

trans aktuell-Symposium Alternative Antriebe ...

FE-Zahl – Entwicklung und Anwendung einer Kennzahl zur Beurteilung der Effizienz alternativer Antriebe

Prof. Dr.-Ing. K.-P. Franke

Überlingen, den 20. Juni 2018

Übersicht

1. Einführung
2. Forschungsfrage
3. Formulierung FE-Zahl
4. Case Studies
5. Facit

Übersicht

1. Einführung

- Effizienz/ Nachhaltigkeit von Transportsystemen
- Alternative Antriebe zum Einsatz in Lkw
- Verbrauchsrechnung für konventionelle Lkw

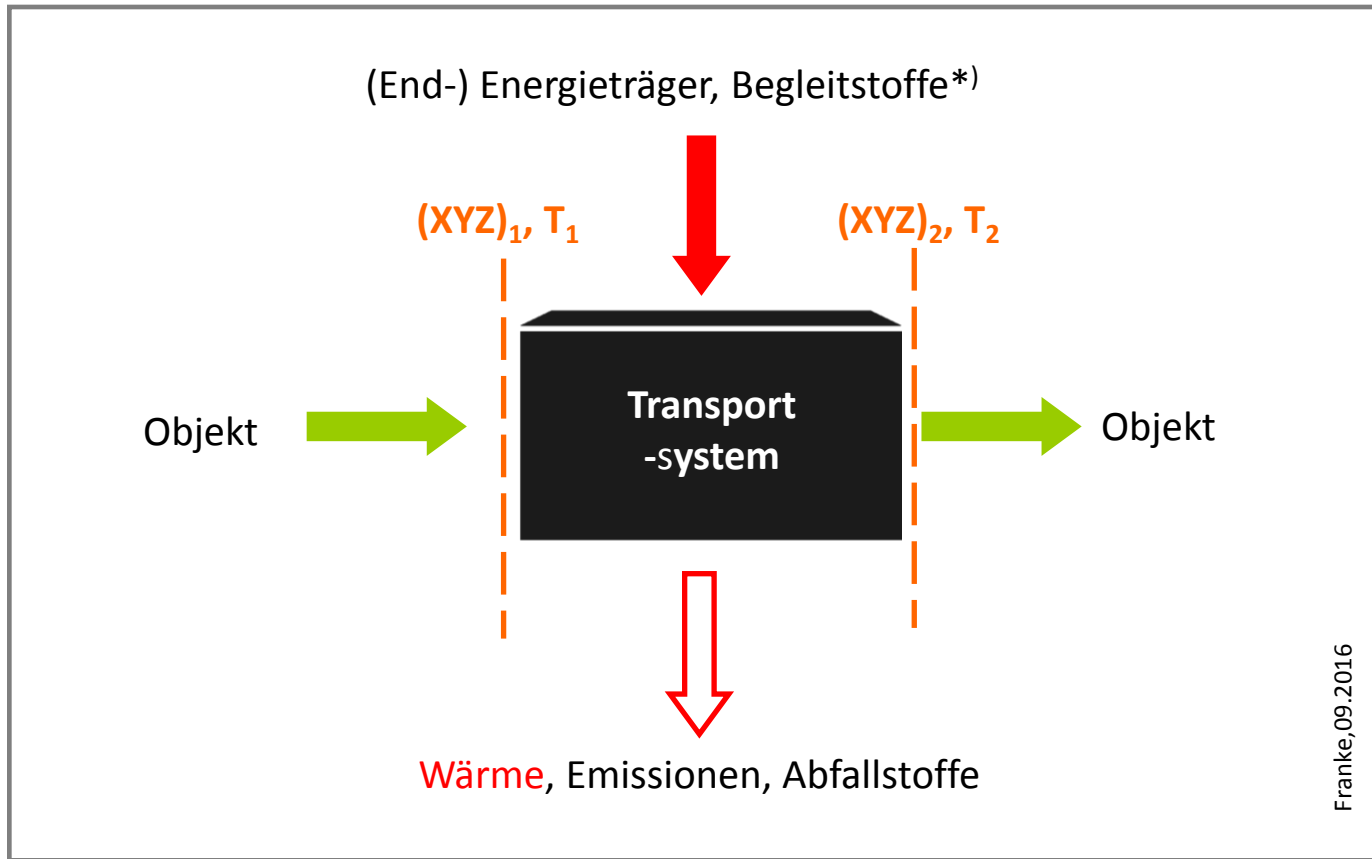
2. Forschungsfrage

3. Formulierung FE-Zahl

4. Case Studies

5. Facit

Objektveränderung in Raum und Zeit



Franke,09.2016

*) insbes. Verbrennungsluft

Transporteffizienz

Begriff etc.

$$\text{Transporteffizienz} = \text{Nutzen} / \text{Aufwand}$$

Aufwand: Int./ ext. Kosten, insbesondere Treib„stoff“kosten*)

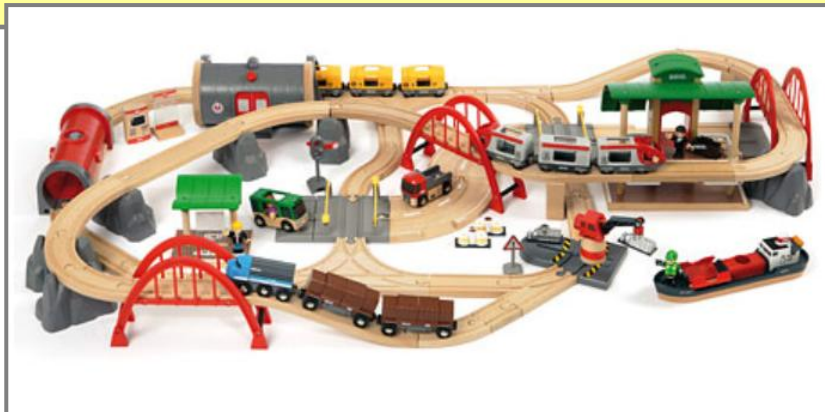
Nutzen: Transportleistung (tkm), Schnelligkeit (h)

*) Treib„stoff“ :

- fossil, regenerativ oder elektrischer Strom

Maßnahmen zur Erhöhung der Transporteffizienz

1. **Energieeffizientes/r Design/ Betrieb des Transportmittels**
d.h. möglichst geringer systembedingter Energiebedarf pro transportierter Tonne und km!
2. **Energieeffizienter Einsatz der Transportmittel**
d.h. möglichst geringer prozessbedingter mittlerer (Rundlauf!) Energiebedarf pro transportierter Tonne und km!
3. **Nutzung des Prinzips der Economies of Scale**
d.h. i.d.R. je größer die Kapazität von Ladegefäß bzw. Transportmittel, desto geringer der Aufwand je transportierte/ umgeschlagene Einheit



Steigerung der Transporteffizienz, Maßnahme 1

Energieeffizientes Design/ Betrieb des Transportmittels

Ziel: Möglichst geringer **systembedingter** Energiebedarf pro transportierte Tonne und km!

1.1 Hoher Konstruktionswirkungsgrad

=> Bei ausgelasteter Kapazität mögl. geringe Verluste durch die Bewegung von Totlast!

1.2 Geringe Beharrungswiderstandsbeiwerte

=> Mögl. geringe Wärmezeugung durch Rollreibung und/ bzw. Fluidreibung (Wasser, Luft)!

1.3 Hoher Wirkungsgrad von Motor und Triebwerk

=> Mögl. geringe Wärmezeugung bei der Umwandlung von End- in Nutzenergie!

=> Einsatzorientierte Abstimmung Motorkennfeld/ Triebwerk; Einsatz von Leichtlaufölen!?

1.4 Hohes Rekuperationspotential bei Lastwechseln

=> Rückgewinnung von kinetischer (/ potentieller) Energie statt Wärmezeugung!

1.5 Primärenergieeffizienter Treibstoff

=> Mögl. geringe Verluste von der Nutzbarmachung der Primärenergie bis zur Bereitstellung der Endenergie!

1.6 Energieeffizientes Fahren

=> Mögl. geringe Verluste durch vorausschauendes Fahren, Fahren im opt. Drehzahlbereich u. Vermeiden v. Idling

Übersicht

1. Einführung

- Effizienz/ Nachhaltigkeit von Transportsystemen
- **Alternative Antriebe zum Einsatz in Lkw**
- Verbrauchsrechnung für konventionelle Lkw

2. Forschungsfrage

3. Formulierung FE-Zahl

4. Case Studies

5. Facit

Alternative Antriebe zum Einsatz in Lkw

Fokus auf Wechsel des Energieträgers: Weg vom knappen u. umweltschädigenden Primärenergieträger Erdöl durch

- Einsatz alternativer Kraftstoffe (LNG, CNG, CO₂-neutrale synthetische Kraftstoffe) in ggf. zu modifizierenden Verbrennungsmotoren,
- Umstieg auf Elektromotorik, wobei die elektrische Energie während der Fahrt erzeugt (Brennstoffzellen), per Oberleitungen zugeführt oder in Batterien mitgeführt wird.

Übersicht

1. Einführung

- Effizienz/ Nachhaltigkeit von Transportsystemen
- Alternative Antriebe zum Einsatz in Lkw
- **Verbrauchsrechnung für konventionelle Lkw**

2. Forschungsfrage

3. Formulierung FE-Zahl

4. Case Studies

5. Facit

Energiebedarf

Mathematisches Modell

$$B = \int \frac{b_e}{\eta_{Int}} \cdot P \cdot dt$$

B = Verbrauch des Lkw in Litern Diesel

b_e = Spezifischer Verbrauch des Motors in Litern Diesel pro kWh
Energiebedarf an der Kurbelwelle

η_{Int} = Wirkungsgrad zw. Kurbelwelle und Rädern

P = Leistungsbedarf an den Rädern



siehe Spezifizierung!

$$B = \frac{\alpha_1 \cdot b_{e,opt}}{\eta_{Int}} \left[\alpha_2 \cdot \mu_r \cdot (m_{EG} + m_{NL}) \cdot g + 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot c_W \cdot \bar{v}^2 \right] \cdot s$$

Spezifizierung des Mathematischen Modells

$\alpha_1 = 1$ im optimalen Betriebspunkt

$$\int b_e \cdot dt = \alpha_1 \cdot b_{e,opt}$$

$$\int F_{mass} \cdot dt = \alpha_2 \cdot \mu_r \cdot (m_{EG} + m_{NL}) \cdot g$$

$$\alpha_2 = \frac{(a/g + \mu_r + I)}{\mu_r}$$

$$\int P \cdot dt = \int [F_{mass} + F_{aer}] \cdot v \cdot dt$$

$\alpha_2 = 1$ bei Fahrt mit konst. Geschwindigkeit auf ebener Strecke

$$B = \int \frac{b_e}{\eta_{Int}} \cdot P \cdot dt$$

$$\int v \cdot dt = \bar{v}$$

$$\int F_{aer} \cdot dt = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot (\bar{v} + \bar{v}_0)^2$$

Übersicht

1. Einführung
- 2. Forschungsfrage**
3. Modellbildung
4. Case Studies
5. Facit

Forschungsfrage

Erkenntnis: Der Vergleich unterschiedlicher Antriebskonzepte auf Basis individuell ermittelter Verbräuche ist wegen der Vielzahl an Parametern, die in die Rechnung eingehen, aufwändig.

Stellt sich die Frage, ob sich nicht speziell für den Fall „gleiche Fahrzeugplattform bei gleichen Einsatz- und Streckenparametern“ eine Kennzahl formulieren lässt, die eine schnelle Aussage zur Fahrzeugeffizienz (FE) bei Einsatz eines alternativen Antriebskonzepts erlaubt!



Übersicht

1. Einführung
2. Forschungsfrage
- 3. Formulierung FE-Zahl**
4. Case Studies
5. Facit

Entwicklung FE-Zahl 1/2

1. Verallgemeinerung des Berechnungsmodells

aus $B = \frac{\alpha_1 \cdot b_{e,opt}}{\eta_{Int}} \cdot [\bar{F}_{mass} + \bar{F}_{aer}] \cdot s$ in „L“ für Verbrennungsmotoren

mit $E_E = H_u \cdot B;$ mit H_u in „kWh/L“

$$b_{e,opt} = \frac{1}{\eta_{e,opt} \cdot H_u} = \frac{1}{\eta_{mot,opt} \cdot H_u}$$

$$\eta_{E-N,opt} = \eta_{mot,opt} \cdot \eta_{int} = \eta_{E-mot} \cdot \eta_{mot,opt} \cdot \eta_{mot-N}$$

folgt $E_E = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt}} \cdot [\bar{F}_{mass} + \bar{F}_{aer}] \cdot s$ in „kWh“ allgemeingültig

Entwicklung FE-Zahl 2/2

2. Einführung Spezifischer Energiebedarf e in kWh/tkm

$$E_E = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt}} \cdot [\bar{F}_{mass} + \bar{F}_{aer}] \cdot s$$

$$e_e = \frac{E_E}{m_{NL,zul} \cdot s} = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt} \cdot \eta_{kon}} \cdot \frac{[\bar{F}_{mass} + \bar{F}_{aer}]}{m_{ges,zul}}$$

mit $\eta_{kon} = \frac{m_{NL,zul}}{m_{ges,zul}}$

3. Einführung FE-Zahl

$$e_E = Fe \cdot \frac{[\bar{F}_{mass} + \bar{F}_{aer}]}{m_{ges,zul}}$$

dimensionslos

mit $Fe = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt} \cdot \eta_{kon}}$

Erläuterungen zur FE-Zahl

$$Fe = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt} \cdot \eta_{kon}}$$

Die Fahrzeugeffizienzzahl Fe ermöglicht einen (ersten) Vergleich von Antriebsvarianten bei im übrigen gleichen Fahrzeug- (insbes. Aerodynamik, Bereifung, zulässiges Gesamtgewicht) und Streckenparametern (insbes. Höhen-, Geschwindigkeitsprofil, Wetterverhältnisse).

Je kleiner Fe , desto niedriger der spezifische Energieverbrauch e_E bzw. desto höher die Fahrzeugeffizienz pro tkm.

Übersicht

1. Einführung
2. Forschungsfrage
3. Formulierung FE-Zahl
- 4. Case Studies**
5. Facit

Case Studies

Übersicht

Case Study 1: Fuso eCanter



Bildquelle: <https://www.ecanter.com/de/produkt.html>

Case Study 2: Tesla Semi



Bildquelle:
http://cdn2.autoexpress.co.uk/sites/autoexpressuk/files/styles/article_main_image/public/2018/01/screen-shot-2018-01-22-at-10.02.58.jpg?itok=dCys1zi-

Case Study 1

Fuso eCanter vs. Fuso FE 160 Canter

		A		B	
		Fuso FE 160 (Diesel)		Fuso eCanter	
$m_{Chassis}$	[t]	2,990	3)	3,410	3)
m_{Koffer}	[t]	0,865	2)	0,865	2)
$m_{Ladobarduc}$	[t]	0,300	2)	0,300	2)
m_{EG}	[t]	4,155		4,575	
$m_{NL,zul}$	[t]	3,335		2,915	
$m_{ger,zul}$	[t]	7,490	3)	7,490	3)
η_{kon}	[-]	0,45		0,39	
η_{E-mat}	[-]	1	1)	0,98	1)
η_{mat-N}	[-]	0,97	1)	0,98	1)
η_{int}	[-]	0,97		0,96	
$\eta_{e,opt}$	[-]	0,39	1)	0,95	1)
$\eta_{E-N,opt}$	[-]	0,38		0,91	
α_1	[-]	1,00		1,00	
Fe-Zahl	[-]	5,94		2,82	
BVA	[-]	0,47			

Anmerkungen:

- 1) Eigene realistische Annahmen
- 2) Angaben Fa. Orten für vergleichbares Fahrzeug
- 3) Literatur-Angabe [5]

$$Fe = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt} \cdot \eta_{kon}}$$

Ergebnis: Der eCanter benötigt nur etwa 50 % der Energie pro tkm wie sein dieselbetriebenes Pendant FE 160.

Annahme: $\alpha_{1A} \approx \alpha_{1B}$

Inkaufnahme: Reichweite B < A

Unberücksichtigt: Rekuperation B

Case Study 2.1

Tesla Semi vs. konventionellen Sattelzug

		A		B	
		Fiktiver konv. Sattelzug (Diesel)		Tesla eSemi	
m_{EG}	[t]	15,00	1)	27,14	
$m_{HL,zul}$	[t]	21,29		9,15	
$m_{gez,zul}$	[t]	36,29	←	36,29	2)
η_{kon}	[-]	0,59		0,25	
η_{E-mat}	[-]	1	1)	0,98	1)
η_{mat-N}	[-]	0,98	1)	0,98	3)
η_{int}	[-]	0,98		0,96	
$\eta_{o,opt}$	[-]	0,40	1)	0,95	1)
$\eta_{E-N,opt}$	[-]	0,39		0,91	
α_1	[-]	1,00		1,00	
Fe-Zahl	[-]	4,35	→	4,35	
B/A	[-]	1,00			

Anmerkungen:

- 1) Eigene realistische Annahmen
- 2) Literatur-Angabe [6]
- 3) Literatur-Angabe [17]

$$Fe = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt} \cdot \eta_{kon}}$$

Ergebnis: Der Break Even für den Verbrauch ergibt sich für $FE = 4,35$ bei einem Nutzlastanteil des Tesla Semi von 25 % bzw. einer max. Nutzlast von 9,15 t. Ist die zul. Nutzlast bei gleichem zul. Gesamtgewicht höher, verbraucht der Tesla Semi weniger Energie pro tkm als sein konventioneller Kollege.

Annahme: $\alpha_{1A} \approx \alpha_{1B}$

Unberücksichtigt: Rekuperation B

Case Study 2.2

Tesla Semi vs. konventionellen Sattelzug

		A		B	
		Fiktiver konv. Sattelzug (Diesel)		Tesla eSemi	
m_{Batt}	[t]			4,20	4)
m_{EG}	[t]	15,00	1)	19,20	5)
$m_{HL,zul}$	[t]	21,29		17,09	
$m_{ges,zul}$	[t]	36,29	←	36,29	2)
η_{kon}	[-]	0,59		0,47	
η_{E-mot}	[-]	1	1)	0,98	1)
η_{mot-N}	[-]	0,98	1)	0,98	3)
η_{int}	[-]	0,98		0,96	
$\eta_{e,opt}$	[-]	0,40	1)	0,95	1)
$\eta_{E-N,opt}$	[-]	0,39		0,91	
α_1	[-]	1,00		1,00	
Fe-Zahl	[-]	4,35		2,33	
EVA	[-]	0,54			

Anmerkungen:

- 1) Eigene realistische Annahmen
- 2) Literatur-Angabe [6]
- 3) Literatur-Angabe [17]
- 4) Eigene Berechnung
- 5) Annahme: $m_{EG,B} = m_{EG,A} + m_{Batt}$

$$Fe = \frac{\alpha_1}{\eta_{E-N,opt} \cdot \eta_{kon}}$$

Ergebnis: Unter der Annahme, dass das Eigengewicht des Tesla Semi um das geschätzte Gewicht der Batterie i.H. 4,2 t schwerer ist als das seines konv. Kollege, verbraucht der Tesla Semi knapp weniger als 50 % pro tkm als dieser.

Annahme: $\alpha_{1A} \approx \alpha_{1B}$

Inkaufn. reduz. Reichweite: 800 km

Unberücksichtigt: Rekuperation B

Übersicht

1. Einführung
2. Forschungsfrage
3. Formulierung FE-Zahl
4. Case Studies
5. **Facit**


Facit

1. Mit der FE-Zahl wurde eine Kennzahl entwickelt, die es erlaubt, bei gleicher Fahrzeugplattform und gleichen Einsatz- und Streckenparametern die Effizienz eines alternativen Antriebssystems zu beurteilen.
2. Exemplarisch wurde die Anwendung der FE-Zahl zur Beurteilung der Effizienz batterieelektrischer Antriebe in Verteiler- (Case Study 1) und Langstrecken-Lkw (Case Study 2) demonstriert.
3. Die FE-Zahl lässt sich selbstverständlich auch zur Beurteilung anderer alternativer Antriebe einsetzen!

Besten Dank für Ihre geschätzte Aufmerksamkeit!

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm
University of
Applied Sciences



Prof. Dr.-Ing.
Klaus-Peter Franke
Department of Manufacturing
Engineering & Management

Institute for Business
Operations and Logistics

Prittwitzstraße 10
89075 Ulm, Germany
Phone +49 (0)731/50-28296
Fax +49 (0)731/50-28458
franke@hs-ulm.de



Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm
University of
Applied Sciences



Prof. Dr.-Ing.
Klaus-Peter Franke
Fakultät Produktionstechnik
und Produktionswirtschaft

Institut für Betriebs-
organisation und Logistik

Prittwitzstraße 10
89075 Ulm
Tel. +49 (0)731/50-28296
Fax +49 (0)731/50-28458
franke@hs-ulm.de