270–330 kWh** pro 100 km (vgl. *BMWK 2024; NREL 2025*.)

## 5.3. Energiekosten

Antrieb	Energiepreis (Richtwert)	Verbrauch (Richtwert)	Kosten je 100 km (Richtwert)
Dieseln	ca. 1,70 €/l	40-45 l/100 km	ca. 65-75 €
E-Bus	ca. 0,20-0,30 €/kWh	100-140 kWh/100 km	ca. 20-40 €
H <sub>2</sub> -Bus	abhängig vom H <sub>2</sub> - Preis (kg)	8-10 kg H <sub>2</sub> /100 km	ca. 60-150 €

Die Bandbreiten ergeben sich u.a. aus Strombeschaffung (Direktvertrag/Spot), Netzegebühren/Leistungspreisen sowie der Frage, ob Depotstrom teilweise über PV/Speicher bereitgestellt werden kann.



Antrieb	Energiepreis (Richtwert)	Verbrauch (Richtwert)	Kosten je 100 km (Richtwert)
Dieselbus	ca. 1,70 €/l	40-45 l/100 km	ca. 65-75 €
E-Bus	ca. 0,20-0,30 €/kWh	100-140 kWh/100 km	ca. 20-40 €
H2-Bus	abhängig vom H2- Preis (kg)	8-10 kg H2/100 km	ca. 60-150 €

Die Bandbreiten ergeben sich u.a. aus Strombeschaffung (Direktvertrag/Spot),  
Netzgebühren/Leistungspreisen sowie der Frage, ob Depotstrom teilweise über PV/Speicher bereitgestellt  
werden kann.

**E-Busse: Durchschnittlicher Strompreis Thüringen: 0,25 €/kWh, Kosten pro 100 km:**  
ca. 30 €

Die Stromkosten hängen stark von lokalen Netzgebühren, Ladezeiten und Verträgen ab.  
Im Durchschnitt wird in Thüringen mit etwa 0,25 €/kWh gerechnet. Daraus ergeben sich  
Energieverbrauchskosten von rund **30 €/100 km**. In Einzelfällen wurden auch Werte von  
unter 0,20 €/kWh (durch Nachtladung oder Direktverträge) gemeldet.

Zum Vergleich: Dieselbusse verursachen im gleichen Verbrauchsspektrum Kosten von  
ca. 65–75 €/100 km, abhängig vom Dieselpreis (angenommen 1,70 €/l) und Verbrauch  
(40–45 l/100 km).

**Wasserstoffbusse** verursachen Energiekosten von rund **60–150 €/100 km** (je nach H<sub>2</sub>-  
Preis von 8–15 €/kg und Verbrauch von 8–10 kg/100 km). Diese Kosten liegen damit  
deutlich über denen batterieelektrischer oder dieselbetriebener Fahrzeuge.

## 5.4. Haltbarkeit

**Batterien:** Bisherige Zyklenzahl in Thüringen: < 2.000

**Geplante Lebensdauer:** 6-8 Jahre, 4.000 Zyklen, **Wahrscheinliche Lebensdauer:** 8–12  
Jahre (bei einer minimalen Restkapazität von 70%)

Die bisher eingesetzten Batteriesysteme in Thüringen zeigen nach mehreren Jahren  
Betrieb nur moderate Degradationen. Die Ladezyklenzahl liegt bei den analysierten  
Fahrzeugen bisher unter 2.000, bei normaler Nutzung wird eine Haltbarkeit von

mindestens 8–10 Jahren erreicht. Nach Angaben mehrerer Hersteller liegt der Zielwert aktuell bei bis zu 4.000 Vollzyklen oder rund 12 Jahren Lebensdauer.

### **Brennstoffzellen ([Siehe auch Anlage 6](#)):**

Bei Wasserstoffbussen wird die Lebensdauer der Brennstoffzelle von Herstellern mit 10.000 bis 25.000 Betriebsstunden angegeben. Feldberichte (vgl. *Ballard 2025; CHJU 2024; JIVE2 2025; NREL 2025*) deuten auf realistisch erreichbare Nutzungsdauern von 4–8 Jahren hin. In Thüringen liegen hierzu noch keine Langzeiterfahrungen vor.

## **5.5. Verbrauch Heizung**

**Zusätzlicher Verbrauch im Winter:** +20 % bis +35 %

**Alternative Systeme:** chemische Zusatzheizung reduziert Batteriebelastung

Zum Vergleich Dieselbus: Heizwärme wird im Fahrbetrieb überwiegend aus Motorabwärme bereitgestellt; ein zusätzlicher Kraftstoff-Mehrverbrauch ist i.d.R. gering. Bei Stand-/Vorwämbetrieb können Zuheizer/Standheizungen je nach System ca. 0,16–0,49 l/h Diesel benötigen (Herstellerangaben, vgl. Eberspächer 2023).

Die Heizung (insbesondere im Winter) erhöht den Energieverbrauch deutlich. Bei rein elektrischer Heizung liegt der Mehrverbrauch laut Thüringer Betriebserfahrungen zwischen 20 % und 35 %. Fahrzeuge mit chemischer Zusatzheizung (z. B. Diesel oder Ethanol) zeigen so geringere zusätzliche Lasten auf die Traktionsbatterie.

Die in Thüringen eingesetzten **Wasserstoffbusse** nutzen rein elektrische Heizsysteme mit Wärmepumpenunterstützung. Die zusätzlichen Verbräuche entsprechen denen batterieelektrischer Busse mit rein elektrischer Heizung (siehe voriger Absatz).

## **5.6. Verbrauch Kühlung**

**Zusätzlicher Verbrauch im Sommer:** +5 % bis +10 %

Zum Vergleich Dieselbus: Die Klimaanlage kann den Kraftstoffverbrauch je nach Außentemperatur und Fahrprofil typischerweise um ca. 5–20 % erhöhen (vgl. Liu et al. 2019).

Auch die Klimatisierung im Sommer trägt zum Energiebedarf bei, allerdings in geringerem Maße. Typisch sind laut Auswertung der Thüringer Monitoringdaten Mehrverbräuche zwischen 5 und 10 % in heißen Perioden. Diese decken sich mit Angaben aus anderen Bundesländern.

## 5.7. Reichweite

**Reale Reichweite E-Midibusse:** 150–200 km

**Reale Reichweite E-Solobusse:** 200–270 km

Zum Vergleich Dieselbus (Richtwert): 400–600 km pro Tankfüllung (typischerweise Tankvolumen ca. 150 l; vgl. VDV 2023).

**200 km sind meist ausreichend** für den Tagesumlauf, alternativ hierzu könnten Zwischenlademöglichkeiten an Endhaltestellen errichtet werden. Neuere Modelle haben optional größere Batterien.

Die reale Reichweite liegt bei E-Midibussen in Thüringen überwiegend zwischen 150 und 200 km, bei E-Solobussen zwischen 200 und 270 km. In optimalen Bedingungen (flaches Terrain, moderate Temperaturen, sanfte Fahrweise) wurden auch über 300 km pro Ladung erzielt. Im Mittel ist eine Planung mit 200–240 km realistisch. Dies ermöglicht in vielen Fällen den Tagesumlauf ohne Zwischenladung. Neuere Busse haben optional noch deutlich höhere Reichweiten durch zusätzliche Batteriemodule.

Die in Thüringen eingesetzten **Wasserstoffbusse** Solaris Urbino 12 hydrogen erreichen Reichweiten von bis zu 325 km. Im Winter ca. 20% - 35% weniger. Ein Zwischentanken ist im Tagesverlauf nicht vorgesehen, da dies logistisch und zeitlich aufwendig ist.

## 5.8. Schulung & Qualifikation:

Hochvoltschulungen, Schulungen zu sicheren Abschalt-/Rettungsprozeduren und Software-/Diagnosekompetenz sind bereits Standard. Die **Akzeptanz** im Fahrdienst ist **überwiegend positiv**; Testfahrten und transparente Kommunikation unterstützen den Kulturwandel (vgl. BMWK 2024).

**Ladefenster** und **Temperierung** (Vorkonditionierung) wirken sich auf Schicht- und Pausenlagen aus, dies ist in **Diensteinteilungen** mitzudenken (vgl. BMWK 2024). E-Busse fahren sich teils anders (Gewichtsverteilung/ Kopflastigkeit). Die Schulung des Fahrpersonals auf die neuen Fahrzeuge reduziert hier Fehlbelastungen und Zwischenfälle (vgl. *ThEGA 2025*).

## 5.9. Wartungskosten / Bremsverschleiß

**Thüringer Durchschnittskosten E-Bus:** < 0,20 €/km, **Einzelfälle (günstig):** < 0,15 €/km

Zum Vergleich Dieselbus (Thüringen 2024): > 0,30 €/km (siehe Anlage 2).

**Wasserstoffbus-Vergleich:** Thüringer Daten fehlen noch, Erfahrungswerte aus Nordrhein-Westfalen und internationalen Projekten liegen bei 0,35–0,50 €/km. Häufig genannte Kostentreiber: Ersatzteilversorgung, Kühlkomponenten, Kompressoren und Stack-Degradation (vgl. *BBH 2021, NREL 2023, [siehe auch Anlage 2](#)*).

E-Busse verursachen geringere Wartungskosten, da Ölwechsel, Auspuffsysteme und Getriebe entfallen. Auch der Bremsverschleiß ist durch Rekuperation deutlich reduziert. Thüringer Betreiber berichten von Wartungskosten unter 0,20 €/km, in Einzelfällen sogar unter 0,15 €/km. Vergleichbare Dieselsebusse liegen häufig bei über 0,30 €/km.

Insbesondere beim Bremsverschleiß zeigen sich große Vorteile: Durch die Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation) über den Motor verlängert sich die Lebensdauer der Bremsen teils erheblich. Thüringer Betreiber berichten von verdoppelten Wartungsintervallen und damit spürbaren Kosteneinsparungen bei Bremskomponenten.

In der Einführungsphase traten vereinzelt Ersatzteilmangel und Softwareprobleme auf. Bei H<sub>2</sub>-Systemen zudem Probleme mit Komponenten wie Verdichtern. Werkstattberichte empfehlen diesbezüglich frühe Lieferantenabsprachen, Bevorratung kritischer Teile und klare Service Level Agreements (*BMWK 2024*).

**Dieselsebus-Vergleich:** > 0,30 €/km

## 5.10. Systemwirkungsgrad

**Batterieelektrischer Durchschnittsverbrauch:** 120 kWh/100 km

**Gesamtsystem-Wirkungsgrad (Batterie-elektrisch):** ca. 75 %

Basierend auf den in Thüringen erhobenen Betriebsdaten kann ein näherungsweise Gesamtwirkungsgrad des batterieelektrischen Antriebssystems abgeschätzt werden.

Für die weitere Abschätzung werden typische Wirkungsgrade herangezogen:

- Ladeverluste (AC-DC, inkl. Kühlung): ca. 6 %
- Batterie-Roundtrip-Verluste: ca. 8 %
- Antriebseffizienz im Fahrzeug: ca. 87 %

Daraus ergibt sich ein angenäherter Systemwirkungsgrad vom Netzanschluss bis zur Radumdrehung von ca. 75 %.

**Wasserstoffbus:** 25–35 % Wirkungsgrad (Stromquelle für Wasserstoffproduktion („Quelle“)-zu-Rad). Die geringere Energieeffizienz von Wasserstoffbussen bei der

Umwandlung von Wasserstoff zu Fahrstrom führt dazu, dass bei gleicher Fahrleistung mindestens zweimal so viel Primärenergie benötigt wird wie bei Batterie-E-Bussen

**Vergleich Dieselbus:** 20–25 % Wirkungsgrad (Tank-zu-Rad)

## 6. Fazit

Die Auswertung der realen Betriebsdaten zeigt, dass batterieelektrische Busse in Thüringen inzwischen eine technisch und – bei entsprechender Investitionsförderung – wirtschaftlich tragfähige Alternative zum Dieselbus darstellen. Die Betriebskosten sind durch günstigen Strom und reduzierten Wartungsaufwand deutlich niedriger. Moderne Fahrzeuge erreichen Reichweiten, die in vielen Fällen einen Tagesumlauf ohne Zwischenladung ermöglichen. Bei Bedarf kann zusätzliche Ladeinfrastruktur, etwa an Endhaltestellen, zum Einsatz kommen. Auch die Haltbarkeit der Batterien erweist sich als robust, sodass für die künftige Flottenplanung eine hohe Betriebssicherheit gegeben ist.

Wasserstoffbusse sind in Thüringen bislang nur in einem Pilotprojekt vertreten. Erste Betriebserfahrungen mit dem dort eingesetzten Solaris Urbino 12 hydrogen zeigen, dass diese Fahrzeuge Reichweiten von über 300 km realisieren können und damit für lange Umläufe ohne Ladeinfrastruktur geeignet sind. Die Technologie bietet Vorteile bei bestimmten Einsatzprofilen, etwa bei enger Taktung oder fehlender Ladezeit im Linienverlauf. Zugleich zeigen sich hohe spezifische Betriebskosten, eine komplexere Wartung und ein höherer Energiebedarf. Auch die Verfügbarkeit von Wasserstofftankstellen und Ersatzteilen stellt Verkehrsunternehmen derzeit vor Herausforderungen. Die gesicherte Datenbasis ist noch begrenzt. Das laufende Projekt wird weitere wertvolle Praxiserkenntnisse für eine erweiterte Einordnung liefern. Die Bewertung sollte dabei konsequent von Quelle-zu-Rad erfolgen. Insbesondere bei Wasserstoff ist die CO<sub>2</sub>-Bilanz stark von der Quelle des Elektrolysestroms, der Logistik und der Druckstufe abhängig, denn grüner Wasserstoff ist Voraussetzung für eine günstige Klimawirkung (vgl. *BMWK-Begleituntersuchung 2024; PwC 2025*).

Insgesamt ist die technologische Entwicklung bei beiden Antriebsformen dynamisch. Während batterieelektrische Systeme bereits flächendeckend im ÖPNV angekommen sind, bleibt Wasserstoff perspektivisch eine Ergänzungsoption für spezifische Einsatzbedingungen – insbesondere, wenn grüner Wasserstoff regional verfügbar gemacht und wirtschaftlich genutzt werden kann.



## 7. Quellen

1. Agora Verkehrswende 2021: *Europa stellt auf Elektrobus um*. Online verfügbar unter: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/europa-stellt-auf-elektrobus-um> (Zugriff: 09.10.2025).
2. Ballard Power Systems 2025: *FCmove® – Heavy Duty Motive Modules (Spezifikation/FAQ, Lebensdauerhinweise)*. Online verfügbar unter: <https://www.ballard.com/fcmove/> (Zugriff: 09.10.2025).
3. BBH 2021: *HyExperts Region Emscher-Lippe – Technologie-Steckbriefe*. Online verfügbar unter: [https://www.hy.land/wp-content/uploads/2021/12/Abschlussbericht\\_HyExperts\\_EmscherLippe\\_2021\\_2.pdf](https://www.hy.land/wp-content/uploads/2021/12/Abschlussbericht_HyExperts_EmscherLippe_2021_2.pdf) (Zugriff: 13.10.2025).
4. BMWK 2024: *Begleituntersuchung Elektrobussysteme – Kurzfassung / Landing-Page*. Online verfügbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/abschlussbericht-begleituntersuchung-e-busse-oePNV.html> (Zugriff: 09.10.2025).
5. busplaner (01.04.2025): *The ramp-up of e-buses continues – but the momentum is decreasing (PwC E-Bus-Radar 2025)*. Online verfügbar unter: [https://www.busplaner.de/en/news/electromobility-e-mobility-scheduled-services-local-public-transport\\_ramp-e-buses-continues-momentum-decreasing-110874.html](https://www.busplaner.de/en/news/electromobility-e-mobility-scheduled-services-local-public-transport_ramp-e-buses-continues-momentum-decreasing-110874.html) (Zugriff: 09.10.2025).
6. CHIC Consortium 2017: *Final Report – Clean Hydrogen in European Cities (CHIC)*. Landing-Page (mit Report). Online verfügbar unter: <https://fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/final-report-chic-clean-hydrogen-european-cities> (Zugriff: 09.10.2025).
7. Clean Hydrogen Joint Undertaking 2024: *Programme Review Report 2024 (Abschnitte zu FCEB-Projekten, „hours of operation“)*. Online verfügbar unter: <https://horizoneuropencppportal.eu/sites/default/files/2024-12/chju-programme-review-report-2024.pdf> (Zugriff: 09.10.2025).
8. Clean Hydrogen Partnership 2025: *JIVE 2 – Project repository (Abschlussinformationen/Ergebnisse, Feldbetrieb)*. Online verfügbar unter: [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/jive-2\\_en](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/jive-2_en) (Zugriff: 09.10.2025).
9. Eudy, L.; Post, M. 2021: *Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2020*. NREL/TP-5400-76734. Online verfügbar unter: [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/fc\\_bus\\_status\\_2020.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/fc_bus_status_2020.pdf) (Zugriff: 09.10.2025).
10. Fuel Cell Buses / JIVE2 2025: *Report on remaining barriers and proposed solutions (D4.4, März 2025)*. Online verfügbar unter: [https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/JIVE2\\_D4.4\\_Final\\_Report\\_Final\\_110325.pdf](https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/JIVE2_D4.4_Final_Report_Final_110325.pdf) (Zugriff: 09.10.2025)
11. NREL 2023: *AC Transit Fuel Cell Electric Bus Progress Report (2023)*. Online verfügbar unter: <https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/78345.pdf>. (Zugriff: 13.10.2025).

12. NREL 2025: – National Renewable Energy Laboratory (2025): *Fuel Cell Electric Bus Evaluations*. Übersichtsseite (laufend). Online verfügbar unter: <https://www.nrel.gov/hydrogen/fuel-cell-bus-evaluation> (Zugriff: 09.10.2025).
13. Post, M. B. 2023: *Hydrogen Fuel Cell Electric Bus (FCEB) Evaluations in U.S. Public Transit*. OSTI-Eintrag. Online verfügbar unter: <https://www.osti.gov/biblio/1971855> (Zugriff: 09.10.2025).
14. PwC 2025: *E-Bus-Radar 2025*. Themenseite (mit Download). Online verfügbar unter: <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/e-bus-radar.html> (Zugriff: 09.10.2025).
15. PwC 2025: *E-Bus-Radar 2025*. Direkt-PDF. Online verfügbar unter: <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/pwc-e-bus-radar-2025.pdf> (Zugriff: 09.10.2025).
16. PwC im Auftrag des BMWK (2024): *Begleituntersuchung zur Förderung von Elektrobussen im ÖPNV – Abschlussbericht*. Direkt-PDF. Online verfügbar unter: <https://www.pwc.de/de/branchen-und-markte/oeffentlicher-sektor/begleituntersuchung-zur-foerderung-von-elektrobussen-im-oepnv.pdf> (Zugriff: 09.10.2025).
17. Sustainable Bus (18.03.2025): *Iveco, Scania-Higer, Solaris and VDL in competition at Ebus Test 2025 (Bonn)*. Online verfügbar unter: <https://www.sustainable-bus.com/news/ebus-test-2025-bonn/> (Zugriff: 09.10.2025).
18. TheGA 2025: *Monitoringbericht E-Busse Thüringen 2024*. Interner Bericht. Erfurt. Nicht öffentlich.
19. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) 2025: *Positionspapier „RED III: Transformation und Kofinanzierung im öffentlichen Verkehr“*. Herleitung und Parameter im Anhang 2, S. 22.  
Online verfügbar unter: <https://vdv.de/positionspapier-zu-red-iii-transformation-und-kofinanzierung-im-oeffentlichen-verkehr.pdf> (Zugriff: 14.10.2025)
  - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) 2023: *CVD-Umsetzung im ÖPNV des Landes Brandenburg. Bericht (Stand 13.04.2023)*. Online verfügbar unter: <https://www.vdv.de/2023-04-13-bericht-brb-final.pdf> (Zugriff: 19.12.2025).
  - Liu, L. et al. 2019: *Impact of Time-Varying Passenger Loading on Bus Fuel Economy and Emissions*. NREL/DOE AFDC. Online verfügbar unter: [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/time-varying\\_passenger\\_loading\\_impact.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/time-varying_passenger_loading_impact.pdf) (Zugriff: 19.12.2025).
  - Eberspächer 2023: *Personal Transport Brochure – Fuel operated air heaters (Fuel consumption l/h 0,16–0,49)*. Online verfügbar unter: [https://www.eberspaecher-climate.com/fileadmin/data/csp/pdf/broschueren-neu-EN/Personal\\_Transport\\_Brochure\\_EN.pdf](https://www.eberspaecher-climate.com/fileadmin/data/csp/pdf/broschueren-neu-EN/Personal_Transport_Brochure_EN.pdf) (Zugriff: 19.12.2025).

## Anlage 1: Chemische Zusatzheizungen in Elektrobus-Systemen

Im Winterbetrieb sind Elektrobusse mit rein elektrischer Heizung stark belastet, da der Energiebedarf für das Heizen erheblich ist. Das kann zu einer Reduktion der Reichweite um 20–35 % führen. Daher setzten die Verkehrsunternehmen bei vergangenen Beschaffungen noch häufig auf chemische Zusatzheizungen.

Der **Übergang zu** Wärmepumpensystemen und damit **vollelektrischen Systemen** findet aufgrund der inzwischen höheren Batteriekapazitäten jedoch bereits statt.

### **Funktionsweise chemischer Zusatzheizungen**

Chemische Zusatzheizungen sind kompakte Verbrennungsheizsysteme, die unabhängig vom Antriebssystem Wärme erzeugen. Es handelt sich meist um:

- Dieselbetriebene Standheizungen (z. B. von Webasto oder Eberspächer)
- Gasbetriebene Systeme (seltener)
- Bioethanol-basierte Heizsysteme (noch wenig verbreitet)

### **Vorteile**

- Höhere Reichweite im Winter
- Schnellere Aufheizzeiten
- Robust und im Flottenbetrieb bewährt
- Unabhängig von Ladeinfrastruktur

### **Nachteile und Herausforderungen**

- Betrieb mit fossilen Energieträgern (meist Diesel)
- Zusätzliche Emissionen (lokal)
- Wartungsbedarf

### **Einsatz in Thüringen**

Die meisten in Thüringen eingesetzten E-Busse nutzen **Diesel-Zusatzheizungen**. Dies gilt unter anderem für Modelle wie:

- EvoBus eCitaro
- Sileo S12
- MAN Lion's City 12E

Insgesamt wird die chemische Zusatzheizung überwiegend zur Sicherstellung der Reichweite im Winter eingesetzt. Einige Fahrzeuge kombinieren elektrische Klimaanlage und chemische Heizung.

## Anlage 2: Wartungskostenvergleich – E-Bus vs. Diesel (Thüringen 2024)

Im Rahmen des Landesprogramms "CO<sub>2</sub>-arme Mobilität" wurden Wartungsdaten für Elektrobusse systematisch erfasst und mit konventionellen Dieselnissen verglichen. Der Fokus liegt auf typischen Stadtbussen (12 Meter) im Linienverkehr.

### Wartungskosten im Vergleich

- E-Bus (Thüringen): meist < 0,15 €/km, in Einzelfällen leicht darüber
- Dieselnisse: > 0,30 €/km

Das entspricht einer Ersparnis von über 50 % zugunsten der E-Busse

### Ursachen der Einsparung

- Wegfall von Motor-, Getriebe- und Auspuffwartung
- Weniger Verschleiß an Bremsen durch Rekuperation
- Geringerer Wartungsbedarf bei Nebenaggregaten

### Lebensfahrleistung und Gesamtersparnis

- Angenommene Lebensfahrleistung: 600.000 bis 800.000 km
- Daraus resultierende Ersparnis: > 100.000 € je Fahrzeug allein durch geringere Wartungskosten

### Einschränkungen und Perspektiven

Batteriealterung kann langfristig zu höherem Instandhaltungsaufwand führen. Allerdings zeigen die bisherigen Erfahrungen in Thüringen, dass die Haltbarkeit und Leistungsstabilität der Batterien **deutlich besser ausfällt als ursprünglich erwartet**. Die meisten Betreiber melden stabile Reichweiten, geringe Ausfallquoten und bislang keine nennenswerten Probleme mit Zelldegradation im laufenden Betrieb.

Laut BMWK-Begleituntersuchung (2024) und PwC E-Bus-Radar 2025 liegt die tatsächliche Nutzungsdauer der Batterien vielerorts **über den prognostizierten acht Jahren**, teils mit über 3.000 Ladezyklen ohne signifikanten Kapazitätsverlust.

- Zusätzliche Effekte durch Digitalisierung (z. B. Fernwartung) möglich
- Langfristig wird mit weiterer Reduktion der Wartungskosten gerechnet

### Anlage 3: Versicherung von batterieelektrischen Bussen: Die Praxis

E-Busse unterliegen wie alle Nutzfahrzeuge einer Pflichtversicherung. Aufgrund ihrer spezifischen Merkmale ergeben sich teils andere Anforderungen.

#### **Besondere Risiken bei E-Bussen**

- **Höherer Fahrzeugwert** durch Batterie und Technik
- **Hochvoltssysteme** mit potenziellen Brandrisiken
- **Ladeinfrastruktur** als zusätzlicher Versicherungsgegenstand (z. B. Pantograph, Depotladepunkte)
- Versicherer stufen die **Batterie weiterhin als sensiblen Risikofaktor** ein – insbesondere im Hinblick auf thermische Schäden.
- **Hochvoltssysteme** erfordern angepasste Unterweisungen des Fahr- und Werkstattpersonals sowie klare Abläufe im Störfall.

#### **Erfahrungen der Betreiber und Kostenentwicklung**

In Thüringen sind bislang **keine sicherheitsrelevanten Vorfälle** mit batterieelektrischen Bussen dokumentiert worden. Weder Fahrzeugbrände noch schwere Ladeinfrastrukturstörungen wurden im Rahmen des Monitorings gemeldet.

Erfahrungen der Betreiber zeigen, dass sich die Versicherungsprämien im Betrieb nicht wesentlich von Dieselnbussen unterscheiden, mit jährlichen Kosten in der Regel zwischen 1.500 € und 2.000 € pro Fahrzeug, sofern Sicherheitsvorkehrungen (z. B. Brandschutzkonzepte, Vorkonditionierung) greifen. Anfänglich können jedoch Zuschläge auftreten – insbesondere bei Erstflotten oder neuen Modellen. (Quelle: ThEGA 2025: Monitoringbericht E-Busse Thüringen 2024, intern.)

#### **Fazit Versicherung von E-Bussen**

Die Versicherung von E-Bussen ist gut umsetzbar. Sie erfordert allerdings zusätzliche technische Klärungen – insbesondere rund um Batterie, Ladeinfrastruktur und Betriebssicherheit. Ein strukturierter Austausch mit dem Versicherer vor Inbetriebnahme reduziert spätere Risiken.

## Anlage 4: Hintergrund zur Lebensdauer von Brennstoffzellen

### **Technische Werte**

In Brennstoffzellenbussen kommen überwiegend Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) zum Einsatz. Typische Lebensdauern laut Herstellerangaben und unabhängigen Studien (Ballard 2025; CHJU 2024):

- 10.000 bis 25.000 Betriebsstunden (realistisch bei aktuellen Systemen, je nach Qualität, Kühlung, Feuchtmanagement und Betriebsbedingungen)
- Neue Systeme sollen bis zu 30.000 Betriebsstunden halten, es liegen hierzu aber noch keine praktischen Erfahrungen vor
- Bei einer durchschnittlichen Nutzung von 2.500 -3000 Stunden pro Jahr entspricht das 4 bis 12 Jahre Lebensdauer.
- Danach ist oft ein Austausch des Brennstoffzellenstapels ("Stack") notwendig, was hohe Kosten verursacht.

### **Technologische Entwicklung (2014–2024):**

Seit 2014 gab es deutliche Fortschritte bei Materialien, Stack-Kühlung und Steuerung. Dennoch blieb die Lebensdauersteigerung im ÖPNV-Einsatz begrenzt:

- 2014: 4.000–8.000 h (CHIC-Projekte, frühe Systeme)
- 2018: 10.000–12.000 h (fortgeschrittene PEM-Systeme)
- 2024: Zielwerte 15.000–30.000 h, real aber oft noch 10.000–15.000 h

Hauptgründe für limitierte Haltbarkeit:

- thermische Zyklen im Stop-and-Go-Betrieb
- empfindliche Komponenten (z. B. Kompressoren, Befeuchter)
- Fokus vieler Hersteller auf Kosten statt Lebensdauer

Fazit: Die Lebensdauer ist zwar technisch gestiegen, liegt aber weiter unterhalb der Lebensdauer von Busmotoren oder Batterien mit aktiver Kühlung im ÖPNV.

### **Daten aus Thüringen**

Der Solaris Urbino 12 hydrogen, der in Thüringen eingesetzt wird, basiert auf folgender technischer Plattform:

- Brennstoffzelle: PEMFC (Ballard Power Systems), ca. 70–100 kW
- Elektromotor: Zentralmotor mit ca. 160 kW Leistung
- Pufferbatterie: Lithium-Ionen mit 30–40 kWh für Rekuperation und Lastspitzen



- Wasserstofftanks: 5 Tanks mit insgesamt 37,5 kg H<sub>2</sub> (700 bar)
- Heizung/Kühlung: rein elektrisch, über Wärmepumpe und/oder PTC-Elemente

Monitoringbericht ThEGA (2025):

Rückmeldungen aus dem Betrieb der drei Solaris Urbino 12 hydrogen-Busse:

- zeitweilige Störungen an Brennstoffzellensystemen
- schwierige Ersatzteilversorgung
- hohe spezifische Betriebskosten
- Obwohl keine direkte Aussage zur Lebensdauer vorliegt, deuten die Probleme auf begrenzte technische Robustheit und Wartungsintensität hin.

Einsatzprofil und Tagesfahrleistung in Weimar:

- Konkrete Tagesfahrleistungen der Wasserstoffbusse in Weimar werden im Monitoring nicht separat ausgewiesen.
- Laut landesweitem Monitoring lagen die durchschnittlichen Tageslaufleistungen von E-Bussen zwischen 135 und 172 km, in Einzelfällen bis zu 350 km/Tag.
- Für den Solaris Urbino 12 hydrogen mit Herstellerreichweite bis zu 325 km bedeutet das: ein Betriebstag ohne Zwischentankung ist möglich.
- Ein Zwischentanken im Tagesverlauf findet in Thüringen nicht statt, da Wasserstoff-Tankvorgänge aufwendig und nur im Depot vorgesehen sind.
- Neuere Fahrzeugmodelle anderer Hersteller (z. B. Van Hool, Caetano, Toyota) erreichen Reichweiten von über 400 km, kommen in Thüringen aber bislang nicht zum Einsatz.

### **Internationale Betriebserfahrungen**

USA (NREL, 2023–2025):

- Langzeitbeobachtungen an Wasserstoff-Linienbussen zeigen, dass Stack-Standzeiten von  $\geq 20.000$  h erreicht werden; einzelne Systeme überschreiten diese Marke, Ausfälle treten aber vereinzelt auch davor auf.
- NREL dokumentiert fortlaufend Betriebsstunden, Zuverlässigkeit und Stack-Wechsel in seinen Projektreihen (u. a. AC Transit, New Flyer). Realistisch nutzbare Praxiszeiträume von  $\sim 4$ – $6$  Jahren pro Stack (je nach Duty-Cycle) sind konsistent mit den jüngsten NREL-Updates.
- Aktuelle Zahlen, Link: [nrel.gov](https://www.nrel.gov)+1

Europa – JIVE/JIVE2 & Clean Hydrogen JU (2023–2025):

- Die EU-Großprojekte JIVE/JIVE2 haben rund 290 Wasserstoffbusse an 16 Standorten in Betrieb gebracht und berichten zu „hours of operation“, Verfügbarkeit und Komponenten-Standzeiten. Die Programm-Reviews des Clean Hydrogen JU sowie der JIVE2-Abschluss/Barrieren-Report (2025) benennen u. a. Kompressor/Peripherie, Ersatzteil-Logistik und Service-SLA als Kostentreiber und Ausfallrisiken – ein guter, aktueller Referenzrahmen für europäische Felddaten (inkl. NRW-Standorte).
- Report, Direktlink: [Urban Transport Magazine+4horizoneuropencppportal.eu+4Clean Hydrogen Partnership+4](https://urbantransportmagazine.com/4horizoneuropencppportal.eu+4CleanHydrogenPartnership+4)

### **Wirtschaftlichkeit und Kosten der Brennstoffzelle**

Gesamtkosten eines H<sub>2</sub>-Busses: 700.000–900.000 €

Kostenanteil des Brennstoffzellensystems:

- Zellstapel (Stack): 80.000–150.000 €
- Komplettsystem (inkl. Peripherie): 150.000–250.000 €

Stack-Lebensdauer in km:

- 15.000 h × 25 km/h = 375.000 km (praxisnaher Mittelwert)
- Niedriger im Stadtverkehr mit 20 km/h: 300.000 km

Stack-Tausch ist wirtschaftlich oft kritisch, da nicht durch Folgeförderung abgedeckt.

### **Studienlage zur Wirtschaftlichkeit**

PwC E-Bus Radar 2025:

- Lebenszykluskosten (LZK) für Wasserstoffbusse 2023: ~70 % höher als Diesel, 2030 noch ~45 % höher
- Hauptkostentreiber: Wasserstoffpreis, Wartung, Technikkomplexität

### **Fazit zur Lebensdauer**

- Die effektive technische Lebensdauer einer Brennstoffzelle im Linienbusbetrieb liegt heute in der Praxis oft unter 8 Jahren.
- Wirtschaftlich relevante Komponentenausfälle treten häufig vor Ablauf eines typischen Buslebens (12 Jahre) auf.
- Garantien auf die Brennstoffzelle werden in der Regel von Hersteller nur auf 5-8 Jahre bzw. max. 20.000 Betriebsstunden gegeben, maximal 25.000 Betriebsstunden (gegen Aufpreis).
- Garantien werden dadurch eingeschränkt, dass der Kunde nachweisen muss, dass er stets hochqualitativen Wasserstoff genutzt hat.