



Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor

Stefan Kraus

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 653

ISBN 978-3-95806-802-5

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institute of Climate and Energy Systems (ICE)
Jülicher Systemanalyse (ICE-2)

Optionen zur Umsetzung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor

Stefan Kraus

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 653

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-802-5

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Kurzfassung | I |
| Abstract..... | III |
| Inhaltsverzeichnis..... | IV |
| Abkürzungsverzeichnis..... | IX |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Motivation..... | 2 |
| 1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit..... | 3 |
| 2 Grundlagen des Verkehrssektors..... | 6 |
| 2.1 Struktur des Verkehrssektors..... | 6 |
| 2.1.1 Verkehrsnachfrage..... | 6 |
| 2.1.2 Verkehrsmittel..... | 8 |
| 2.2 Eingliederung in das Energiesystem..... | 15 |
| 2.2.1 Tankstellen- und Ladeinfrastruktur..... | 16 |
| 2.2.2 Übertragungs- und Verteilnetz..... | 19 |
| 2.2.3 Umwandlungsprozesse..... | 20 |
| 2.2.4 Primärenergieträger..... | 22 |
| 2.2.5 Sektorenkopplung..... | 23 |
| 2.3 Trends im Verkehrssektor..... | 23 |
| 2.3.1 Modaler Shift..... | 23 |
| 2.3.2 Kraftstoffwechsel und Netzintegration von Batteriefahrzeugen..... | 24 |
| 2.3.3 Shared Mobility..... | 24 |
| 2.3.4 Automatisierte und vernetzte Fahrzeuge..... | 25 |
| 3 Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors..... | 27 |
| 3.1 Verkehrsnachfragemodellierung..... | 27 |
| 3.2 Energiebedarfsmodellierung der Verkehrsmittel..... | 29 |
| 3.3 Techno-ökonomische Modellierung auf Verkehrsmitteln..... | 31 |
| 3.3.1 Herstellungskosten..... | 32 |
| 3.3.2 Wartungskosten..... | 33 |
| 3.3.3 Kraftstoffkosten..... | 34 |
| 3.3.4 Studien auf Fahrzeugebene..... | 36 |
| 3.4 Modellierung auf sektoraler Ebene..... | 41 |
| 3.4.1 ASIF-Methode..... | 41 |
| 3.4.2 Modellklassen..... | 42 |

| | |
|---|-----|
| 3.4.3 Räumlich-zeitliche Eigenschaften der Modelle | 43 |
| 3.4.4 Verkehrsmittel, Antriebe und Kraftstoffe | 46 |
| 3.4.5 Szenarien für den deutschen Verkehrssektor | 50 |
| 3.5 Auswirkungen von Mobilitätstrends auf die Emissionsmodellierung | 55 |
| 3.5.1 Modaler Shift | 55 |
| 3.5.2 Kraftstoffwechsel | 56 |
| 3.5.3 Shared Mobility | 57 |
| 3.5.4 Automatisiertes Fahren und Vehicle-to-X | 58 |
| 3.6 Einbezug der Mobilitätstrends in Modellen | 59 |
| 3.6.1 Modaler Shift | 60 |
| 3.6.2 Kraftstoffwechsel | 61 |
| 3.6.3 Shared Mobility und automatisiertes Fahren | 65 |
| 3.6.4 Vergleich der Trends | 67 |
| 3.7 Erkenntnisse für diese Arbeit | 68 |
| 4 Methodischer Ansatz | 71 |
| 4.1 Fahrzeugebene | 72 |
| 4.1.1 Segmentierung der Verkehrsmittel | 73 |
| 4.1.2 Konfiguration der Verkehrsmittel | 75 |
| 4.1.3 Berechnung des Energiebedarfs | 80 |
| 4.1.4 Total Cost of Ownership | 85 |
| 4.1.5 Validierung | 92 |
| 4.2 Sektorebene | 94 |
| 4.2.1 Allgemeiner Ansatz | 94 |
| 4.2.2 Verkehrsnachfrage | 97 |
| 4.2.3 Verkehrsmittel | 105 |
| 4.2.4 Versorgungsinfrastruktur | 107 |
| 4.2.5 Energieumwandlung und Primärenergieträger | 112 |
| 4.2.6 Validierung | 115 |
| 5 Szenarien | 118 |
| 5.1 Fahrzeuganwendungen | 118 |
| 5.1.1 Personenkraftwagen | 118 |
| 5.1.2 Busse | 119 |
| 5.1.3 Nutzfahrzeuge | 120 |
| 5.2 Szenarien des Verkehrssektors | 121 |
| 5.2.1 Sozio-ökonomische Szenarien | 121 |
| 5.2.2 Techno-ökonomische Szenarien | 123 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6 | Techno-ökonomische Analyse von Verkehrsmitteln | 126 |
| 6.1 | Personenkraftwagen | 126 |
| 6.1.1 | Durchschnittlicher Mittelklasse-Pkw | 126 |
| 6.1.2 | Stadtfahrzeug | 129 |
| 6.1.3 | Langstreckenfahrzeug | 130 |
| 6.1.4 | SUV inklusive Anhängerbetrieb | 131 |
| 6.2 | Busse | 132 |
| 6.2.1 | Stadtbus | 132 |
| 6.2.2 | Überlandbus | 134 |
| 6.2.3 | Reisebus | 135 |
| 6.3 | Nutzfahrzeuge | 136 |
| 6.3.1 | Sattelzugmaschine im Fernlastverkehr | 136 |
| 6.3.2 | Urbanes Lieferfahrzeug | 138 |
| 6.3.3 | Abfallsammelfahrzeug | 139 |
| 6.4 | Intermodaler Vergleich | 141 |
| 6.4.1 | Energetischer Vergleich | 142 |
| 6.4.2 | Ökonomischer Vergleich | 147 |
| 6.5 | Einflussfaktoren der techno-ökonomischen Entwicklung | 152 |
| 6.5.1 | Weltmarkt | 152 |
| 6.5.2 | Lernrate | 153 |
| 6.5.3 | Komponentenkosten | 154 |
| 6.5.4 | Reichweite und Jahresfahrleistung | 155 |
| 6.5.5 | Entwicklung des Energiebedarfs | 158 |
| 6.5.6 | Ladeinfrastruktur | 159 |
| 6.5.7 | Kraftstoffkosten | 160 |
| 6.6 | Vergleich mit der Literatur | 161 |
| 6.6.1 | Personenkraftwagen | 162 |
| 6.6.2 | Sattelzugmaschinen | 163 |
| 6.7 | Fazit der Fahrzeuganalysen | 164 |
| 7 | Szenariobasierte Analysen des Verkehrssektors | 169 |
| 7.1 | Basisszenario <i>StatusQuo-Reference</i> | 169 |
| 7.1.1 | Verkehrsmittel | 169 |
| 7.1.2 | Endenergiebedarf des Verkehrssektors | 189 |
| 7.1.3 | Lade- und Tankstelleninfrastruktur | 193 |
| 7.1.4 | Herstellung der Energieträger | 198 |
| 7.1.5 | Primärenergiebedarf | 198 |

| | |
|---|-----|
| 7.1.6 Treibhausgasemissionen der Verkehrsmittel | 200 |
| 7.1.7 Systemkosten | 203 |
| 7.2 Vergleich der Szenarien | 204 |
| 7.2.1 Verkehrsmittel | 204 |
| 7.2.2 Endenergiebedarf des Verkehrssektors | 211 |
| 7.2.3 Lade- und Tankstelleninfrastruktur | 214 |
| 7.2.4 Herstellung der Energieträger | 216 |
| 7.2.5 Primärenergiebedarf | 217 |
| 7.2.6 Systemkosten | 219 |
| 7.3 Sensitivitätsanalysen | 220 |
| 7.3.1 Internationaler Luft- und Seeverkehr | 221 |
| 7.3.2 Fahrzeugkosten | 224 |
| 7.3.3 Vehicle-to-Grid | 226 |
| 7.3.4 Ausbaustrategien der Ladeinfrastruktur | 228 |
| 7.3.5 Verfügbarkeit der Energieträger | 231 |
| 7.4 Vergleich mit der Literatur | 233 |
| 7.4.1 Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand | 234 |
| 7.4.2 Energiebedarf des Verkehrssektors | 236 |
| 7.5 Fazit der Transformationsanalysen des Verkehrssektors | 238 |
| 8 Diskussion | 241 |
| 9 Zusammenfassung | 244 |
| Anhang | 249 |
| A Grundlagen des Verkehrssektors | 249 |
| B Grundlegende Datenquellen zum deutschen Verkehrssektor | 250 |
| C Modellierungskonzepte zur Analyse des Verkehrssektors | 255 |
| D Methodischer Ansatz | 258 |
| E Szenarioannahmen | 276 |
| F Techno-ökonomische Fahrzeuganalysen | 279 |
| G Szenariobasierte Analysen des Verkehrssektors | 281 |
| Abbildungsverzeichnis | 289 |
| Tabellenverzeichnis | 301 |
| Literaturverzeichnis | 303 |

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 653
ISBN 978-3-95806-802-5