

Kraftstoffmehrverbrauch durch Fahren mit eingeschaltetem Abblendlicht

Eric A. Müller

19. Juli 2001

Zusammenfassung

Dieser Text bildet die Dokumentation einer Studie, die im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BfE) am Institut für Mess- und Regeltechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich durchgeführt wurde. Inhalt der Studie war die Untersuchung der energetischen Auswirkungen des Fahrens mit eingeschaltetem Abblendlicht am Tag für heutige Automobile und im Hinblick auf zukünftige technische Entwicklungen.

Die Ergebnisse einer einfachen Mittelwertrechnung werden mit den Resultaten einer quasistationären Simulation verglichen. Für die Berechnung des Motorwirkungsgrades wird ein Willans-Ansatz verwendet. Der Wirkungsgrad des Generators wird aus einer Kennlinie gelesen. Weitere gemachte Annahmen und die verwendeten Parameterwerte sind aufgelistet. Verschiedene Fahrzyklen (ECE, EUDC, NEFZ, FTP75) werden untersucht.

Die Resultate der Mittelwertrechnung und der quasistationären Simulation zeigen, dass für heutige Automobile im Alltagsverkehr mit einem Kraftstoffmehrverbrauch von ca. 0.25 Litern pro 100 km zu rechnen ist. Dieser Wert wird für ein für Schweizer Verhältnisse durchschnittliches Fahrzeug berechnet. Die Art des Fahrzeugs spielt jedoch für den Mehrverbrauch nur eine untergeordnete Rolle. Für zukünftige Fahrzeuge wird sich dieser Mehrbedarf auf etwa die Hälfte reduzieren lassen. Als Hauptursache dafür sind die verminderte Leistungsaufnahme der Lichter und ein verbesserter Generatorwirkungsgrad zu nennen.

1 Einleitung

Fahren mit Licht am Tag wird als eine Möglichkeit betrachtet, Unfälle im Strassenverkehr zu reduzieren. Diesem von zahlreichen Studien erhärteten Vorteil stehen einige Nachteile wie erhöhter Kraftstoffverbrauch, grösserer Glühbirnenverschleiss, aber auch Nachteile wie mögliche Ablenkung der Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer von Fussgängern und Motorradfahrern gegenüber.

Es soll hier darauf hingewiesen werden, dass es nicht Ziel dieser Arbeit ist, ein abschliessendes Urteil zur genannten Problematik unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren auf volkswirtschaftlicher, ökologischer und ethischer Ebene zu fällen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Teile. In einem ersten Teil sollen die Auswirkungen des Fahrens mit Abblendlicht für ein für Schweizer Verhältnisse durchschnittliches Fahrzeug in Liter Kraftstoff pro hundert Kilometer Fahrstrecke

ermittelt werden. Basierend auf einfachen Annahmen wird eine erste Überschlagsrechnung gemacht. Diese einfache Kalkulation basiert auf Mittelwertbetrachtungen und dient als Anhaltspunkt. Ausgehend von diesem Resultat sollen weitere Einflussfaktoren in die Rechnung aufgenommen und die Rechnung verfeinert werden. Diese sukzessive Herleitung erhöht das Verständnis für die physikalischen Zusammenhänge und gibt aufschlussreiche Informationen über den Einfluss der einzelnen Faktoren (Sensitivitäten). Der berechnete Mehrverbrauch soll abschliessend anhand eines detaillierten Modells in einer quasistationären Rechnersimulation verifiziert werden.

Der zweite Teil befasst sich mit dem in Zukunft zu erwartenden Mehrverbrauch, hervorgerufen durch die Leistungsaufnahme des eingeschalteten Lichtes. Eine Analyse der laufenden technischen Entwicklungen insbesondere im Bereich Fahrzeugelektrik soll die zu erwartenden Änderungen und Verbesserungen aufdecken. Basierend auf dieser Analyse wird die im Teil I verfolgte Strategie der deduktiven Herleitung des Kraftstoffmehrverbrauchs wiederholt.

Die Angabe des Energieverbrauchs eines Fahrzeugs macht nur bei Spezifikation eines Fahrprofils Sinn. In dieser Studie werden generell zwei verschiedene Testzyklen betrachtet. Es wird der Mehrverbrauch im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), der in einen innerstädtischen (ECE) und einen Überlandteil (EUDC) aufgetrennt werden kann und im für die USA gebräuchlichen FTP75-Zyklus ermittelt.

2 Symbole und Akronyme

Die Symbole aller numerisch berechneten Resultate und eine Auflistung der wichtigsten im Text verwendeten Akronyme werden hier angeführt.

durchschnittliches Automobil

V_l	theoretischer zusätzlicher Benzinverbrauch
$V_{l_{eff}}$	V_l unter Einbezug der Wirkungsgrade
$V_{l_{eff,SA}}$	$V_{l_{eff}}$ unter Berücksichtigung von Schubabschalten

zukünftiges Automobil

V_l	entspricht $V_{l_{eff,SA}}$ bei durchschnittlichem Automobil
$V_{l_{SSA}}$	V_l unter Anwendung einer Start-Stopp-Automatik
E_{rek}	theoretisch maximal rekuperierbare Energie im NEFZ
$E_{rek_{eff}}$	effektiv rekuperierbare Energie im NEFZ
E_{el}	totaler elektrischer Energiebedarf im NEFZ
$P_{rek_{max}}$	maximale Rekuperationsleistung
$v_{rek_{max}}$	Geschwindigkeit bei maximaler Rekuperationsleistung
$I_{rek_{max}}$	maximaler Rekuperations-Ladestrom

CE	Combustion Engine
CVT	Continuously Variable Transmission
ECE	Economic Commission for Europe (Stadtteil vom NEFZ)
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
FTP	Federal Test Procedure
HFET	Highway Fuel Economy Test
QSS	Quasistationäre Simulation
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus (auch NEDC)
SA	Schubabschalten
SSA	Start-Stopp-Automatik

3 Kraftstoffmehrverbrauch für ein durchschnittliches Automobil

3.1 Mittelwertbetrachtung

Die Grundidee dieser Methode besteht darin, die bekannten physikalischen und mathematischen Zusammenhänge nicht zeitlich aufgelöst, sondern nur für Mittelwerte¹ zu betrachten.

Annahmen und Definitionen

Die Mittelwertbetrachtung wird nur für den NEFZ durchgerechnet. Dieser Zyklus ist in der Europäischen Union und der Schweiz Standard und kann daher als repräsentativ betrachtet werden. Die Durchschnittsgeschwindigkeit im NEFZ beträgt 33.6 km/h.

Da nicht alle Werte der zu berücksichtigenden Parameter bekannt oder offensichtlich sind, müssen zu Beginn der Abschätzung einige Annahmen getroffen werden. Die Annahmen beruhen entweder auf eigenen Überlegungen und Berechnungen oder wurden in einschlägiger Literatur nachgeschlagen. Im zweiten Fall sind jeweils die entsprechenden Referenzen angefügt.

Parameter	Symbol	Wert
Leistung Abblendlicht	P_l	165 W
Mittlerer Wirkungsgrad Generator	η_g	0.6
Relevanter Wirkungsgrad Ottomotor	η_{aux}	0.39 [7]
Heizwert Treibstoff	H	42.7 MJ/kg [3]
Dichte Treibstoff	ρ	745 kg/m ³ [3]
Mittlere Geschwindigkeit NEFZ	\bar{v}	9.33 m/s [13]
Schubabschaltphasen NEFZ	sa	13 %

Tabelle 1: Parameterdefinition für die Mittelwertrechnung

Bemerkung I: Der für die Rechnung relevante Wirkungsgrad des Ottomotors wird mittels eines Willans-Ansatzes bestimmt (vergleiche hierzu Anhang 6.2).

Bemerkung II: Die Leistung des Abblendlichtes setzt sich zusammen aus: Abblendlicht Front (2×55 W), Standlicht Front (2×10 W), Beleuchtung Heck (2×12 W), Kennzeichenbeleuchtung (1×10 W), Armaturenbeleuchtung (1×1 W).

Mittelwertrechnung

In einem ersten Schritt soll das "Leistungsäquivalent" des Abblendlichtes in Liter Kraftstoff pro 100 Kilometer Fahrstrecke ermittelt werden:

$$\text{Leistung Abblendlicht:} \quad P_l = 165 \text{ [W]}$$

$$\text{Energie:} \quad E_l = P_l \cdot t$$

¹Sofern nicht anders vermerkt, ist in dieser Arbeit mit Mittelwert immer der zeitliche Mittelwert gemeint: $\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$.

$$\begin{aligned}
\text{Energie pro Fahrstrecke:} \quad e_l &= \frac{P_l \cdot t}{s} \\
\text{Kilogramm Treibstoff pro Fahrstrecke:} \quad m_l &= \frac{P_l}{\bar{v} \cdot H} \\
\text{Liter Treibstoff pro Fahrstrecke:} \quad V_l &= \frac{P_l}{\bar{v} \cdot H \cdot \rho} \\
\text{numerisch:} \quad V_l &= \mathbf{0.056} \quad [\text{l}/100 \text{ km}]
\end{aligned}$$

Dieser Wert von 0.056 Litern Treibstoff pro hundert Kilometer Fahrstrecke wäre unrealistisch. Eine Berücksichtigung der Wirkungsgrade vom Verbrennungsmotor und vom Generator ergibt:

$$\begin{aligned}
\text{Effektiver Treibstoffverbrauch:} \quad V_{l_{eff}} &= \frac{P_l}{\bar{v} \cdot H \cdot \rho \cdot \eta_{aux} \cdot \eta_g} \\
\text{numerisch:} \quad V_{l_{eff}} &= \mathbf{0.24} \quad [\text{l}/100 \text{ km}]
\end{aligned}$$

Bei Verzögerung und geschlossener Kupplung wirkt auf den Motor ein antreibendes Moment. Die Kraftstoffzufuhr kann in diesen Phasen unterbrochen werden (Schubabschalten). Nimmt man an, dass bei geschlossener Kupplung während allen Verzögerungsphasen im Fahrzyklus die Schubabschaltung aktiv wird, so kann obiges Resultat folgendermassen modifiziert werden:

$$\begin{aligned}
\text{Anteil Schubabschalten am Zyklus:} \quad sa &= 0.13 \\
\text{Effektiver Treibstoffverbrauch mit SA:} \quad V_{l_{eff,SA}} &= \frac{P_l \cdot (1 - sa)}{\bar{v} \cdot H \cdot \rho \cdot \eta_{aux} \cdot \eta_g} \\
\text{numerisch:} \quad V_{l_{eff,SA}} &= \mathbf{0.21} \quad [\text{l}/100 \text{ km}]
\end{aligned}$$

3.2 Quasistationäre Simulation

Mit quasistationären Simulationen (QSS) lassen sich insbesondere für dynamische oder nichtlineare Systeme im Vergleich zu Mittelwertrechnungen genauere Aussagen machen.

Grundprinzip

Der quasistationäre Ansatz betrachtet das System zeitlich aufgelöst. Das betrachtete Zeitintervall (die Schrittweite) wird im Unterschied zur dynamischen Simulation nicht infinitesimal klein gewählt. Die QSS führt eine einfache Trapez-Integration² mit meist konstanter Schrittweite durch.

² $\int_t^{t+h} x(t) dt = \frac{x(t+h) + x(t)}{2} \cdot h + o(h^2)$

Modellierung des Fahrzeugs

Die QSS beruht auf einer Inversion der gewohnten Kausalitätskette. Das physikalische Ursache-Wirkungsprinzip wird umgekehrt, indem Geschwindigkeiten vorgegeben und daraus Kräfte (dann Energien und Leistungen) berechnet werden.

Diesem Prinzip folgend, wird ein Fahrzeug, beziehungsweise dessen Antriebsstrang, in sequentiell angeordnete Module gegliedert (vergleiche Abbildung 1).

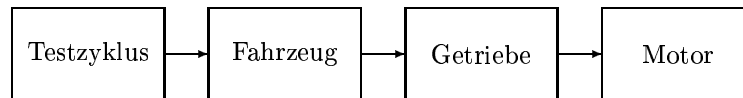


Abbildung 1: Prinzip der quasistationären Simulation

Am Anfang steht der *Testzyklus*. Hier wird der Geschwindigkeits- und Fahrstufenverlauf in Funktion der Zeit vorgegeben und der Beschleunigungsverlauf berechnet. Im Block *Fahrzeug* werden aus dem Geschwindigkeits- und dem Beschleunigungsverlauf die Fahrwiderstände abgeleitet und in Form des Radmomentes zusammen mit der Raddrehzahl an das *Getriebe* weitergegeben. Das *Getriebe* wandelt das Drehmoment und die Drehzahl entsprechend den Fahrstufen in ein Drehmoment und eine Drehzahl des *Verbrennungsmotors*. Dabei treten Reibungsverluste auf. Im Modul *Verbrennungsmotor* wird aus dem geforderten Drehmoment und der Drehzahl über den Wirkungsgrad der momentane Kraftstoffverbrauch berechnet. Aus dem aufintegrierten Kraftstoffverbrauch lässt sich bei bekannter Fahrstrecke der durchschnittliche Treibstoffverbrauch pro Kilometer ableiten.

Die Simulation berücksichtigt Schubabschalten und berechnet den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors nach einem Willans-Ansatz. Der Wirkungsgrad des Generators wird aus einer Kennlinie gelesen (vergleiche hierzu Anhang 6.2 und 6.3).

Definition der Fahrzeugparameter

Zur Charakterisierung eines Fahrzeugs müssen zahlreiche Parameter bekannt sein. Wie schon in der Einleitung erwähnt, sollen diese Werte ein für Schweizer Verhältnisse durchschnittliches Fahrzeug abbilden³. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Werte für die QSS aufgeführt (im Anhang 6.4 sind alle verwendeten Parameterwerte angegeben).

Parameter	Wert
Leistung Abblendlicht	165 W
Fahrzeugmasse	1300 kg
Rotationsmasse	130 kg
Stirnfläche	2.0 m ²
Luftwiderstandsbeiwert	0.33
Rollreibungskoeffizient	0.013
Heizwert Treibstoff	42.7 MJ/kg
Dichte Treibstoff	745 kg/m ³

Tabelle 2: Einige Parameter für die QSS

³Die Kenndaten entsprechen etwa den Werten eines VW Golf III, 2.0l (115 PS).

Resultate

Die QSS wird für vier verschiedene Fahrzyklen (ECE, EUDC, NEFZ, FTP75) durchgeführt (detaillierte Angaben zu den Fahrzyklen finden sich im Anhang 6.1). Es ergeben sich die in Tabelle 3 angegebenen Verbrauchswerte in l/100 km. Abbildung 2 zeigt das anschauliche graphische Pendant.

Testzyklus	Gesamtverbrauch	Gesamtverbrauch mit Abblendlicht	Mehrverbrauch durch Abblendlicht
ECE	10.84	11.21	0.37 (3.4 %)
EUDC	7.20	7.32	0.12 (1.7 %)
NEFZ	8.54	8.75	0.21 (2.5 %)
FTP75	8.52	8.77	0.25 (2.9 %)

Tabelle 3: Kraftstoffverbräuche in l/100 km für verschiedene Testzyklen

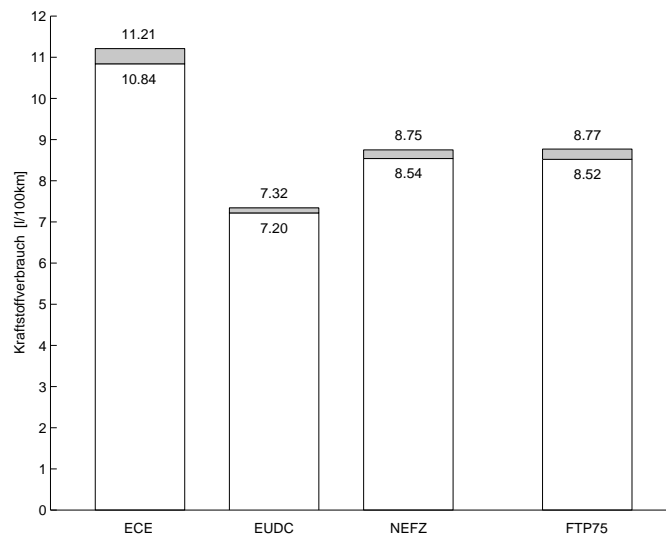


Abbildung 2: Gesamtverbrauch mit und ohne Abblendlicht

Der für den NEFZ ermittelte Mehrverbrauch stimmt auf zwei signifikante Stellen mit dem Wert aus der Mittelwertrechnung überein.

3.3 Diskussion

Sowohl die Mittelwertrechnung als auch die QSS zeigt, dass im NEFZ mit einem Mehrverbrauch von 0.21 Litern Kraftstoff pro 100 km gerechnet werden muss. Gemessen am ermittelten Gesamtverbrauch entspricht dies einem Mehrverbrauch von 2.5 %.

Der hohe Mehrverbrauch im ECE ist auf die kleine Durchschnittsgeschwindigkeit in diesem Zyklus zurückzuführen.

Zu beachten ist, dass der ECE-Anteil im realen Strassenverkehr etwas höher liegt als im NEFZ. Der durchschnittliche Alltagsverbrauch beträgt daher etwa 120-130 % des im NEFZ ermittelten Wertes [6]. Im Strassenverkehr ist daher ein Kraftstoffmehrbedarf von etwa 0.25 Litern pro 100 km zu erwarten.

Sensitivitätsbetrachtung

Der Mehrverbrauch durch eingeschaltetes Abblendlicht ist nicht vom Gesamtverbrauch des Fahrzeugs abhängig. Er hängt hauptsächlich vom Wirkungsgrad des Generators η_g und vom relevanten Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors η_{aux} ab. Eine Sensitivitätsanalyse soll sich daher auf entsprechende Parameter beschränken.

Die Sensitivität ist für beide Wirkungsgrade identisch:

$$\Delta V[\%] = -100 \cdot \frac{\Delta \eta[\%]}{100 + \Delta \eta[\%]}.$$

Nebenstehende Abbildung zeigt den Verlauf der Sensitivitätsfunktion für relative Änderungen $\Delta \eta \in [-50\%, 50\%]$.

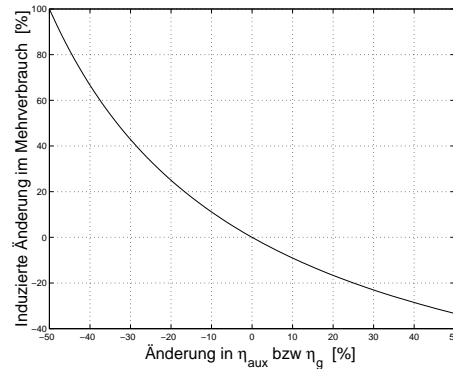


Abbildung 3: Sensitivität $\Delta V = f(\Delta \eta)$

Sowohl η_g als auch η_{aux} sind von der Motordrehzahl abhängig. Die Drehzahlabhängigkeit des Generatorwirkungsgrades ist im Anhang 6.3 abgebildet. Ab einem Schwellenwert nimmt der Wirkungsgrad mit steigender Drehzahl monoton ab. Die Drehzahlabhängigkeit von η_{aux} ist nicht ausgeprägt. η_{aux} variiert zwischen 0.36 und 0.40 [7].

Bemerkung: Eine sportliche Fahrweise in höheren Drehzahlbereichen dürfte den durch die Lichter hervorgerufenen Mehrverbrauch leicht erhöhen.

4 Kraftstoffmehrverbrauch für ein zukünftiges Automobil

4.1 Technische Entwicklungen

Im Zusammenhang mit dem Kraftstoffmehrverbrauch durch eingeschaltetes Licht sind insbesondere die Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugelektrik und der Energierückgewinnung interessant.

42 Volt Bordnetz

Die Notwendigkeit einer weiteren Verbesserung der Fahrzeuge bezüglich Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemission bei gleichzeitiger Erhöhung von Fahrkomfort und Fahrsicherheit führt zu einem starken Anstieg des Energiebedarfs durch elektrische Verbraucher. Ein Entwurf einer Bordnetzarchitektur, die neben der Optimierung der Leistungsausnutzung durch die Verbraucher auch den Wirkungsgrad bei der Erzeugung und der Verteilung der elektrischen Energie im Fahrzeug verbessert, scheint unumgänglich. In den nächsten Jahren wird daher ein Wechsel von der konventionellen 12 Volt Anlage zu einer kombinierten 12 V/42 V Anlage erwartet. Gegen Ende des Jahrzehnts soll eine reine 42 Volt Spannungsversorgung die elektrische Energie im Fahrzeug bereitstellen.

Die Einführung des 42 V Standards ermöglicht eine Verbesserung des Wirkungsgrades der Stromerzeugung, eine Reduktion der Verluste bei der Verteilung und erhöhter Wirkungsgrad bei den Verbrauchern.

Generatoren

Neue Generatoren auf 42 Volt Basis werden gegenüber konventionellen 14 Volt Alternatoren einen deutlich höheren Wirkungsgrad im gesamten Drehzahlbereich erreichen. Zudem werden diese leistungsstarken Generatoren, welche in den nächsten Jahren auf dem Markt erwartet werden, eine Reihe weiterer Funktionen übernehmen. Neben der klassischen Funktion der Stromerzeugung werden diese Systeme mit integrierter Drehstrom-Asynchron-Maschine beispielsweise die Aufgabe des Starters übernehmen. Durch die hohe Leistung kann der Verbrennungsmotor in kürzester Zeit auf Leerlaufdrehzahl gebracht werden, was die Implementierung einer Start-Stopp-Automatik ermöglicht. Der Generator kann zudem als Hilfsantrieb (minimal-Hybrid) oder zur Rekuperation von Bremsenergie eingesetzt werden. Die Generatorenleistung von 6 - 8 kW wird dabei bei einer Bordnetzspannung von 42 V zu Spitzenströmen von über 150 A führen.

Start-Stopp-Automatik

Die Start-Stopp-Automatik beruht auf dem Einsatz leistungsstarker Anlasser, die den Verbrennungsmotor in kürzester Zeit auf Leerlaufdrehzahl bringen können. Das System schaltet den Verbrennungsmotor bei Nulllast ab und startet ihn automatisch bei erneuter Betätigung des Gaspedals. Damit entfallen die Leerlaufverbräuche; hingegen muss zusätzliche Energie für das Hochdrehen des Verbrennungsmotors aufgewendet werden.

Rekuperation

Rekuperation bezeichnet die Rückgewinnung der kinetischen Energie beim Bremsvorgang. Es sind prinzipiell zwei Systeme denkbar:

- 1) Die mechanische Energie wird in elektrische Energie gewandelt und in Batterien oder Superkondensatoren gespeichert.
- 2) Die Bremsenergie wird in kinetischer Energie eines Schwungrades gespeichert.

Die erste Methode setzt das Vorhandensein eines Elektromotors bzw. Generators voraus. Die zweite Technik funktioniert nur in Kombination mit einem CVT-Getriebe.

Automatische Fahrlichtschaltung

Die automatische Fahrlichtschaltung stellt eine Alternative zum Tagfahrlicht dar. Ein solches System verarbeitet Signale verschiedener Lichtsensoren und weitere Informationen wie zum Beispiel die Fahrgeschwindigkeit. Damit werden Fahrsituationen wie Tag, Dämmerung, Dunkelheit, Tunneldurchfahrt usw. ermittelt, um daraus automatisch ein sinnvolles Schaltverhalten des Lichtes zu bestimmen. Die Sichtbarkeit des Fahrzeugs ist somit insbesondere in kritischen Situationen gewährleistet.

Xenonleuchten

In der Fahrzeugbeleuchtung wird heute zunehmend auf Xenonlicht gesetzt. Scheinwerfer mit Xenonlicht zeichnen sich durch eine dem Tageslicht ähnliche Lichtfarbe aus. Zudem sind sie bis 2.5 mal so leistungsfähig wie Halogenlicht, bei einer um etwa 30 % verminderten Leistungsaufnahme und längerer Lebensdauer.

4.2 Mittelwertbetrachtung

Die Mittelwertrechnung für zukünftige Fahrzeuge benötigt einige zusätzliche Parameter. In Tabelle 4 sind alle relevanten Werte aufgelistet.

Die Leistung des Lichtes wird für zukünftige Systeme auf 90 Watt geschätzt. Diese Annahme beruht auf der Berücksichtigung der verminderten Leistungsaufnahme von Xenonlampen und dem Einsatz von speziellen Tagfahrlichtern, die ohne Standlicht, Kennzeichen- und Armaturenbeleuchtung betrieben werden können.

Der mittlere Wirkungsgrad des Generators wird auf 0.8 geschätzt. Dieser Wert liegt etwas unter den prognostizierten Herstellerangaben [12].

Parameter	Symbol	Wert
Leistung Taglicht	P_l	90 W
Mittlerer Wirkungsgrad Generator	η_g	0.8
Relevanter Wirkungsgrad Ottomotor	η_{aux}	0.39 [6]
Mittlerer Wirkungsgrad Rekuperation	η_{rek}	0.5 [6]
Mittlerer Wirkungsgrad Batterie	η_b	0.8 [6]
Fahrzeugmasse	m_{fzg}	1300 kg
Rotationsmasse	m_{rot}	130 kg
Dichte Luft	ρ_l	1.18 kg/m ³ [3]
Stirnfläche	A	2.0 m ²
Luftwiderstandsbeiwert	c_w	0.33
Rollreibungskoeffizient	c_r	0.013 [3]
Gravitationskonstante	g	9.81 m/s ²
Heizwert Treibstoff	H	42.7 MJ/kg [3]
Dichte Treibstoff	ρ	745 kg/m ³ [3]
Mittlere Geschwindigkeit NEFZ	\bar{v}	9.33 m/s [13]
Zyklusdauer NEFZ	T	1180 s [13]
Schubabschaltphasen NEFZ	sa	13 %
Leerlaufphasen NEFZ	ssa	27 % [13]
Totaler elektrischer Leistungsbedarf	P_{el}	4000 W [8]
Bordnetzspannung	U	42 V

Tabelle 4: Parameterdefinition für die Mittelwertrechnung

Ausgangspunkt dieser Mittelwertbetrachtung bildet das Resultat aus Kapitel 3.1, wobei hier für den Generatorwirkungsgrad und die Leistung des Lichtes die Werte aus Tabelle 4 eingesetzt werden.

$$\text{Treibstoffverbrauch:} \quad V_l = \frac{P_l \cdot (1 - sa)}{\bar{v} \cdot H \cdot \rho \cdot \eta_{aux} \cdot \eta_g}$$

$$\text{numerisch:} \quad V_l = \mathbf{0.08} \quad [\text{l}/100 \text{ km}]$$

Die verminderte Leistungsaufnahme des Lichtes, welche linear in das Resultat eingeht und der veränderte Wirkungsgrad des Generators reduzieren den Mehrverbrauch von 0.21 Liter pro 100 km (heutiges Automobil) auf 0.08 Liter pro 100 km.

Die Anwendung einer Start-Stopp-Automatik eliminiert den Kraftstoffverbrauch während den Leerlaufphasen. Da der Motor in dieser Zeit aber kein Moment liefert, muss der momentane Energiebedarf dann aus den Batterien gedeckt werden. Die Energie, die das Licht während den Leerlaufphasen konsumiert, muss zuvor

in den Batterien gespeichert werden. Dies resultiert in einer Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades und in einem erhöhten Leistungsbedarf während den Nicht-Leerlaufphasen.

Die Rechnung kann folgendermassen modifiziert werden:

$$\text{Anteil Leerlauf am Zyklus:} \quad ssa = 0.27$$

$$\text{Treibstoffverbrauch mit SSA:} \quad V_{l_{SSA}} = (1 - ssa) \cdot V_{l_{SSA}} + ssa \cdot \frac{V_{l_{SSA}}}{\eta_b}$$

$$\text{numerisch:} \quad V_{l_{SSA}} = 0.09 \quad [\text{l}/100 \text{ km}]$$

Will man den Einfluss einer Energierekuperation in die Rechnung einbeziehen, so reicht eine einfache Differenzbetrachtung nicht mehr aus.

Interessant ist zu untersuchen, wieviel Energie in einem Zyklus theoretisch maximal rekuperiert werden kann. Wird die rekuperierte Energie nicht für den Antrieb verwendet, und ist ihr Betrag grösser als die während des Zyklus gesamthaft benötigte elektrische Energie, so wird die Frage nach dem Mehrverbrauch durch eingeschaltetes Licht hinfällig, da sowieso ausreichend Energie vorhanden ist.

Die während des Zyklus maximal rekuperierbare Energie bestimmt sich aus der Summe der kinetischen Energien vor den Bremsphasen⁴ abzüglich der Verluste durch aerodynamischen Widerstand und Dissipation in den Reifen. Diese Verluste und andere "Nichtidealitäten" werden in der folgenden Rechnung in einem einzigen Faktor zusammengefasst.

Die kinetische Energie setzt sich aus Translationsenergie und Rotationsenergie zusammen:

$$\text{Translationsenergie:} \quad E_{trans} = \frac{m_{fzg}}{2} \cdot v^2$$

$$\text{Rotationsenergie:} \quad E_{rot} = \frac{\theta_r + i^2 \cdot \theta_m}{2} \cdot \omega_r^2$$

$$\text{Kinetische Energie:} \quad E_{kin} = E_{trans} + E_{rot},$$

wobei θ_r die Radträgheit, θ_m die Motortragheit und $i = \omega_m/\omega_r$ die totale Übersetzung des Antriebsstranges bezeichnet.

Für überschlagsmässige Rechnungen wird der Anteil der Rotationsenergie oft proportional zur kinetischen Gesamtenergie gesetzt [6]:

$$\text{Kinetische Energie:} \quad E_{kin} = \frac{m_{fzg} + m_{rot}}{2} \cdot v^2$$

Für den NEFZ und die in der Tabelle 4 angegebenen Massen m_{fzg} und m_{rot} ergibt sich dann:

$$\text{Rekuperierbare Energie:} \quad E_{rek} = \sum_k \frac{m_{fzg} + m_{rot}}{2} \cdot v_k^2$$

$$\text{numerisch:} \quad E_{rek} = 1750 \quad [\text{kJ}]$$

wobei mit k über alle Verzögerungsphasen summiert wird. Technisch erreichbar ist jedoch nur ein Teil dieser Energie. Berücksichtigt man einen Rekuperationswirkungsgrad, so ergibt sich:

⁴entspricht der gesamten für die Beschleunigung der Fahrzeugmasse aufgewendeten Energie

Effektiv rekuperierbare Energie: $E_{rek_{eff}} = \eta_{rek} \cdot E_{rek}$

numerisch: $E_{rek_{eff}} = 877 \text{ [kJ]}$

Dieser Wert ist mit dem totalen elektrischen Energieverbrauch des Fahrzeugs über die Zyklusdauer zu vergleichen. Für zukünftige Fahrzeuge wird ein elektrischer Leistungsbedarf von 4 kW angenommen [8].

Totaler el. Energiebedarf: $E_{el} = P_{el} \cdot T$

numerisch: $E_{el} = 4720 \text{ [kJ]}$

Die Rechnung zeigt, dass durch Rekuperation knapp 20 % der benötigten elektrischen Energie gedeckt werden kann.

Eine weitere wichtige Grösse ist die während des Zyklus auftretende maximale Rekuperationsleistung. Um die gesamte verfügbare Energie rekuperieren zu können, muss diese Leistung in entsprechende Energiespeicher abgeführt werden.

Die rekuperierbare Leistung berechnet sich aus der zeitlichen Änderung der kinetischen Energie des Fahrzeugs abzüglich der Verluste durch Luftwiderstand und Rollreibung:

$$\begin{aligned} P_{rek} = & -(m_{fzg} + m_{rot}) \cdot a \cdot v \\ & - \frac{1}{2} \cdot \rho_l \cdot A \cdot c_w \cdot v^3 \\ & - m_{fzg} \cdot g \cdot c_r \cdot v \end{aligned}$$

Eine notwendige Bedingung für ein Maximum in P_{rek} ergibt sich unter der Annahme einer konstanten Beschleunigung ($\frac{da}{dt} = 0$) durch Ableiten nach der Geschwindigkeit und anschliessendes Nullsetzen ($\frac{d}{dv}(P_{rek}) = 0$).

Damit lässt sich die zugehörige Geschwindigkeit und die maximal rekuperierbare Leistung $P_{rek_{max}}$ ermitteln. Für eine realistische Verzögerung⁵ von $a = -1 \text{ m/s}^2$ und den Werten aus Tabelle 4 ergibt sich:

Maximale Rekuperationsleistung: $P_{rek_{max}} = 27.7 \text{ [kW]}$

bei einer Geschwindigkeit von:

Zugehörige Geschwindigkeit: $v_{rek_{max}} = 118 \text{ [km/h]}$

Daraus ergibt sich unter Verwendung einer Bordspannung von 42 Volt ein maximaler Ladestrom von:

Maximaler Ladestrom: $I_{rek_{max}} = \frac{P_{rek_{max}}}{U} = 660 \text{ [A]}$

Die maximale Rekuperationsleistung beträgt im NEFZ mehr als 300 % der Generatortornennleistung (6 - 8 kW). Für den ECE-Zyklus beträgt die maximale Rekuperationsleistung 10 kW bei einem Ladestrom von 244 A.

⁵entspricht etwa der letzten Verzögerungsphase im NEFZ

4.3 Diskussion

Die Rechnung der maximal rekuperierbaren Energie zeigt, dass auch in Zukunft der Energieverbrauch des Lichtes zu berücksichtigen ist. Mit einer Reduktion der benötigten Lichtleistung und dem höheren Wirkungsgrad des Generators lässt sich der Mehrverbrauch jedoch um mehr als 50 % reduzieren.

Die zweite Rechnung betreffend der maximal auftretenden Rekuperationsleistung zeigt, dass die Nennleistung des Generators deutlich überschritten wird. Es kann daher nur ein Teil der Energie rekuperiert werden.

5 Fazit

Der Einsatz von Abblendlichtern am Tag ist mit einem Kraftstoffmehrverbrauch verbunden. Für heutige Fahrzeuge muss im Alltagsverkehr mit einem Mehrbedarf von etwa 1/4 Liter Treibstoff pro 100 km Fahrstrecke gerechnet werden. In zukünftigen Systemen dürfte sich dieser Wert auf knapp die Hälfte reduzieren.

Literatur

- [1] ATZ, Sept. 1999, Automobiltechnische Zeitschrift, 101.
- [2] BfU, 1999, Fahren mit Licht am Tag, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Bern.
- [3] BOSCH, Sept. 1995, Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 22. Auflage, Robert Bosch GmbH, Stuttgart.
- [4] EBERLE M.K., 2000, Ökologische Aspekte der individuellen Mobilität, Institut für Energietechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- [5] Feb. 1996, Positionspapier des Forums "Bordnetzarchitektur", Eine Initiative der Firmen AUDI, BMW, Mercedes Benz, Opel, Porsche, VW in Zusammenarbeit mit der Sican Hannover.
- [6] GUZZELLA, L., 1999, Fahrzeugantriebssysteme, Institut für Energietechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- [7] GUZZELLA, L., ONDER, CH., 2000, Modeling and Control of IC Engine Systems, Institut für Mess- und Regeltechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- [8] HARMS, K., März 2001, Perspectives In Automotive Control, Robert Bosch GmbH, Stuttgart.
- [9] HELLA, Kfz-Beleuchtung, Scheinwerfer, Hella KG Hueck & Co.
- [10] LMS, 1999, QSS-Toolbox, Labor für Motorsysteme, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.
- [11] SACHS, 1999, IAA 1999, Sachs DynaStart, Sachs AG Presse-Info, Schweinfurt.
- [12] SIEMENS, Sept. 1999, Blickpunkt IAA'99, Starter-Generator auf 42-Volt-Basis, SIEMENS Press, München.
- [13] SOLTIC, P., 2000, Part-Load Optimized SI Engine Systems, *Diss. ETH Nr. 13942*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich.

6 Anhang

6.1 Fahrzyklen

Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)

Der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) setzt sich aus vier identischen, aufeinanderfolgenden Stadtzyklen (ECE) und dem Extra Urban Driving Cycle (EUDC) zusammen. Für Fahrzeuge mit manueller Schaltung wird zudem die Fahrstufe vorgegeben. In Abbildung 4 ist das Geschwindigkeitsprofil graphisch dargestellt, Tabelle 5 zeigt die wichtigsten Daten.

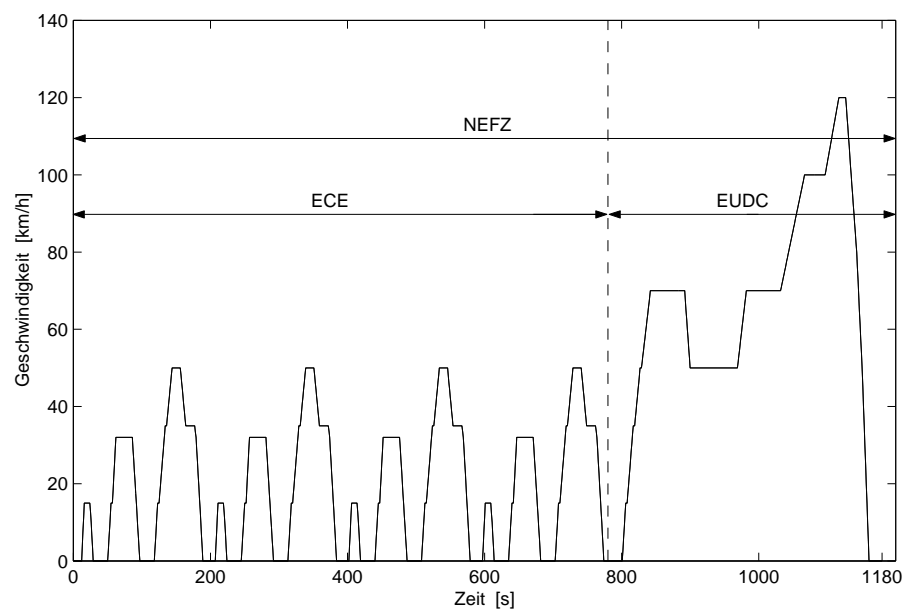


Abbildung 4: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ

Kennzahl	ECE	EUDC	NEFZ
Dauer [s]	780	400	1180
Distanz [km]	4.052	6.955	11.007
Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	18.7	62.6	33.6
Leerlaufanteil [%]	36	10	27

Tabelle 5: Wichtige Daten des NEFZ

Federal Test Procedure (FTP)

Der FTP-Fahrzyklus besteht aus einem Stadtteil (FTP75) und einem Highway-Zyklus (HFET). In Abbildung 5 ist das Geschwindigkeitsprofil graphisch dargestellt, Tabelle 6 zeigt die wichtigsten Daten.

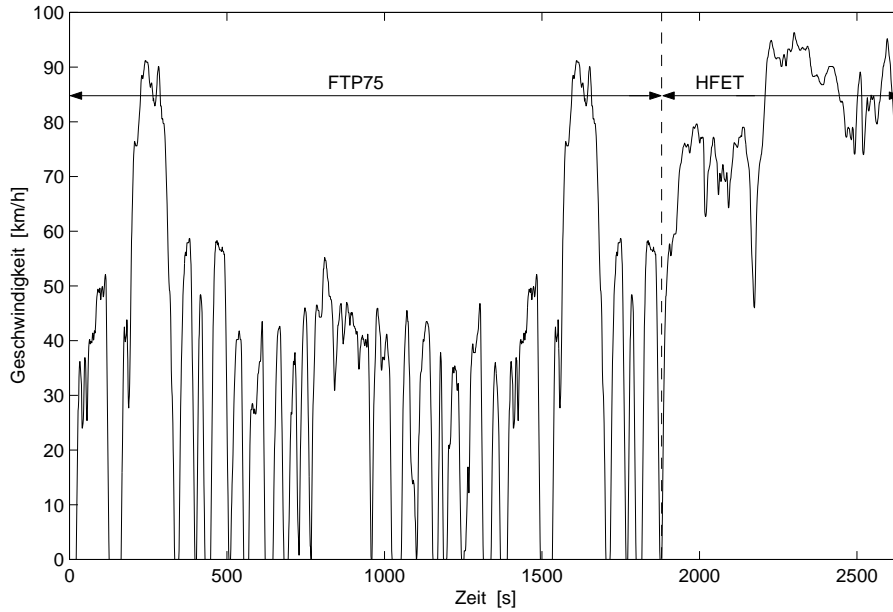


Abbildung 5: Geschwindigkeitsprofil des FTP

Kennzahl	FTP75	HFET	total
Dauer [s]	1877	765	2642
Distanz [km]	17.8	16.5	34.3
Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]	34.1	77.4	46.7
Leerlaufanteil [%]	22	1	16

Tabelle 6: Wichtige Daten des FTP

6.2 Wirkungsgrad Verbrennungsmotor

Zur Berechnung des Motorwirkungsgrades wird ein Willans-Ansatz verwendet:

$$p_{me} = e \cdot p_{m\varphi} - p_{A0},$$

wobei p_{me} für "break mean effective pressure" und $p_{m\varphi}$ für "fuel mean effective pressure" steht. In Abbildung 6 ist dieser affine Zusammenhang graphisch dargestellt. Die Willans-Parameter sind mit e beziehungsweise p_{A0} bezeichnet. Der Parameter p_{A0} beschreibt die Verluste (hauptsächlich bedingt durch Reibung und Gaswechsel) und e repräsentiert die thermodynamischen Eigenschaften des Motors.

Der Wirkungsgrad ist dann wie folgt definiert:

$$\eta_{ce} = \frac{p_{me}}{p_{m\varphi}} = \frac{p_{me} \cdot e}{p_{me} + p_{A0}}, \quad p_{me} = \frac{4\pi \cdot T_{ce}}{V_h}, \quad p_{m\varphi} = \frac{H \cdot m_{\varphi}}{V_h},$$

wobei η_{ce} für den Motorwirkungsgrad, T_{ce} für das Lastmoment, V_h für den Hubraum, H für den Heizwert des Treibstoffs und m_{φ} für die Kraftstoffmasse steht.

Der Parameter e wurde als konstant angenommen. Der Reibungsanteil p_{A0} wurde in Abhängigkeit der Drehzahl (ETH-Modell) bestimmt [7].

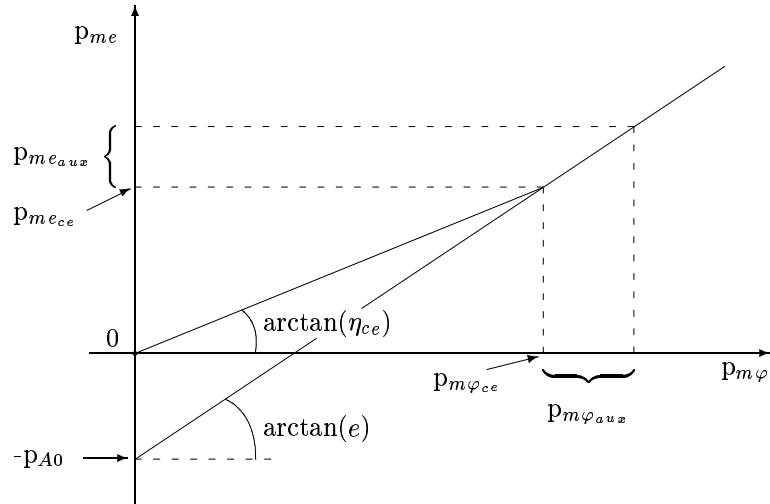


Abbildung 6: Willans-Ansatz

Wirkungsgrad in der Quasistationären Simulation

Abbildung 7 zeigt den Verlauf des Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors in Funktion des Lastmomentes und der Drehzahl für $e = 0.39$ und p_{A0} aus dem ETH-Modell.

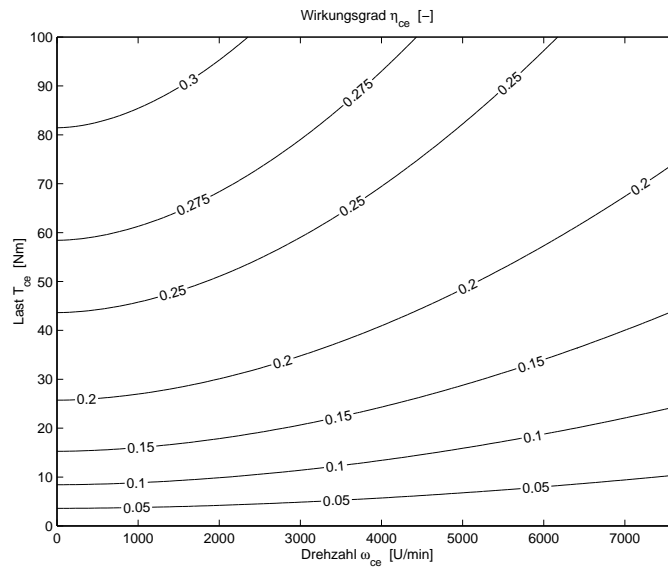
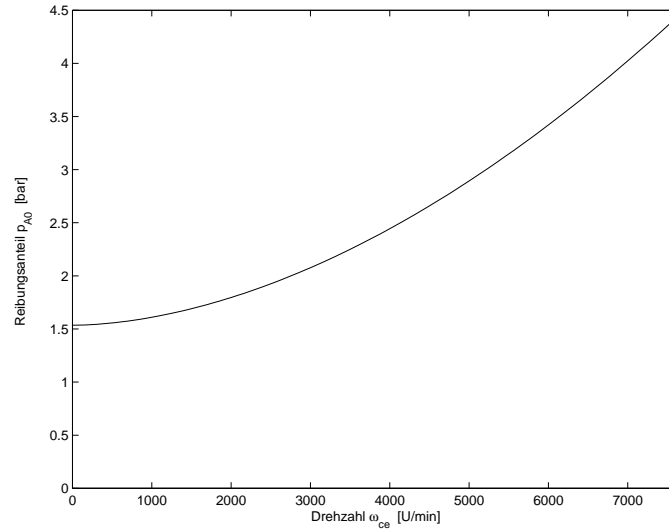


Abbildung 7: Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors (Willans-Ansatz)

In Abbildung 8 ist der Reibungsanteil p_{A0} in Funktion der Drehzahl dargestellt.

Abbildung 8: ETH-Modell zur Berechnung von p_{A0}

Wirkungsgrad für die Mittelwertrechnung

Das zusätzliche Lastmoment resultiert in einem höheren Kraftstoffverbrauch. Wie aus Abbildung 6 ersichtlich, ist für zusätzlich bezogene Leistung aber nicht der absolute Wirkungsgrad des Ottomotors (η_{ce}) relevant. Das Verhältnis $p_{me_{aux}}/p_{m\varphi_{aux}}$ wird durch den Parameter e bestimmt und ist somit grösser als der aktuelle Motorwirkungsgrad.

Bemerkung: Obiges Resultat entspricht der Tatsache, dass beim Willans-Ansatz folgender Zusammenhang gilt:

$$\frac{P_{ce} + P_{aux}}{\eta_{ce+aux}} = \frac{P_{ce}}{\eta_{ce}} + \frac{P_{aux}}{e},$$

wobei mit P die jeweilige Leistung gemeint ist.

6.3 Wirkungsgrad Generator

Der Wirkungsgrad des Generators wird in der Simulation aus einer Kennlinie gelesen. Die Kennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen Generator Drehzahl und Generatorwirkungsgrad.

In Abbildung 9 ist die in der QSS verwendete Kennlinie dargestellt. Das Übersetzungsverhältnis beträgt 3/1.

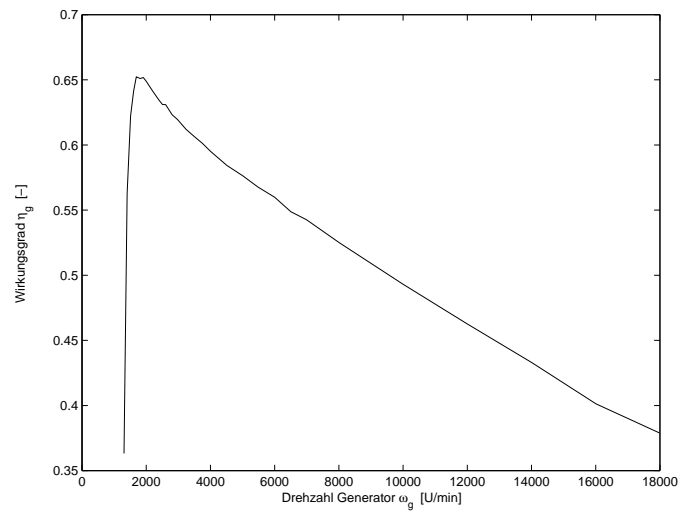


Abbildung 9: Wirkungsgrad des Generators

6.4 Simulationsparameter

Um die Simulationsergebnisse transparent zu halten, werden hier alle in der QSS verwendeten Parameter tabellarisch aufgelistet. Die Werte stammen aus den Quellen [6], [7], [3] oder wurden aus eigenen Abschätzungen abgeleitet.

Block	Parameter	Wert	
Fahrzeug	Masse	1300	kg
	Rotationsmasse	130	kg
	Stirnfläche	2.0	m ²
	Raddurchmesser	0.6	m
	Luftwiderstandsbeiwert	0.33	-
	Rollreibungskoeffizient	0.013	-
	Dichte Luft	1.18	kg/m ³
	Gravitationskonstante	9.81	m/s ²
Getriebe	Übersetzung Gang 1	3.45	-
	Übersetzung Gang 2	1.94	-
	Übersetzung Gang 3	1.29	-
	Übersetzung Gang 4	0.97	-
	Übersetzung Gang 5	0.80	-
	Übersetzung Differential	3.67	-
	Wirkungsgrad	0.94	-
Verbrennungsmotor	Reibungsverlust	200	W
	Zylinderzahl	4	-
	Hubraum	2.0	l
	Hub	93	mm
	Bohrung	83	mm
	Trägheitsmoment	0.3	kgm ²
	Willansparameter e	0.39	-
	Maximales Aufladungsverhältnis	1	-
	Gaswechselverluste	0.9	bar
	Reibungsmodell Parameter k_1	1.44	-
	Reibungsmodell Parameter k_2	0.464	-

Nebenaggregate	Reibungsmodell Parameter k_3	$9.1 \cdot 10^4$	-
	Reibungsmodell Parameter k_4	0.075	-
	Leerlaufmoment	0.1	Nm
	Leerlaufdrehzahl	855	U/min
	Moment Schubabschalten	-2	Nm
	Übersetzung Generator	3	-
	Zusätzliche elektrische Verbraucher	400	W
	Leistung Abblendlicht	165	W
	Mechanische Verbraucher	200	W
	Mechanischer Wirkungsgrad	0.7	-
Kraftstoff	Heizwert	42.7	MJ/kg
	Dichte	745	kg/m ³

Tabelle 7: Parameter für die QSS

Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BfE), durchgeführt am Institut für Mess- und Regeltechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH), Zürich.

Eric A. Müller, MAVT, Institut für Mess- und Regeltechnik, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, CH-8092 Zürich, Schweiz.
E-mail: ericm@student.ethz.ch