

Alternative Antriebe in der Landwirtschaft: Lebenszykluswirkungen, Bodeneffekte und Umsetzungspfade im EU-Kontext

Executive Summary

Die Dekarbonisierung von Traktoren und selbstfahrenden Feldmaschinen in der Europäischen Union [1] ist technisch möglich, aber stark pfad- und anwendungsabhängig: Für leichte Leistungen (<50 kW) sind batterieelektrische Antriebe (BEV) bereits heute am plausibelsten, während bei hohen Leistungen (>150 kW) die Energiebereitstellung (Masse, Betankungs-/Ladezeiten, Netz- bzw. H₂-Infrastruktur) und die Bodenwirkungen (Achslasten, Radlasten, Überfahrhäufigkeit) die Engpässe sind. [2]

Aus Klimasicht dominieren bei Diesel und vielen Biofuel-Pfaden die Emissionen aus der Nutzungsphase (Kraftstoffverbrauch/Verbrennung), während bei BEV und Brennstoffzellen (FCEV) die Bilanz stark vom eingesetzten Strom bzw. vom Wasserstoffpfad abhängt (Strommix, „Additionality“-Regeln, Speicher-/Umwandlungsverluste). Offizielle EU-Defaultwerte für fossilen Diesel liegen bei rund 95,1 g CO₂e/MJ Kraftstoff (Lebenszyklusintensität) und bilden eine robuste Referenz. [3]

Bio-basierte Optionen zeigen eine große Spannweite: Rest- und Abfallpfade können hohe THG-Minderungen erreichen, aber **pflanzenölbasierte Biokraftstoffe sind sensitiv gegenüber indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC)**. Die in der RED-Harmonisierungslogik ausgewiesenen iLUC-Emissionswerte für „Ölpflanzen“ liegen im Mittel bei 55 g CO₂eq/MJ (Band 33–66), was Einsparungen crop-basierter Biodieselpfade in der Gesamtschau stark schmälern oder überkompensieren kann. [4]

BEV liefern bei niedrigerem Strom-CO₂ (z. B. durch Hof-PV/Wind plus netzdienliches Laden) die deutlich niedrigsten Well-to-Wheel-Emissionen und eliminieren lokale CO₂- und Abgasemissionen am Feld. Gleichzeitig kann bei großen Maschinen die notwendige Batteriemasse die Achslasten erhöhen und das Risiko **dauerhafter Unterbodenverdichtung** steigern – ein Effekt, der aus Bodenschutzsicht häufig unterschätzt wird. Literatur zeigt, dass Unterbodenverdichtung Jahrzehnte persistieren kann und dass Radlast/Überfahrhäufigkeit und Reifeninnendruck zentrale Treiber sind. [5]

Wasserstoff (grün via Elektrolyse) ist als **Energievektor** nur dann klimavorteilhaft, wenn der Strom sehr CO₂-arm ist; eine IEA-Schwellenlogik zeigt, dass Elektrolyse-H₂ nur bei Stromemissionen unter ca. 200–240 g CO₂/kWh emissionsärmer als SMR-H₂ wird. Zusätzlich können Umwandlung/Transport zu H₂-Trägern 45–70 % Energieverlust verursachen, was die effektive THG-Intensität pro „gelieferter“ H₂-Einheit stark erhöht, sofern nicht vor Ort produziert bzw. kurzwegig genutzt wird. [6]

Politisch verschiebt sich der Rahmen in Richtung strengere Nachhaltigkeits- und THG-Kriterien: Die konsolidierte RED-Logik fordert u. a. Monitoring/Managementpläne, wenn Agrar-Residuen energetisch genutzt werden (Bodenqualität/Bodenkohlenstoff), und verlangt für RFNBOs (inkl. erneuerbarem H₂) mindestens 70 % THG-Einsparung sowie detaillierte Regeln zu zeitlicher/geografischer Korrelation und Additionality. [7]

Die robusteste Strategie über alle Betriebs- und Maschinensegmente lautet daher: **(i)** kurzfristig Effizienz, Reifen-/Fahrwerks- und Verkehrsmanagement (Controlled Traffic) im Dieselbestand + schnelle Substitution durch nachhaltige drop-in-Biokraftstoffe aus Abfällen/Residuen, **(ii)** BEV für kleine bis mittlere Anwendungen mit planbaren Lastprofilen und eigener EE-Erzeugung, **(iii)** H₂/FCEV eher als Option für hohe Leistungen und lange Einsatzfenster – aber nur mit gesicherter erneuerbarer Strombasis und hofnaher Infrastruktur, **(iv)** parallel mechanisch-bodenorientierte Innovation (leichtere Systeme, autonome Schwärme) als Bodenschutz-Hebel. [8]

Methodik und Annahmen

Systemgrenzen und Vergleichslogik

Berichtet wird entlang zweier Emissionsperspektiven:

- **Well-to-Wheel (WtW):** Emissionen von Energiebereitstellung + Umwandlung + Nutzung (beim Diesel inkl. Verbrennung; bei Strom/H₂ abhängig vom Erzeugungspfad). Die JEC-Methodik betont, dass WTW keine vollständige Ökobilanz ist (z. B. ohne Fahrzeug-/Anlagenbau und End-of-Life). [9]
- **Cradle-to-Grave (CtG):** vollständiger Lebenszyklus einschließlich Herstellung, Wartung, End-of-Life (relevanter bei BEV/FCEV wegen Batterie/Brennstoffzelle/Materialien). Studien zu Traktoren zeigen: BEV-Systeme können in der Herstellung höhere Umweltwirkungen haben (Batterie als Hotspot), aber über den gesamten Lebenszyklus dennoch deutlich geringere Klimawirkung erreichen. [10]

Funktionale Einheit und Maschinenklassen

- **Funktionale Einheit (FU):** 1 kWh nutzbare mechanische Energie am Traktor (Zugleistung/PTO) als technologie-neutraler Vergleich für WtW-Sensitivitäten.
- **Maschinenklassen:**
 - klein: <50 kW
 - mittel: 50–150 kW
 - groß: >150 kW (z. B. schwere Zugarbeiten/Ernteketten-Zubringer)

Für die bodenbezogenen Analysen werden zusätzlich typische Massen/Lasten als **Annahmen** verwendet, gestützt durch Referenzdaten: ein mittlerer Traktor (155 CV; 4WD) wurde mit 7.300 kg modelliert; Lebensdauerannahmen 7.200 h vs. 12.000 h werden explizit diskutiert. [11]

Für kleine Maschinen wird als Größenordnung eine 3.000 kg-Referenz (Ecoinvent-Modellannahme) verwendet. [12]

Zentrale Annahmen für Sensitivitäten

Da nicht alle Parameter spezifiziert wurden, werden folgende Annahmen transparent gesetzt und in der Sensitivität variiert:

- **Diesel-Referenz:** EU-Lebenszyklusintensität 95,1 g CO₂e/MJ für Diesel/Gasöl (Default/gewichteter Default). [3]
- **Strommix (EU):** Emissionsintensität 242 g CO₂/kWh für 2023 (EU-weit), 2024 wird als 9 % niedriger als 2023 beschrieben; daraus wird **rechnerisch** ~220 g CO₂/kWh als Näherung abgeleitet. [13]
- Hinweis: Diese Intensitäten sind i. d. R. stromerzeugungsbezogen (nicht vollständige Lebenszyklus-Intensität inkl. Anlagenbau); diese Abgrenzung wird in der Ergebnisinterpretation berücksichtigt. [14]
- **Biofuel-Pfade:** repräsentative Bandbreiten werden über (a) RED-Nachhaltigkeitslogik (inkl. iLUC) und (b) JEC-WTW-Spannweiten für dieselartige Alternativen abgebildet (Minderung ~50 % bis ~85 % gegenüber konventionellem Diesel je Pfad). [15]
- **RFNBO/H₂:** „grün“ = Elektrolyse mit erneuerbarem Strom; regulatorische Kriterien (Additionality/zeitliche Korrelation/Geografie) gemäß EU-Delegierten Rechtsakten. [16]
- **Bodeneffekte:** Bodenstress ~ Funktion aus Radlast, Reifendruck, Rad-/Achskonfiguration und Überfahrfrequenz; Unterbodenverdichtung kann Jahrzehnte persistieren. [17]

Diesel als Referenz

Lebenszyklus- und Betriebsemissionen

Diesel bleibt der dominante Baseline-Antrieb, weil Energiedichte, Betankungszeiten und bestehende logistische Strukturen hoch optimiert sind. Klimaseitig ist die Referenz jedoch klar: Für konventionellen Diesel/Gasöl wird eine Lebenszyklusintensität von **~95,1 g CO₂e/MJ** angesetzt (EU-Default). [3]

Für landwirtschaftliche Maschinen ist die **Nutzungsphase** typischerweise der größte Beitrag in der CtG-Klimabilanz (Kraftstoffdominanz), was auch in Traktoren-Ökobilanzen als Muster auftaucht. [18]

Regulatorisch adressiert die EU bei Non-Road Mobile Machinery (NRMM) mit **Stage V** vor allem Luftschadstoffe (z. B. Partikel/N_x) über Emissionsgrenzwerte und Typzulassungssysteme; CO₂ ist bislang weniger direkt standardisiert als im Straßenverkehr, was die Dekarbonisierung nicht automatisch erzwingt. [19]

Bodenverdichtung, Lasten und Überfahrintensität

Bodeneffekte sind beim Dieselantrieb nicht durch den Energieträger selbst, sondern durch den **Systemtrend zu hoher Maschinenmasse, Radlasten und intensiver Befahrung** geprägt. Literatur zeigt: Bodenstress hängt u. a. von Radlast, Reifeninnendruck, Radgröße und Anzahl der Überfahrten ab; Unterbodenverdichtung kann über Jahrzehnte persistieren und ist schwer reversibel. [17]

Arbeitswirtschaftlich können konventionelle Systeme große Flächenanteile pro Saison befahren: eine Zusammenstellung zeigt z. B. bei „Grain under conventional tillage“ ~95 % befahrene Feldfläche in einer Saison; bei Kulturen/Managements mit vielen Überfahrten (z. B. Kartoffeln, Silage) werden Intensitäten von mehreren 100 % der Feldfläche berichtet. Controlled Traffic Farming wird als Reduktionshebel genannt. [20]

Nachhaltigkeits- und Resilienzprofil

Diesel ist in Ressourcen- und Biodiversitätssicht primär durch fossile Förderung, Raffination und Verbrennung geprägt; Klimaresilienz am Betrieb ist gering, weil das System gegenüber Preis- und Verfügbarkeitsrisiken fossiler Märkte exponiert bleibt (und politisch zunehmend unter Dekarbonisierungsdruck gerät). [21]

Bio-basierte Kraftstoffe und Gase

Emissionsprofile und Sensitivitäten

Bio-basierte Energieträger lassen sich in der Landwirtschaft teilweise drop-in (z. B. HVO) oder als motor-/systemangepasste Varianten (z. B. Methan/Biomethan) nutzen. Die Klimawirkung ist jedoch **extrem pfadabhängig**:

- JEC-WTW zeigt für „dieselartige“ Alternativen eine Spannweite, die konventionelle Dieselpfade in der Größenordnung **~50 % bis ~85 %** in WTW-GHG senken kann (je nach Bio-/synthetischem Pfad und Annahmen). [22]
- Gleichzeitig sind crop-basierte Biokraftstoffe sensitiv gegenüber **iLUC**: In der konsolidierten RED-Systematik werden für Feedstock-Gruppen „Ölpflanzen“ **55 g CO₂eq/MJ** (Interpercentil 33–66) als (provisorische) iLUC-Emissionen ausgewiesen. Das ist in der Größenordnung der fossilen Baseline und kann die Gesamteinsparung stark reduzieren. [23]

Wichtig: Viele politische und Zertifizierungslogiken behandeln biogenes CO₂ in der Verbrennung anders als fossiles CO₂; deshalb ist die korrekte Systemgrenze (Landnutzung, N₂O aus Düngung, Koppelprodukte, Marktverdrängung) entscheidend. Die JEC-Methodik weist explizit auf Substitutions- vs. Allokationsfragen hin (JEC vs. RED-Ansatz). [24]

Bodenfruchtbarkeit, Residuenentnahme und Landnutzung

Bioenergie aus **Reststoffen und Koppelprodukten** reduziert typischerweise den Flächendruck, kann aber Boden- und Nährstoffhaushalt beeinträchtigen, wenn kohlenstoff- und nährstoffreiche Materialien entnommen werden, die sonst am Feld verblieben wären. Das wird u. a. vom IPCC[25] explizit als Trade-off beschrieben: Residuen können Landkonkurrenz mindern, aber Entzug kann Landdegradation begünstigen; umgekehrt können Gärreste/By-products als Dünger zurückgeführt werden und Co-Benefits haben. [26]

Genau hier setzt die RED-Konsolidierung an: Biofuels/Biomass Fuels aus agrarischen Abfällen/Reststoffen dürfen nur angerechnet werden, wenn Monitoring-/Managementpläne existieren, um Auswirkungen auf Bodenqualität und Bodenkohlenstoff zu adressieren. [27] Das ist für „Advanced Biofuels“ relevant, weil Annex IX explizit Stroh, Gülle, Klärschlamm u. a. als mögliche Feedstocks listet. [28]

Methanbasierte Pfade: Biomethan/ Biogas und Leckagen

Bei Biogas/Biomethan sind die Netto-THG-Wirkungen stark davon abhängig, ob (i) **Gülle/Manure** als Feedstock genutzt wird (potenziell hohe Einsparungen über vermiedene Methanemissionen aus Lagerung) und (ii) Methanverluste entlang der Kette minimiert werden. Eine EU-weite Biomethan-Studie betont die große Bedeutung des Manure-Anteils für Nettoeinsparungen. [29]

Messstudien zeigen zugleich, dass **fugitive Methanemissionen** signifikante Größenordnungen erreichen können (z. B. Emissionen aus Gärrestlagern, Leckagen/Venting), was die Klimabilanz deutlich verschlechtern kann. [30]

Infrastruktur, Kosten und Praxistauglichkeit

Biofuels haben einen systemischen Vorteil: Sie nutzen häufig bestehende Motor- und Verteilinfrastruktur (mit Einschränkungen bei Normen/Kompatibilität). Die Engpässe liegen eher bei nachhaltiger Feedstockverfügbarkeit, Zertifizierungs- und Nachweissystemen (Mass Balance) sowie beim Konflikt Landnutzung vs. Energie. Die RED konkretisiert hierfür Nachhaltigkeitskriterien (u. a. Ausschluss von Flächen hoher Biodiversität, Regeln zu Kohlenstoffvorratsflächen, sowie iLUC-Risikologik). [31]

Batterieelektrische Antriebe

Lebenszyklus- und Betriebsemissionen

BEV eliminieren lokale CO₂-Emissionen am Feld (TTW = 0) und sind energieeffizient. In der JEC-Logik wird hervorgehoben, dass vollelektrische Alternativen TTW-null sind und deutlich höhere Energieeffizienz bieten als Verbrenner; die Gesamtwirkung hängt aber von der Stromerzeugung ab. [32]

Empirisch in der Literatur zu Feldsystemen: Eine CtG-Ökobilanz zweier kleiner autonomer BEV-Traktoren im Vergleich zu einer konventionellen Diesel-Variante zeigt **deutlich niedrigere CtG-Klimawirkung** (GWP: 102 vs. 293 kg CO₂eq ha⁻¹ a⁻¹) trotz höherer Produktionswirkungen des BEV (Batterieproduktion als Hotspot). [33]

Analog im Schwerverkehr (als technologischer Proxy für hohe Leistungsanforderungen) zeigt eine harmonisierte EU-LCA, dass batterieelektrische Fahrzeuge über den Lebenszyklus i. d. R. die größten THG-Reduktionen liefern. [34]

Strommix-Sensitivität: Für 2023 wird die EU-Stromemissionsintensität mit 242 g CO₂/kWh angegeben; 2024 wird als 9 % niedriger als 2023 beschrieben (rechnerisch ~220 g CO₂/kWh). [13]

Damit ist BEV-WtW besonders stark abhängig von: (a) Ladezeit (Netzspitzen vs. EE-Überschuss), (b) zusätzlicher EE-Erzeugung am Hof, (c) lokaler Netzsituation.

Bodenverdichtung: Masse, Achslasten und Systemdesign

Bei BEV ist die Bodenwirkung **nicht eindeutig besser**. Zwei gegensätzliche Transformationspfade sind plausibel:

1) „**Elektrischer 1:1-Ersatz**“ **großer Traktoren:** Bei hohen Tagesenergiemengen führt der Batteriespeicher zu zusätzlicher Masse. Ohne konsequentes Fahrwerks-/Reifen- und Verkehrsmanagement kann das Radlasten erhöhen und Unterbodenverdichtungsrisiken steigern (Unterbodenverdichtung kann Jahrzehnte persistieren). [17]

2) „**Systemwechsel**“ **zu mehreren kleinen autonomen Einheiten:** Genau dieses Argument wird in der Traktorenliteratur gemacht: Der Wechsel von wenigen großen Dieseltraktoren zu mehreren kleineren BEV-Traktoren kann Umweltvorteile bringen und potenziell Bodenstress reduzieren, setzt aber häufig Autonomie voraus und kann die Überfahrhäufigkeit verändern. [35]

Für die Praxis bedeutet das: BEV sind **bodenschonend**, wenn sie (i) Rad-/Achslasten reduzieren (leichtere Maschinen, weniger Ballast), (ii) mit niedrigem Reifeninnendruck/geeigneten Reifen-/Kettenkonzepten fahren und (iii) über **Traffic-Management** (z. B. Controlled Traffic) die befahrene Fläche begrenzen. Die Bedeutung der Überfahrintensität und die Wirksamkeit von Controlled Traffic wird in feldskaligen Analysen hervorgehoben. [20]

Nachhaltigkeitsmetriken und Ressourcen

BEV verlagern Umweltwirkungen in die Produktionsphase (Batteriematerialien, Elektronik). Die Traktoren-LCA zeigt, dass Batterieproduktion in der Herstellungsphase dominiert und dass BEV-Systeme in Kategorien wie Mineralressourcen- und Ökotoxizität höhere Werte haben können, obwohl Klima-, Feinstaub- und Fossilressourcenindikatoren oft stark sinken. [33]

Daraus folgt: Eine rein CO₂-fokussierte Optimierung kann Zielkonflikte (Rohstoffe,

toxikologische Kategorien) übersehen; Design-for-Recycling und lange Nutzungsdauern werden zu Schlüsselfaktoren. [33]

Infrastruktur und Farm-Scale-Praktikabilität

BEV erfordern (a) Ladeinfrastruktur (teils Hochleistung), (b) Netzanschlusskapazität/Lastmanagement, (c) ggf. Pufferspeicher. Der Vorteil: Strom kann betrieblich selbst erzeugt werden (PV/Wind), was Resilienz gegen Kraftstoffpreisschocks erhöht – zugleich kann ein Engpass in Netzkapazität/Spitzenleistung die Skalierung bei großen Maschinen begrenzen. Die starke Systemabhängigkeit zusätzlicher Stromnachfrage wird auch im JEC-Kontext betont (marginale Strombereitstellung kann Emissionen bestimmen). [36]

Wasserstoffbasierte Antriebe

WtW- und CtG-Emissionen: „H₂ ist nur so grün wie sein Strom“

Die Internationale Energieagentur[37] betont für Elektrolyse-H₂: Die Emissionen sind am Produktionspunkt emissionsfrei, aber die Gesamtintensität hängt vom Strom ab; als Daumenregel muss Strom unter **~200–240 g CO₂/kWh** liegen, damit Elektrolyse-H₂ geringere Emissionen als SMR-H₂ aufweist. [6]

Für landwirtschaftliche Anwendungen folgt: **Grüner H₂** ist klimatisch vorteilhaft, wenn er tatsächlich aus zusätzlichem erneuerbarem Strom stammt (oder aus sehr CO₂-armem Netzstrom) und wenn Umwandlungs-/Transportverluste begrenzt sind. Die IEA weist zudem darauf hin, dass die Konversion zu Trägern für Transport (z. B. Ammoniak/LOHC) **45–70 % Energieverluste** verursachen kann, was die effektive Emissionsintensität des gelieferten H₂ (bei nicht-null Stromemissionen) um Faktor ~2–3 erhöht. [6]

Ökobilanzliteratur zu Traktoren zeigt außerdem: Brennstoffzellen-Traktoren können CtG-Reduktionen erreichen, aber die Ergebnisse hängen stark vom H₂-Mix ab. Eine Traktorenstudie berichtet für die Klimakategorie eine CtG-Reduktion von >34 % gegenüber Diesel (bei grauem H₂) und zusätzliche Reduktionen bei „grünem“ H₂ (PV-elektrolyse), weist jedoch auch auf Verschlechterungen in anderen Wirkungskategorien hin (u. a. PV-materialgetrieben). [38]

Betriebs- und Direkt-Emissionen

- **FCEV (Brennstoffzelle):** lokal nahezu keine Abgasemissionen (Wasser als Produkt), TTW-CO₂ = 0; relevant bleiben ggf. Abrieb (Reifen/Bremse) und upstream-Emissionen. [39]
- **H₂-Verbrennung:** lokal CO₂-frei, aber potenziell NO_x-Bildung (temperaturabhängig) und Effizienz typischerweise geringer als BEV/FCEV; für eine strikte Luftqualitäts-/Stage-V-Logik wäre Nachbehandlung wahrscheinlich. (Direkte H₂-ICE-Daten sind stark kontextabhängig; in diesem Bericht wird daher die FCEV-Route als primäre H₂-Option behandelt.) [40]

Bodenverdichtung

H₂-Systeme können – im Gegensatz zu großskaligen Batterien – die Energiespeicherung mit relativ geringer Zusatzmasse ermöglichen. Damit ist bei „gleich großem Traktor“ das Risiko zusätzlicher Bodenverdichtung **tendenziell niedriger** als beim batterieelektrischen 1:1-Ersatz, sofern keine massiven Zusatzgewichte (z. B. Drucktanks in ungünstigen Konfigurationen) entstehen. Die dominanten Bodentreiber bleiben Radlast/Reifendruck/Überfahrhäufigkeit. [41]

Infrastruktur und Regulatorik im EU-Kontext

H₂ erfordert (a) Elektrolyse, (b) Kompression/Speicherung (Sicherheitsanforderungen), (c) Betankung. Politisch ist entscheidend, ob H₂ als RFNBO anerkannt wird: EU-Delegierte Rechtsakte definieren detailliert, wann Strom für RFNBOs als „voll erneuerbar“ gilt (Additionality, zeitliche und geografische Korrelation; ab 2030 strengere zeitliche Korrelation, u. a. stündlich). [42]

Zusätzlich legt die RED-Konsolidierung fest, dass RFNBO nur angerechnet wird, wenn **mindestens 70 % THG-Einsparung** erreicht wird; die Methodik zur Berechnung wird durch delegierte Regelwerke konkretisiert. [43]

Für landwirtschaftliche H₂-Strategien sind deshalb zwei Szenarien getrennt zu behandeln:

- **Hofnaher H₂ (PV/Wind → Elektrolyse → Tankstelle)**: regulatorisch und klimatisch am plausibelsten, wenn zusätzliche EE erzeugt wird und flexible Betriebsführung möglich ist. [44]
- **Netzstrom-H₂**: kann – je nach marginalem Strommix – sehr emissionsintensiv sein und wird regulatorisch (Additionality) zunehmend begrenzt. [45]

Vergleich, Sensitivitäten, Empfehlungen und Forschungslücken

Tabellenvergleich zentraler Kennwerte

Tabelle 1: Emissions- und Bodenhebel je Antrieb (qualitativ) über die Maschinenklassen

Kriterium	Diesel (Baseline)	Bio-basierte Kraftstoffe/Gase	BEV (Strom)	H ₂ (FCEV/Elektrolyse)
WtW-Klimawirkung	hoch; Default Diesel ~95,1 g CO ₂ e/ MJ [3]	sehr variabel; JEC-Spannweite ~-50% bis -85% ggü. Diesel je Pfad; iLUC kann stark addieren [46]	stark strommixabhängig; EU 2023: 242 g CO ₂ /kWh; 2024 ~9% niedriger (rechnerisch)	stark strommixabhängig; Elektrolyse-H ₂ nur bei <200–240 g CO ₂ /k

Kriterium	Diesel (Baseline)	Bio-basierte Kraftstoffe/Gase	BEV (Strom) ~220) [13]	H ₂ (FCEV/Elektrolyse) Wh besser als SMR-H ₂ ; Transport/Carrier Verluste 45–70% [6]
Direkte Feldemissionen	CO ₂ + Schadstoffe; Stage-V reguliert v. a. Luftschadstoffe [19]	CO ₂ am Feld je nach Bilanzierung biogen; Abgasnachbehandlung wie Diesel	lokal 0 (TTW) [32]	lokal 0 (FCEV); H ₂ -ICE ggf. NO _x -relevant [47]
Bodenverdichtung	abhängig von Masse/Ballast/Traffic; Unterboden kann Jahrzehnte geschädigt sein [17]	ähnlich Diesel (Maschine meist ähnlich schwer); indirekte Bodenwirkung über Residuenentnahme möglich [48]	ambivalent: 1:1-Ersatz großer Maschinen kann Masse erhöhen; Systemwechsel zu kleinen autonomen Einheiten kann Risiko senken [35]	tendenziell günstiger als große Batterien (Energiespeicherung leichter); Bodentreiber bleiben Radlast/Überfahrten [20]
Nachhaltigkeitsrisiken	fossil, externe Effekte upstream	Landnutzung/iLUC; Biodiversitäts-/Bodencriteria; Monitoring für agrarische Residuen[31]	Rohstoffe/Batterieproduktion als Hotspot; Trade-offs in Wirkungskategorien [33]	Bedarf an EE-Strom; Pt/Materialien (BZ); carrier logistics; ggf. Trade-offs (PV-Material) [49]
Farm-Scale-Praktikabilität	sehr hoch	hoch–mittel (abhängig von Kraftstoffverfügbarkeit /Zertifizierung) [27]	hoch bei klein/teilweise mittel; groß abhängig von Ladeleistung/Netz	mittel; stark abhängig von lokaler H ₂ -Infrastruktur und regulatorisch

Kriterium	Diesel (Baseline)	Bio-basierte Kraftstoffe/Gase	BEV (Strom)	H ₂ (FCEV/Elektrolyse) her Anerkennung (RFNBO) [50]
-----------	----------------------	----------------------------------	-------------	--

Tabelle 2: Maschinenklassen – typische Masse-/Energiespeicher-Implikationen (teilweise Annahmen, wo nicht quellenseitig spezifiziert)

Klasse	Referenzdaten aus Literatur	Energiebedarf / Tag (Bsplannahme)	BEV-Implikation	H ₂ -FCEV-Implikation
<50 kW	ca. 3.000 kg Modellannahme (kleiner Traktor) [12]	~120 kWh mech	Batteriegröße moderat; Ladefenster oft planbar	H ₂ -Bedarf klein; Infrastrukturaufwand oft nicht wirtschaftlich
50–150 kW	7.300 kg bei 155 CV (~114 kW); Lebensdauer 7.200–12.000 h [11]	~480 kWh mech	Batterie signifikant; Lastmanagement/Netzanschluss wichtig; bodenseitig sorgfältige Konfiguration nötig	H ₂ -Mengen moderat; Betankung schnell, aber Elektrolyse/Storage nötig
>150 kW	(für große Traktoren: Masse/Lasten stark variabel; hier als Annahme behandelt)	~1.280 kWh mech	1:1-Ersatz kann sehr große Batterien erfordern → potenziell höhere Radlasten; Alternativpfad: mehrere kleinere autonome Einheiten [33]	H ₂ -Energiespeicherung masseseitig günstiger; klimatisch nur mit sehr CO ₂ -armem Strom sinnvoll [6]

Sensitivitätsanalyse der WtW-Emissionen (rechnerische Illustration)

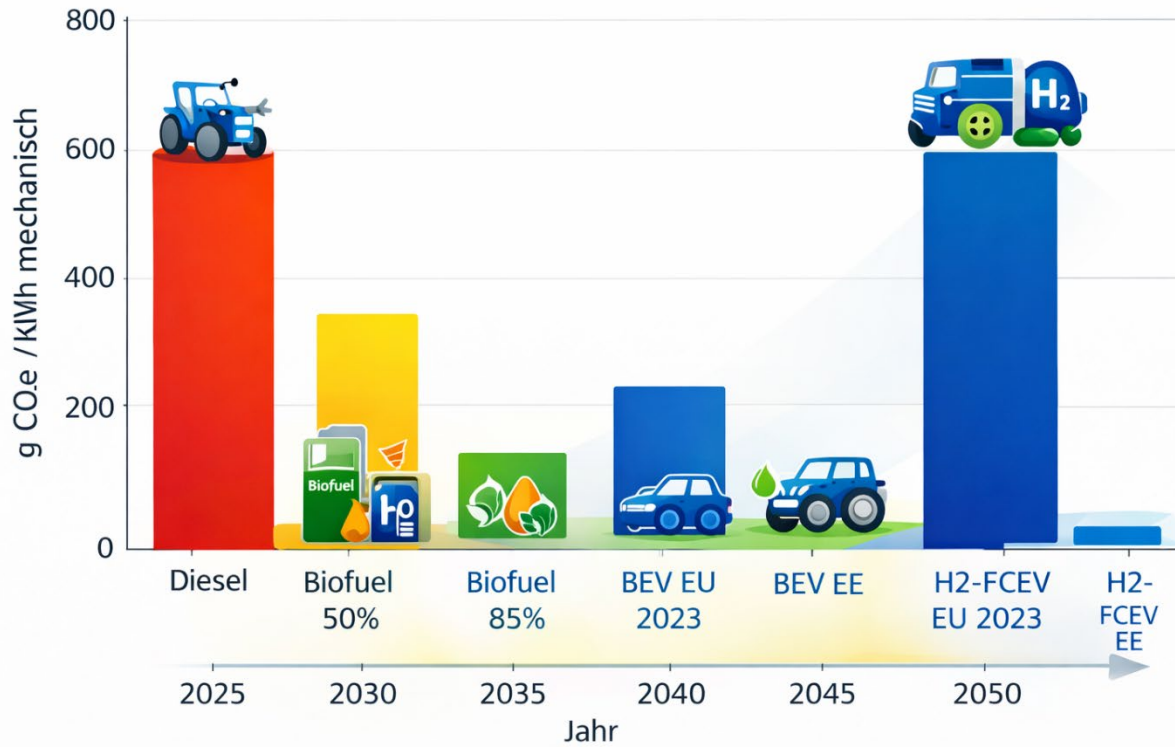
Die folgenden Werte sind **Modellrechnungen** aus den oben genannten Default-/Indikatorwerten und der vereinfachten Annahme, dass 1 kWh mechanisch im Diesel ~9 MJ Kraftstoffenergie benötigt ($\eta \approx 0,40$) und BEV ~1,18 kWh Strom pro 1 kWh mechanisch (vereinfachte Wirkungsgradannahme). Sie dienen der Größenordnung und der **Richtungssicherheit**, nicht als zertifizierfähige LCA.

Tabelle 3: WtW-CO₂e je 1 kWh mechanisch (Bandbreiten über Strommix/iLUC)

Pfad	Annahmen/Quelle	Ergebnis (g CO ₂ e/kWh mech)
Diesel	95,1 g CO ₂ e/MJ (Default) [3]	~760–980 (η 0,45...0,35)
Biodiesel „crop-basiert“ ohne iLUC	JEC-Spannweite mind. ~50% ggü. Diesel [51]	~380–490 ($\approx$ 50% von Diesel)
Biodiesel „crop-basiert“ mit iLUC	iLUC Ölpflanzen 55 g CO ₂ eq/MJ (33–66) [52]	kann Richtung Diesel oder darüber gehen
„Advanced“ Biofuel aus Abfall/Residuen	JEC-Spannweite bis ~85% ggü. Diesel [51]	grob ~110–180
BEV mit EU-Strom 2023	242 g CO ₂ /kWh [53]	grob ~280–290
BEV mit EE-Strom (hofnah, zusätzliche EE)	regulatorisch/technisch als Zielpfad; Strommix-Interpretation sensibel [54]	nahe 0 (WtW), CtG bleibt >0
H ₂ -FCEV mit EU-Strom 2023	Schwellenlogik & Verlusthinweise [6]	häufig in der Nähe von Diesel oder höher
H ₂ -FCEV mit EE-Strom (hofnah, zusätzliche EE)	IEA: EE-Strom ist zentral; embedded emissions möglich [55]	sehr niedrig (WtW), CtG materialgetrieben

Diagramme

WtW-Emissionen als Balkendiagramm (Zentralannahmen; reine Rechenillustration)

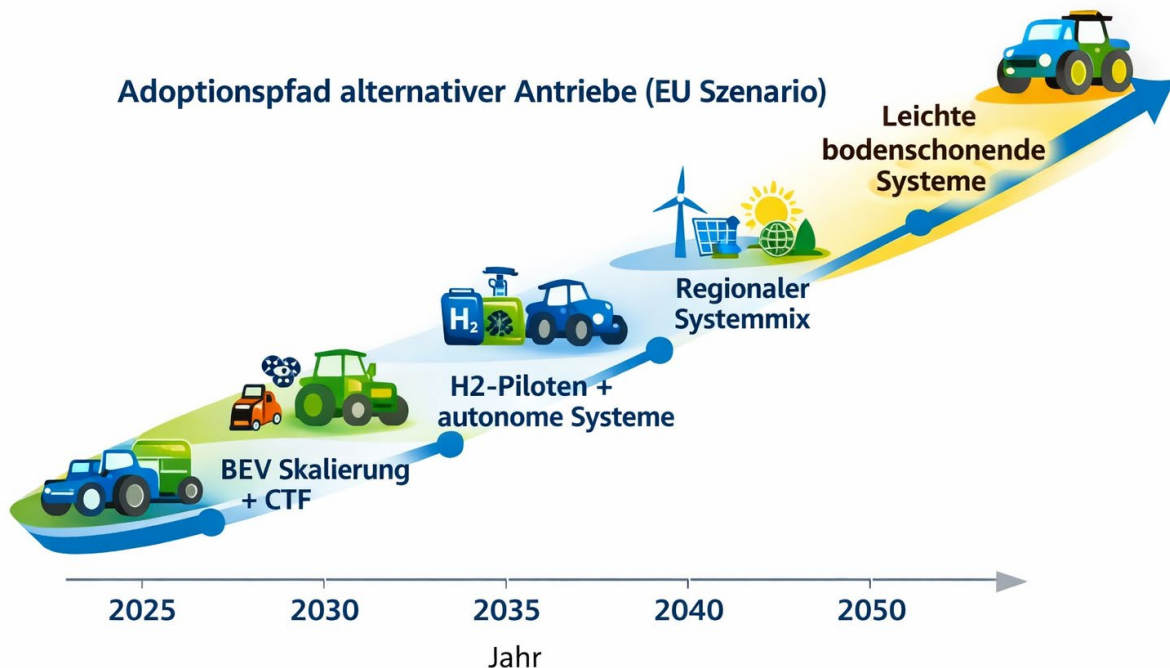
Well-to-Wheel CO₂e je 1 kWh mechanisch (Illustration, EU-Kontext)

Gewicht/Verkehr vs. Verdichtungsrisiko (konzeptionelles Quadrant-Diagramm, skaliert 0–1)

(0–1-Skalierung dient nur der Visualisierung: $x \approx$ relative Radlast/Achslast, $y \approx$ relative Überfahrfrequenz. Die bodenphysikalische Evidenz, dass Radlast/Innendruck/Passzahl Haupttreiber sind und Unterbodenverdichtung lange persistiert, ist quellenbasiert.) [5]



Technologie-Adoptionspfad (EU-Szenario; qualitativ, abhängig von Politik/Netz/Hofstruktur)



Konkrete Empfehlungen

Für Landwirte

1. **Boden zuerst optimieren (antriebsunabhängig):** Radlasten/Überfahrhäufigkeit systematisch messen und reduzieren (Reifendruckmanagement, Achslastverteilung, Controlled Traffic). Das adressiert den zentralen Mechanismus, dass Unterbodenverdichtung langfristig persistiert. [5]
2. **Kurzfristig THG senken ohne Systembruch:** Nachhaltige drop-in-Biokraftstoffe aus Abfällen/Residuen (wo verfügbar und zertifizierbar) können den Bestand dekarbonisieren; crop-basierte Pfade nur unter strenger Prüfung der iLUC-/Landnutzungseffekte. [56]
3. **BEV gezielt dort einsetzen, wo Betriebsmuster passen:** Hofnahe PV/Wind + planbare Einsatzfenster + kleinere Maschinen/Anbaugeräte sind die „low-regret“-Zonen. BEV-Swarm/Autonomie kann bodenschonend sein, muss aber Verkehrsstrategie (Spuren) integrieren. [35]
4. **H₂ nur mit gesicherter EE-Strombasis:** Ohne sehr CO₂-armen Strom ist Elektrolyse-H₂ klimatisch riskant; ideal ist hofnahe Erzeugung und Nutzung mit minimalen Transportverlusten. [55]

Für Politik und Verwaltung

1. **Regeln an Bodenschutz koppeln:** Förderlogiken für alternative Antriebe sollten Radlasten/Traffic-Management (CTF, Bodendrucksensorik) als Kriterien integrieren, weil sonst Klimaschutzmaßnahmen unbeabsichtigt Bodenschäden erhöhen können. [41]
2. **iLUC-Risiko ernst nehmen und Transparenz erhöhen:** Die iLUC-Defaultwerte (z. B. Ölpflanzen 55 g CO₂eq/MJ) zeigen, dass „Bio“ nicht automatisch klimafreundlich ist; Förderung sollte Rest-/Abfallpfade priorisieren und Boden-C-Monitoring bei Residuenentnahme konsequent umsetzen. [4]
3. **Infrastrukturpolitik landwirtschaftlich denken:** Netzverstärkungen und flexible Tarife sind zentrale Enabler für BEV; RFNBO-Regeln (Additionality/Temporalität) müssen so umgesetzt werden, dass reale EE-Zusatzkapazitäten entstehen und Landwirtschaft nicht in fossil-marginale Stromspitzen gedrückt wird. [57]

Für Hersteller

1. **Masse reduzieren statt nur „Antrieb tauschen“:** Leichtbau, modulare Energiespeicher, neue Arbeitsketten (mehrere leichte Einheiten) sind boden- und klimawirksam. [35]
2. **LCA-Design-Targets erweitern:** Batterie/Fuel-Cell-Materialien und Recyclingraten sind Hotspots; Produktentwicklung sollte multi-kriteriell optimieren (Klima + Ressourcen + Toxizität). [10]
3. **Energie- und Dateninfrastruktur integrieren:** Die Traktionselektrifizierung muss mit Lade-/Betriebslogik (Lastmanagement, Farm-EMS) und Traffic-Optimierung (RTK/Spuren) zusammengedacht werden. [58]

Forschungslücken

- **Traktorspezifische, harmonisierte WtW/CtG-LCAs für EU-Landwirtschaft** (statt PKW/HDV-Proxies) über mehrere Einsatzprofile (Zugarbeit, PTO, Transport, Erntekette) und mit einheitlichen Annahmen zu Lebensdauer, Auslastung und Wartung. [59]
- **Boden-LCA-Kopplung:** belastbare Quantifizierung, wie Batterie-/H₂-Systemdesign Radlasten verändert und wie das in Ertrag, Boden-C und langfristige Emissionen (N₂O, SOC-Änderungen) rückwirkt. [60]
- **Methanleckagen entlang der Biomethankette** und robuste Minderungsmaßnahmen (Mess-/Monitoringstandards, Design von Gärrestlagern), weil wenige Prozent Methanschlupf die Klimabilanz stark kippen können. [30]
- **Regulatorik-Praxis-Gap bei RFNBO:** Auswirkungen von Additionality/Temporalität auf reale Kosten, Verfügbarkeit und Systememissionen im ländlichen Raum; hier sind empirische Pilotdaten entscheidend. [61]

[1] [6] [55] <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/ghg-emissions-of-hydrogen-and-its-derivatives>

<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/ghg-emissions-of-hydrogen-and-its-derivatives>

[2] [10] [33] [35] <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11285>

<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/20/11285>

[3] [25] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32015L0652>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32015L0652>

[4] [7] [21] [23] [27] [28] [31] [43] [48] [52] Consolidated TEXT: 32018L2001 — EN — 16.07.2024

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A02018L2001-20240716>

[5] [8] [17] [20] [41] [58] [60] Wheel load and wheel pass frequency as indicators for soil compaction risk: A four-year analysis of traffic intensity at field scale

https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn063040.pdf

[9] [24] [32] [36] [39] [47] [54] https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2020-11/jec_wtw_presentation_hdv_mp.pdf

https://joint-research-centre.ec.europa.eu/system/files/2020-11/jec_wtw_presentation_hdv_mp.pdf

[11] [59] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340923002937>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340923002937>

[12] <https://www.globalcadataaccess.org/tractor-production-4-wheel-agricultural-upr-ecoinvent-36-allocation-cut-0>

<https://www.globalcadataaccess.org/tractor-production-4-wheel-agricultural-upr-ecoinvent-36-allocation-cut-0>

[13] [37] [53] <https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2024/eu-electricity-trends/>

<https://ember-energy.org/latest-insights/european-electricity-review-2024/eu-electricity-trends/>

[14] <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>

[15] [22] [46] [51] [56] https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/jec_wtw_v5_121213_final.pdf

https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/jec_wtw_v5_121213_final.pdf

[16] [42] [44] [45] [50] [57] [61] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A02023R1184-20240610>

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A02023R1184-20240610>

[18] [38] [49] <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/18/4599>

<https://www.mdpi.com/1996-1073/17/18/4599>

[19] [40] <https://d-nb.info/1380545269/34>

<https://d-nb.info/1380545269/34>

[26] <https://www.ipcc.ch/srccl/faqs/faqs-chapter-6/>

<https://www.ipcc.ch/srccl/faqs/faqs-chapter-6/>

[29] https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_ECF_biomethane_EU_final_01.pdf

https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_ECF_biomethane_EU_final_01.pdf

[30] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35944429/>

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35944429/>

[34] <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/Lifecycle-assessment-trucks-and-buses-Europe-German.pdf>

<https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/Lifecycle-assessment-trucks-and-buses-Europe-German.pdf>