

**Eine Analyse kontemporärer
Eco-Feedbacks in Kraftfahrzeugen und
Entwicklung eines Eco-Feedback
Simulators**

STEFAN WASSERBAUER

DIPLOMARBEIT

eingereicht am
Fachhochschul-Masterstudiengang

INTERACTIVE MEDIA

in Hagenberg

im Juli 2011

© Copyright 2011 Stefan Wasserbauer

Diese Arbeit wird unter den Bedingungen der *Creative Commons Lizenz Namensnennung–NichtKommerziell–KeineBearbeitung Österreich* (CC BY-NC-ND) veröffentlicht – siehe <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/at/>.

Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus anderen Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Hagenberg, am 25. Juni 2011

Stefan Wasserbauer

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	iii
Kurzfassung	vi
Abstract	vii
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Motivationstechniken	2
1.2.1 Techniken zur Verhaltensänderung	2
1.3 Anforderungen an das Design von EcoFeedbacks	4
2 Verwandte Arbeiten	8
3 Kraftfahrzeugtechnische Grundlagen	17
3.1 Fahrwiderstände	17
3.2 Motorcharakteristika - Das Motorkennfeld	20
3.3 Berechnung von Verbrauch	22
3.3.1 Berechnung Energie Effizienz Zahl	23
4 Analyse verbrauchsrelevanter Faktoren	24
4.1 Gliederung und Diskussion der Einflussfaktoren	24
4.1.1 Einflussfaktoren Fahrzeug- und Motortechnik	24
4.1.2 Einflussfaktoren durch Fahr- und Betriebsweise	26
4.1.3 Kraftstoffverbrauchs senkendes Verhalten	29
5 Konzept	30
5.1 Informationsvisualisierung im Autointerieur	30
5.2 Papierprototyp	33
5.2.1 Instrumente und Szenario	33
5.2.2 Prototypevaluierung	36
5.3 Konzeptionierung	39
5.3.1 Grundmodell der Simulationsumgebung	39
5.3.2 Änderung getesteter EcoFeedbacks	40

5.3.3	Konzipierung neuer EcoFeedbacks	42
6	Implementierung	47
6.1	Simulator	47
6.2	Dashboard Applikation	49
6.3	Kraftfahrzeugtechnische Berechnungen	50
6.4	Dashboard Modul	54
7	Ausblick und Resümee	65
7.1	Zusammenfassung	65
7.2	Verbesserungsmöglichkeiten	65
7.2.1	Fahrsimulator-Hardware	65
7.2.2	Fahrsimulation	66
7.2.3	EcoFeedbacks	66
A	Technische Informationen	67
B	Inhalt der CD-ROM	69
B.1	Diplomarbeit	69
B.2	Implementierung	69
B.3	Online Quellen	69
B.4	Media	69
	Literaturverzeichnis	70

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden gegenwärtige EcoFeedbacks in Personenkraftwagen anhand einer implementierten Simulationsumgebung analysiert. Hierzu erfolgt eine Diskussion der angewandten Motivationstechniken, die die Grundlage für die Anforderungen an das Design von EcoFeedbacks bilden. Eine Erläuterung der kraftfahrzeugtechnischen Grundlagen der Kraftstoffverbrauchsrechnung bildet die Basis für die Analyse der Verbrauchsfaktoren sowie deren Berechnung. Um die Interaktion zwischen Fahrzeuglenker und EcoFeedback näher zu beleuchten, wird ein Papierprototyp realisiert und unterschiedliche EcoFeedbacks darin evaluiert. Die daraus resultierenden Erkenntnisse fließen in das Konzept der verbesserten EcoFeedbacks ein, die hinsichtlich unterschiedlicher Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch konzipiert werden. Um eine Simulationsumgebung zu schaffen, wird ein Fahrsimulator mit diversen Visualisierungsmöglichkeiten realisiert, der eine realitätsgetreue Simulation und Verbrauchsberechnung erlaubt.

Abstract

In this master's thesis, contemporary in-car EcoFeedbacks are analyzed using a simulation environment. A discussion of applied motivational techniques forms the basis for the design requirements of EcoFeedbacks. An explanation of the technical basics of calculating fuel economy in motor-vehicles is the basis for the analysis of consumption factors and their calculation. To take a closer look an the interaction between driver and EcoFeedback, a paper prototype is implemented and various EcoFeedbacks are evaluated. The resulting insights are incorporated into the concept of improved EcoFeedbacks, which are designed with regard to different factors that influence fuel consumption. To create a simulation environment, a driving simulator is implemented with a variety of visualization options, which allows a realistic simulation and consumption computation.

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation und Zielsetzung

In dieser Arbeit werden EcoFeedbacks in Personenkraftfahrzeugen behandelt, die den Fahrzeuglenker zu einer ökonomischen Fahrweise motivieren sollen. Ein drohender Klimawandel sowie steigende Kraftstoffpreise¹ und Knappheit der Ressourcen sind ein Teil der gegenwärtigen Herausforderungen, denen die heutige Gesellschaft gegenüberstehen. In der Folge erarbeitet die Autoindustrie neue sparsamere Automodelle, deren Verbrauch und CO_2 -Ausstoß gegenüber älteren Modellen drastisch gesenkt werden konnte. Hierzu bedarf es einer Beleuchtung aller Faktoren, die eine Kraftstoffersparnis ermöglichen. Diese sind nicht nur von technischer Natur. So wie in einer Studie von *FIAT eco:Drive*² beschrieben, ist eine Kraftstoffersparnis von bis zu 16% möglich, hervorgerufen durch das ökonomische Fahrverhalten des Fahrzeuglenkers. Würden Europas Autolenker alle zu Eco-Lenkern werden, so würde dies eine Verringerung der CO_2 -Emissionen um 90 Millionen Tonnen bedeuten, dies mehr als den jährlichen Emissionen Portugals entspricht.

Dieses Potential hat die Autoindustrie für sich entdeckt und unterschiedliche EcoFeedbacks finden in den neuen Automodellen den Einzug. In dieser Arbeit werden die verschiedenen Komponenten von EcoFeedbacks einzeln beleuchtet um gegenwärtige Feedbacks zu analysieren.

Hierzu werden zu Beginn die angewandten Motivationstechniken und die daraus resultierenden Anforderungen an das Design der EcoFeedbacks definiert. In weiterer Folge werden die technischen Aspekte zur Kraftstoffeinsparung definiert und deren Einflussfaktoren diskutiert. Die daraus resultierenden Erkenntnisse wurden in einem Papierprototypen umgesetzt und werden im Konzeptionierungsteil der Arbeit diskutiert. Im letzten Teil der Arbeit wird auf die Implementierung der Simulationsumgebung sowie der einzelnen EcoFeedbacks eingegangen und deren Ergebnisse präsentiert.

¹<http://www.spritkostenrechner.de/spritpreise/benzinpreisentwicklung/>, 16.06.2011

² <http://www.fiat.de/ecodrive> 14.05.2001

1.2 Motivationstechniken

Um Änderungen des Fahrverhaltens in Richtung einer ökonomischen Fahrweise zu bewirken, lässt sich als erster Ansatz schlussfolgern, den Verbrauch in monetären Kosten auszudrücken. Jedoch stellt dies als Motivationstechnik nur eine vorübergehende Lösung dar. In [25] beschreibt Shipworth zwei Grundmodelle menschlichen Verhaltens in Bezug auf die Umwelt.

Das *rationell - ökonomische Modell* basiert auf der Annahme, dass jegliches Agieren des Menschen in Bezug auf Energieersparnis durch rationelle Entscheidungen hervorgerufen wird. Somit besteht die Motivation aus der Geldersparnis, welches durch z. B. eine optimierte Fahrweise erwirkt wird. Jedoch versagt dieses Modell bei irrationalen Gründen wie bei Bequemlichkeit, Komfort oder Fahrspaß. Die Kosten für Kraftstoffe werden in absehbarer Zeit noch nicht hoch genug sein, um bei Autofahrern gravierende Mehrkosten zu verursachen, die zu einem rein logisch - rationellen Fahren führen würden.

Im *Gesinnungs-Modell* wird angenommen, dass ein vorhandenes Umweltbewusstsein ökonomisches Verhalten induziert. Alleinig das Bewusstsein ist Motivation für ökonomisches Handeln. Jedoch fehlt meist ein direktes Feedback der Auswirkungen ökonomischen Handelns, die auf die Umwelt einwirken. Dieses Umweltbewusstsein ist wiederum geprägt vom sozialen und kulturellen Kontext. Trotz ökonomischer Gesinnung bedarf es auch bei diesem Modell noch dem Wissen, wie ökonomisches Handeln gestaltet werden soll.

1.2.1 Techniken zur Verhaltensänderung

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Techniken und Theorien angeführt, die Personen dazu motivieren sollen, Änderungen an ihrem Handeln vorzunehmen und die darauf abzielen, auf das menschliche Verhalten nachträglich Einfluss zu nehmen.

Materielle Anreize: Belohnungen in Form von monetären Vergütungen und Vergünstigungen, wie in [26], sind für schnelle Änderungen sehr wirksam. Setzt jedoch diese Belohnung aus, so wird wie in [1] beschrieben das geförderte Verhalten ebenso rasch wieder eingestellt.

Aufforderung: Aufforderungen zum ökonomischen Handeln werden anfangs gut angenommen. Über einen längeren Zeitraum verlieren diese Aufforderungen jedoch durch Verlust ihrer Aktualität an Verbindlichkeit.

Information: Durch das Informieren über ein Problem und entsprechende Lösungsansätze sollen Personen motiviert werden, nach diesen zu handeln. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Personen Interesse an dem Problem

zeigen, jedoch anfänglich nicht von den Lösungsansätzen wissen, wie in [25] und [27] beschrieben.

Laut He und Greenberg [14] ist die Motivationstechnik durch Information nur dann fruchtbar, wenn die angesprochenen Personen ein spezifisches Ziel vor Augen haben. Allein die Information über ein Problem reicht nicht unbedingt zur Motivation von Personen, da hier keine psychologische, soziale und kulturelle Faktoren berücksichtigt werden.

Positive Motivation: Young beschreibt in [27] die positive Motivations-technik als extrinsische Motivation, die das ökonomische Verhalten für Personen ansprechend wirken lässt. Dies wird einerseits erlangt durch die Hervorhebung in einem sozialen Rahmen und das daraus resultierende Lenken der Aufmerksamkeit auf eine Person, die ebendiese erwünschte Handlung zeigt. Beispiele für solche Techniken sind z. B. *EcoDriveGP* von FIAT³, die *EcoChallenge* von Lexus⁴ oder die *Fahrerliga 2011*⁵, die im Bereich Nutzfahrzeuge tätig ist. Das Ziel dieser Technik ist, Personen für ein bestimmtes Handeln zu ermutigen.

In [27] wird zusätzlich angemerkt, dass bei dieser Technik auch intrinsische Motivation zur Anwendung kommt. Dies ist dann der Fall, wenn die Person für sich ein Verhalten entdeckt, oder ihr geholfen wird dieses zu entdecken, um eigene, subjektive Werte zu erlangen (z. B. eine Rangplatzierung). Laut [14] stoppt jedoch auch das gewünschte Verhalten bei Ausbleiben der positiven Motivation.

Zwang / Bestrafung: In [27] wird erläutert, dass Bestrafung, Bedrohung oder Einschränkung nicht für Verhaltensänderungen im Bereich der Umweltfragen geeignet ist. Jedoch findet man des Öfteren ähnliche Techniken, wie z. B. die *Congestion Charge* (Taxe für die Innenstadt Londons), Fahrspuren, die nur für Autos mit mehreren Insassen zugänglich sind und „*Strafsteuern*“ für Fahrzeuge ohne Katalysator. Bei verstärktem Auftreten provoziert diese Art der Technik eine Umkehrwirkung bei betroffene Personen, die gekennzeichnet ist genau entgegengesetzt der angestrebten Verhaltensweise zu agieren.

In [25] wird jedoch angeführt, dass die Technik basierend auf Bedrohungen und einhergehender Aufklärung zur Vermeidung eben dieser, wiederum positiv angenommen wird.

Reduzierung der kognitiven Dissonanz: Festinger beschreibt in seinem Buch „*A theory of cognitive dissonance*“ (vgl. [8, S. 18]), dass eine Verhaltensänderung durch eine kognitive Dissonanz hervorgerufen werden

³<http://www.facebook.com/ecoDriveGPDE> (11.05.2001)

⁴<http://www.scholastic.com/lexus/> (11.05.2001)

⁵<http://tinyurl.com/6ysuga6> (12.05.2001)

kann. So führt er in diesem Zusammenhang als Beispiel Hunger als Dissonanzzustand an, der durch seine Verringerung eben diese Dissonanz beseitigt bzw. minimiert. In Anbetracht auf die Verhaltensänderung bezüglich ökonomischen Handelns wäre dies als ein Zustand zu sehen, der einer Person unangenehm erscheint, da z. B. ihre Haltung zu Umweltfragen nicht mit dem momentan Handeln konform ist. Um diesen Zustand zu verringern, handelt folglich die Person im ökologischen Sinn, um diese Dissonanz schlussendlich aufzulösen.

Je größer diese Dissonanz ist, desto intensiver wird das Handeln, um die Dissonanz zu verringern und umso größer das Bemühen, Situationen zu vermeiden, die diese Dissonanz vergrößern.

Nutzentheorie: Diese Theorie, beschrieben in [9], fasst den *Nutzen* einer Person als Größeneinheit auf, welche für jede Person individuell verschieden ist. Auf ökologisches Handeln übertragen wäre dies z. B. die Situation, dass eine Person einen großen Nutzen an ökologischem Handeln hat, jedoch eine weitere Person den größtmöglichen Nutzen durch Geldersparnis erzielt. Beide Personen könnten nun durch z. B. eine Fahrgemeinschaft ihre beiden unterschiedlichen Nutzen maximieren sich und somit vice versa für dieses Handeln motivieren.

1.3 Anforderungen an das Design von EcoFeedbacks

Holmes beschreibt in [15] speziell Visualisierungen von Energieverbrauchsdaten. Diese Daten sind als dynamische Echtzeitdaten zu verstehen, die als einzelne Schlüsselwerte bestimmter Einflussfaktoren auftreten und im Kontext zueinander einen abstrakten Wert bilden. Dieser Wert, ausgedrückt durch z. B. symbolhafte Visualisierungen, haptische Veränderungen oder auditive Impulse, erlaubt es durch die Vereinfachung, den Betrachter leicht verständlich über einen komplexen Sachverhalt, z. B. Energieeffizienz, aufzuklären. Hierzu listen Pierce und Roedl in [22] folgende Fragen auf, die zur kritischen Betrachtung des Interaktionsdesigns mit einem EcoFeedback dienen:

- *Beeinflussung / Überzeugung* Ermutigt und hilft das Feedback zum Einsparen von Energie?
- *Zweckmäßigkeit* Erleichtert das Feedback das ökonomische Handeln?
- *Ästhetik* Hat das Feedback ästhetischen Wert, um ein fortwährendes Interagieren zu fördern?
- *Symbolischer Wert* Ist das Feedback als ein Symbol von persönlichen Werten und Bedeutungen geeignet?
- *Potential der kritischen Reflexion* Animiert das Feedback zur kritischen Betrachtung im ökonomischen Kontext?

Diese fünf Punkte bilden die Basis, um verschiedene Eco-Feedbacks untereinander zu vergleichen. In [19] erläutert Pierce die auftretende Problematik der Ineffizienz von Eco-Feedbacks bei Vernachlässigen von ein oder mehreren der zuvor angeführten Punkte. Die Studie in besagtem Paper betrachtet die Verwendung von Energiekostendisplays deren Feedback sich auf das Anzeigen des Verbrauchs in Kilowattstunden konzentriert. Die ermittelten Kosten werden numerisch dargestellt. Als Resultat ergab sich aus den Befragungen der Testpersonen, dass solche EcoFeedbacks sehr wohl die Aufmerksamkeit bezüglich ökonomischen Denkens steigern, jedoch meist nicht zum Handeln animieren. Die Probanden erkannten das Feedback als Kosteninformation, konnten jedoch durch fehlende Aufklärung und Motivation nicht aktiv nach Lösungen handeln. Dieses in der Studie aufgezeigte Verhalten ist oftmals



Abbildung 1.1: Shake-bottle – ein Versuch von Pierce J. Energie zu „materialisieren“. Somit soll der Bezug und das Verständnis des Besitzers zu der Energie gefördert werden. (Bildquelle: [20])

begründet durch den fehlenden Bezug zu der einzusparenden Energie. Diese Energie wird vielmals als Zahlenwert und insofern gestaltlos vom Konsumenten wahrgenommen. In [20] und in [21] beschreibt Pierce den Versuch, Energie eine Gestalt zu geben, sodass Personen die Energie als Gegenstand und somit als greifbar erfahren können. Dies wird an dem Beispiel der *Shake-Light Bottle* (siehe Abb. 1.1) demonstriert, welches ein kleines Glasfläschchen ist, dass durch Schütteln Energie sammelt und beim Öffnen diese als Lichtenergie abgibt. Mit diesem Versuch wird demonstriert, wie Energie auf persönliche Art und Weise „eingefangen“ werden kann. Es besteht die Möglichkeit, Energie zu sammeln um sie z. B. an jemanden zu verschenken. Somit soll der Bezug zur Energie hergestellt werden, um gleichauf ein Bewusstsein dafür zu entwickeln.



Abbildung 1.2: Anzahl der Zitate in Blogs und Foren. Weltweit gesehen stehen ökotechnologische Innovationen im Mittelpunkt der Diskussionen. (Quelle: <http://www.fiat.de/ecodrive> 14.05.2001)

Eine vom italienischen Autohersteller *FIAT* durchgeführte Studie⁶ ergab, dass das Bewusstsein über Emissionsreduzierungen in der Gesellschaft von technologischen Innovationen dominiert wird. In Abb. 1.2 wird dies anhand von weltweit verwendeten Zitaten in Blogs und Foren dargestellt. Es zeigt deutlich, dass Energieersparnis mit innovativer Technologie assoziiert wird, jedoch meist nicht die Möglichkeit in Betracht gezogen wird, bestehende Technologien effizient zu nutzen. Als Grund dafür wird angenommen, dass das Spritspar-Potenzial nur schwer in allgemein gültigen Zahlen auszudrücken ist, sowie der Umstand, dass ökonomische Maßnahmen teils nur schwer zu erlernen sind.

Eine weitere durchaus wichtige Erkenntnis der *eco:Drive* Studie von *FIAT* stellt der kulturelle Unterschied innerhalb Mitteleuropas dar, der Auswirkungen auf das Fahrverhalten und auf das Potential der Kraftstoffeinsparung hat. In Abb. 1.3 stehen fünf Länder im Vergleich zueinander. Bemerkenswert ist die sich abzeichnende Lernkurve, die innerhalb der ersten zehn Tage entsteht.

⁶eco:Drive <http://www.fiat.de/ecodrive> 14.05.2001

Die Resultate für die einzelnen Länder aus der Studie zitiert:

Großbritannien: Britische Fahrer sind Europas beste Eco-Driver, da sie überdurchschnittlich sanft und überlegt schalten.

Deutschland: Deutsche Fahrer beschleunigen allzu heftig, halten dafür aber musterhaft konstante Geschwindigkeiten ein und schalten im richtigen Moment.

Frankreich: Beim allmählichen Abbremsen sind französische Fahrer am Besten, jedoch nicht beim Schalten. Dennoch haben sie die besten Fortschritte in dieser Technik verzeichnet.

Italien: Italienische Fahrer tun sich schwer beim Einhalten eines Durchschnittstempos und beim allmählichen Abbremsen. Es sind übrigens auch die, die sich am wenigsten verbessert haben.

Spanien: Spanische Fahrer erzielten die schlechtesten Resultate zu Beginn des Eco-Driving, haben aber auch die meisten Fortschritte im 30- Tage-Zeitraum gemacht.

Aufgrund der internationalen Unterschiede bezüglich der Fahreffizienz spricht dies für eine Adaption von EcoFeedbacks an die jeweilige Kultur.

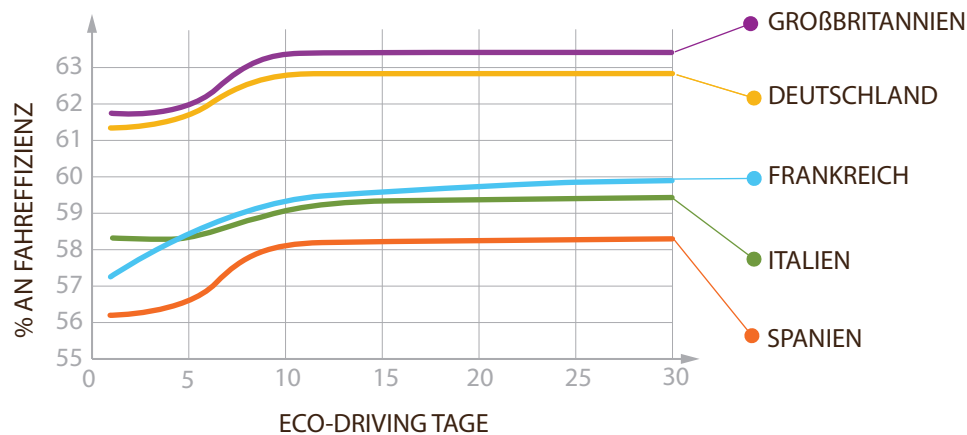


Abbildung 1.3: Die Kulturellen Unterschiede machen sich in der Fahreffizienz bemerkbar. (Quelle: <http://www.fiat.de/ecodrive> 14.05.2001)

Kapitel 2

Verwandte Arbeiten

Im folgenden Abschnitt werden verwandte Arbeiten bezüglich EcoFeedback-Systemen beleuchtet. Die breite Vielfalt von Feedbacks, beginnend bei farblichen Feedback bis hin zu komplexen Algorithmen die des Fahrzeuglenkers Route vorherzusagen versuchen¹, weist auf die Komplexität der Thematik hin. Folgend sind nicht alle, jedoch die wichtigsten Repräsentanten unterschiedlicher EcoFeedback-Arten beschrieben.

Ambient Light - Nissan Leaf, Honda Insight

Eine sehr subtile Umsetzung des EcoFeedbacks findet in *Nissan Leaf* und *Honda Insight* Anwendung. Die Art der Fahrweise des Lenkers wird anhand der Farbe eines Umgebungslichts in Echtzeit visualisiert. Wie in Abb. 2.1 dargestellt, wird im Hybridfahrzeug Honda Insight, der Tachometer mit einem farblich kodierten Bogen hinterlegt. Diese Art des EcoFeedbacks ist auch im



Abbildung 2.1: Ambient Light im Honda Insight Hybrid Car. Der Farbverlauf visualisiert eine: (a) ökonomische, (b) neutrale, (c) unökonomische Fahrweise. (Bildquelle: e-Broschüre Honda Insight 2010)

Nissan Leaf wie in Abb. 2.2 anzutreffen. In diesem Fall wird der Rahmen des Kombiinstrumentes mit einer Farbe (in der Abbildung mit der Farbe Blau) verstärkt, die sich je nach Fahrweise verändert. In beiden Fahrzeugen wird zusätzlich durch Sammeln von „Blättern“ und „Bäumen“ (siehe z. B. Abb. 2.2 oberes Display) der Fahrer für sein ökonomisches Handeln belohnt.

¹Ford mit Google Prediction API, <http://tinyurl.com/658uc8y>, 25.05.2011



Abbildung 2.2: Das Cockpit des Nissan Leaf.

(Bildquelle: <http://www.teczilla.de/nissan-leaf-elektroauto-mit-it/5439>, 14.06.2011)

Toyota Prius

Das EcoFeedback im Hybridauto Toyota Prius setzt auf die Motivationstechnik durch Information. Der Fahrzeuginnenraum wird während der Fahrt, wie in Abb. 2.3 ersichtlich, über die Energiequellen (Verbrennungsmotor oder Batterie) bzw. über die günstigste Gaspedalstellung aufgeklärt. Hinweise bezüglich des Kraftstoffverbrauchs über einen längeren Zeitraum gibt ein Balkendiagramm (siehe Abb. 2.3 r. u.), das den mittleren Verbrauch pro hundert Kilometer visualisiert. Als ein Echtzeitfeedback fungiert das *EcoMeter* (siehe Abb. 2.3 l. u.), dies in der Fahrerkonsole, sowie auch im *Head-Up-Display*

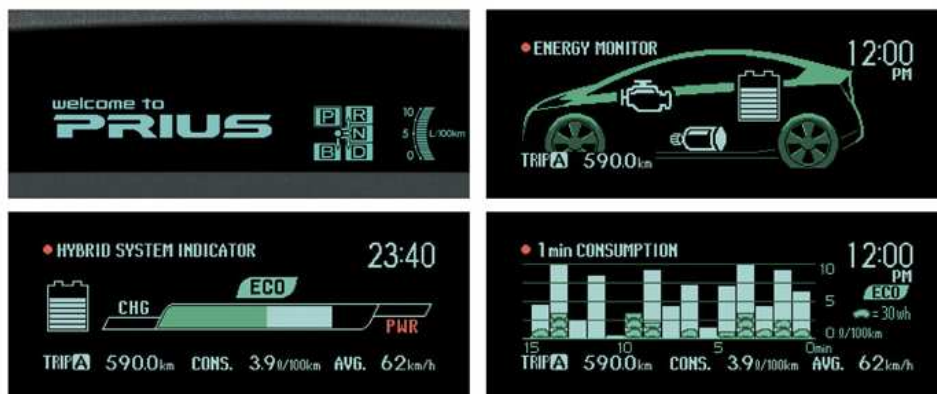


Abbildung 2.3: Die unterschiedlichen Visualisierungen im Toyota Prius.

(Bildquelle: <http://tinyurl.com/64xn4oy>, 14.06.2011)

sichtbar ist. Es gibt den Fahrzeuglenker Auskunft über dessen Beschleunigungsverhalten, sowie in welchem Fahrmodi: Hybridantrieb, Elektroantrieb oder Auflademodus sich das Fahrzeug befindet. In seiner Gesamtheit gesehen, ist das EcoFeedback des Toyota Prius in ein kurzfristiges und mittelfristiges Feedback aufgeteilt. Einerseits die Visualisierung im *Head-Up-Display*, andererseits die Darstellung der Verbrauchsdaten in der Mittelkonsole.

FIAT eco:Drive



Abbildung 2.4: FIAT eco:Ville verdeutlicht den Teilnehmern die Auswirkungen ihres ökonomischen Fahrens. (Bildquelle: <http://www.fiat.de/ecodrive/>, 25.05.2011)

Ein sehr umfassendes System bildet das *eco:Drive* von FIAT². Während der Autofahrt wird kein unmittelbares Feedback zur Fahrweise gegeben. Stattdessen werden die Daten von Beschleunigung, Durchschnittsgeschwindigkeit, Bremsen und Gangwechsel auf einem USB-Speicher aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Daten werden nach der Fahrt vom Anwender auf einen Heimcomputer geladen und mit der Software von *eco:Drive* ausgewertet. Diese berechnet anhand der Fahrdaten einen *EcoIndex* um somit das Fahrverhalten des Kraftfahrzeuglenkers zu bewerten. Anhand dieses *EcoIndex* wird der Anwender über sein Fahrverhalten aufgeklärt und wird mit Verbesserungsvorschlägen zu einer noch ökonomischeren Fahrweise motiviert.

Zusätzlich wird dem Anwender ein langfristiges Feedback mithilfe der Onlinecommunity *eco:Ville* geboten (siehe Abb. 2.4). Dies ist eine virtuelle

²<http://www.fiat.de/ecodrive/>, 25.05.2011

Stadt die von FIAT EcoFahrer besiedelt wird. Aufgrund deren ökonomisches Fahrverhalten wird deren gesamte Auswirkung auf den CO₂-Ausstoß bzw. die erzielte Kostenersparnis in Vergleichnissen dargestellt. Dies wird z. B. durch Berechnungen wie:

CO₂-Ersparnis: 3.016.367 kg. Dies ist equivalent zu gekochten Mahlzeiten für jeden eco:Ville Einwohner in 132 Tagen.

ausgedrückt.

Nissan EcoPedal

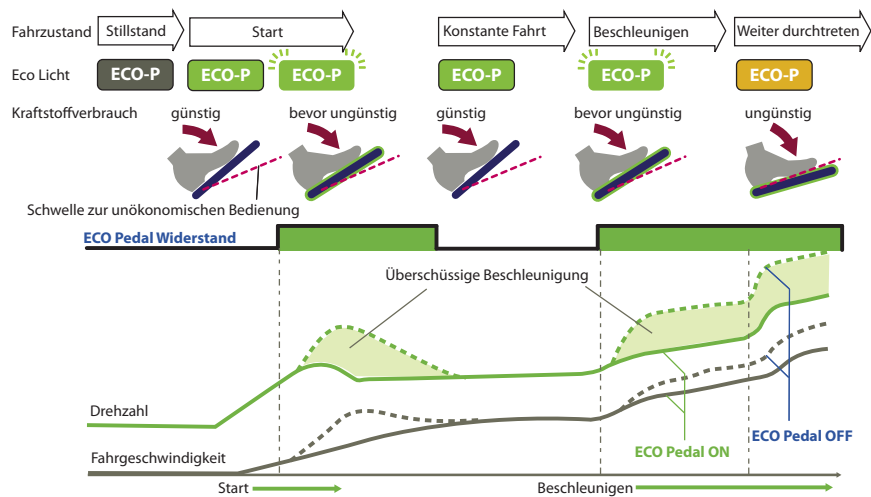


Abbildung 2.5: Das Nissan EcoPedal bewirkt durch einen leichten Widerstand eine sparsamere Fahrweise. (Bildquelle: <http://tinyurl.com/5ady8l>, 25.05.2011)

Ein haptisches EcoFeedback bildet das *EcoPedal* von Nissan, das seit dem Jahr 2009 in verschiedenen Modellen des Autoherstellers zur Anwendung kommt³. Dieses Feedback zielt darauf ab, den Fahrzeuglenker durch haptische Druckpunkte am Gaspedal auf die Schwelle zur unökonomischen Fahrweise hinzuweisen. In Abb. 2.5 ist ein Fahrzyklus von dem Beschleunigen aus dem Stillstand bis hin zu exzessiver Gaspedalbetätigung abgebildet. Laut Herstellerangaben konnte bei firmeninternen Forschungen, eine Steigerung der Fahreffizienz von 5-10% erzielt werden.

GreenGPS / Garmin EcoRoute

In [12] beschreibt *Ganti, et al.* das *GreenGPS* System zur Berechnung einer ökonomischen Route für das vom Fahrzeuglenker vorgesehene Fahrziel.

³<http://tinyurl.com/5ady8l>, 21.05.2011

Dieses vorgestellte Feedback, wurde mittlerweile von dem Navigationssys-



Abbildung 2.6: Das Garmin EcoRoute verbindet Navigation mit ökonomischen Fahrmonitoring. (Bildquelle: <http://tinyurl.com/yk9g66x>, 14.06.2011)

temhersteller *Garmin* realisiert. Das *Garmin EcoRoute*⁴ (siehe Abb. 2.6) erlaubt den Fahrzeuglenker, die ökonomische Route für seine Fahrt zu wählen. Während der Fahrt wird des Fahrers Fahrverhalten in den Kategorien:

- Geschwindigkeit,
- Bremsstätigkeit,
- Beschleunigung und
- Gesamtwertung

ausgewertet und mit Punkten belohnt. Ein Verlauf des zuletzt gefahrenen Streckenabschnitts wird durch einen Graphen der Punktebewertung bezüglich der Position auf der Strecke visualisiert. Die Applikation des Feedbacks wird auf Navigationsgeräten der Serie *nüvi* geladen und via *ODB-II Schnittstelle* mit dem Kraftfahrzeug verbunden. Somit werden motorspezifische Daten vom Fahrzeug ausgelesen, die in Verbindung mit dem Navigationssystem eine Bewertung des gefahrenen Streckenabschnitts erlauben.

UbiGreen

In [11] beschreibt Froehlich ein mobiles EcoFeedback (*UbiGreen*), dessen Aufgabe es ist, das gesamte Transportverhalten von einzelnen Personen zu beobachten. Laut Froehlich ist in amerikanischen Haushalten der größte

⁴<http://www.garminonline.de/strassennavigation/ecoroute-hd/>, 14.06.2011

CO_2 -Produzent das Transportverhalten der Familienmitglieder. Um diesen CO_2 -Ausstoß zu verringern, werden dem Anwender der mobilen Applikation Hinweise auf sein Mobilitätsverhalten visualisiert. Der Anwender infor-



Abbildung 2.7: UbiGreen - Mobiles EcoFeedback für verschiedene Fortbewegungsarten. Der florierende Baum visualisiert den Fortschritt des Anwenders, dessen momentanes Fortbewegungsmittel als Symbol dargestellt wird. Vier runde Symbole im unteren Bereich des Displays geben Auskunft über die Vorteile, die der Anwender aus dem momentanen Handeln zieht, wie z. B. Geldersparnis, Entspannung, Training und die Möglichkeit zu lesen.

(Bildquelle: <http://dub.washington.edu/projects/ubigreen> 05.04.2011)

miert die Applikation über seine momentane Fortbewegungsart wie, z. B. zu Fuß, per Bahn oder per Auto (wahlweise in Fahrgemeinschaft). Zusätzlich zur Anwendereingabe werden Positionsdaten des Mobiltelefons und Bewegungsdaten eines Schrittsensors aufgezeichnet. Der Schrittsensor bietet weiters die Möglichkeit zwischen verschiedenen Zuständen wie: Sitzen, Stehen, Radfahren, Gehen und Laufen zu unterscheiden. Die Applikation wertet dieses Verhalten sowie die gesammelten Sensordaten aus und unterrichtet den Anwender über die Vorteile, die dieser aus dem Verhalten ziehen kann.

In Abb. 2.7 sind unterschiedliche Stadien bei der Anwendung von *UbiGreen* dargestellt. Der florierende Baum visualisiert das Ausmaß des ökonomischen Verhaltens. Dieser wird wöchentlich wieder auf den Ausgangszustand (Abb. 2.7 ganz links) zurückgesetzt, um von neuem für ökonomisches Handeln zu motivieren.

EcoChallenge BMW

Ein EcoFeedback basierend auf einen ortsbezogenen Wettbewerb wird in [7] von der *BMW Group Research and Technology* vorgestellt. Die darin beschriebene Applikation wird auf einem mobilen Telefon ausgeführt und am Amaturenbrett des Kraftfahrzeugs platziert. Dieses EcoFeedback bedient

sich der Motivationstechnik mittels Wettbewerb im Vergleich des Kraftstoffverbrauchs auf Streckenabschnitten. Das EcoFeedback gibt in Echtzeit Auf-

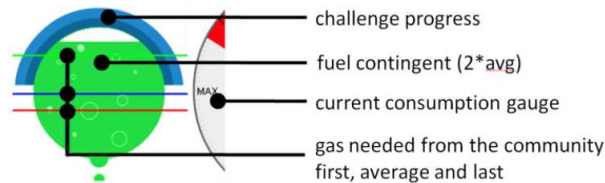


Abbildung 2.8: Der Aufbau des EcoChallenge Instruments von BMW.
(Bildquelle: [7])

schluß darüber, wie hoch der Kraftstoffverbrauch jeder Teilnehmer auf diesem Abschnitt der Strecke ist. Somit kann der Autofahrer sich an den Werten seiner Mitstreiter messen und versuchen, effizientere Verbrauchswerte zu erreichen. Die Visualisierung am mobilen Telefon nimmt Bezug auf den momentanen Fahrzustand des Fahrzeugs. Bei Stillstand ist am Display der Name des Wettbewerbs, die Teilnehmer und der monetäre Wert des Verbrauchs sichtbar. Beginnt die Fahrt visualisieren Echtzeitgraphen den Verbrauchsverlauf. In Abb. 2.8 ist die Anzeige während der Fahrt sichtbar. Die grüne Blase gibt Auskunft über das Kraftstoffkontingent über den momentanen Streckenabschnitt. Dieser Wert wird gebildet aus dem zweifachen des Durchschnittsverbrauchs auf besagten Streckenabschnitt. Horizontale Linien markieren die drei unterschiedlichen Leistungen, für geringsten, durchschnittlichen und größten Verbrauch. Ein blauer Ring um die Blase zeigt den Fortschritt auf dem Streckenabschnitt und somit die relative Dauer des Wettbewerbs.

Sublimes vibrotaktilen Feedback

In [23] wird ein EcoFeedback vorgestellt welches den haptischen Rezeptionskanal anspricht. Wie in Abb. 2.9 ersichtlich, wurde hierfür jeweils der Fahrersitz und der Sicherheitsgurt mit Aktuatoren ausgestattet. Anhand der aus dem CAN-Bus⁵ bezogenen Fahrzeugdaten, errechnet ein Laptop den momentanen Durchschnittsverbrauch in Liter pro 100 Kilometer. Dem Fahrzeuglenker wird nun in vier verschiedenen Vibrationsmuster dessen momentaner Durchschnittsverbrauch vermittelt. Hierbei reicht die Abstufung der Vibrationsmuster von sanften niederfrequenten Vibrieren bis hin zu unangenehmen disharmonischen Vibrationsschüben. Dieses EcoFeedback verwendet die Motivationstechnik der Informationsvermittlung. Da die Aufgabe des Fahrzeuglenkers sehr visuell behaftet ist, wird mit vibrotaktilen Feedback der

⁵http://de.wikipedia.org/wiki/Controller_Area_Network, 21.05.2011

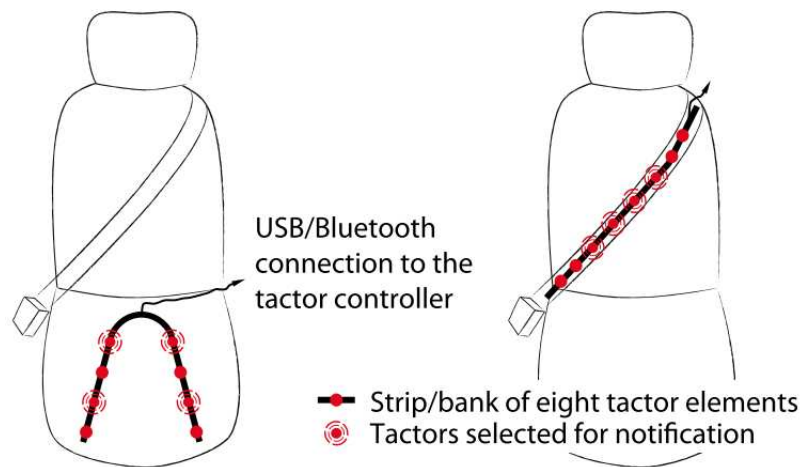


Abbildung 2.9: Skizze der Aktuatoren des Vibrationsfeedbacks.
(Bildquelle: [23])

Fahrzeuglenker nicht zusätzlich mit visuellen Reizen belastet. Dies ist der Vorteil dieses Feedbacks auf dem in [23] der Fokus gelegt wird.

EcoSec

Dieses Konzept betrachtet mehrere Aspekte des ökonomischen Fahrens sowie die Fahrsicherheit des Autofahrers. *EcoSec* der Universität Konstanz⁶ ist als Applikation für mobile Telefone konzipiert (siehe Abb. 2.10). Das Anwendungsszenario ist wie folgt vorgesehen:

1. Der Fahrer gibt die gewünschte Route für die Navigation in das Gerät ein.
2. Die Software berechnet Routen die nach den Kriterien: schnellste, kürzeste oder ökonomische Route.
3. Bei Abfahrt wird der Fahrer über weitere Nutzer der Applikation informiert, die eine Fahrgemeinschaft suchen und sich auf der gewünschten Route befinden. Sobald der Nutzer zusteigt, werden dem Fahrer Öko-Punkte gut geschrieben.
4. Während der Fahrt wird der Fahrer durch Einhalten der Geschwindigkeitsbeschränkungen und Verringerung der Geschwindigkeit mit Öko-Punkten belohnt.

⁶<http://hci.uni-konstanz.de/ecosec/incar.html>, 22.05.2011



Abbildung 2.10: EcoSec vereint ökonomisches Fahren mit Mitfahrgelegenheiten. (Bildquelle: <http://www.eco-sec.de/>, 14.06.2011)

Celerometer und Stillstandwarnung

In [18] beschreibt Pace, Ramalingam und Roedl ein EcoFeedback welches als *Head-Up-Display* in die Windschutzscheibe des Fahrzeugs projiziert wird. Die Hauptelemente des Feedbacks werden gebildet aus einem *Celerometer* und einer *Stillstandwarnung*. Das *Celerometer* wird beschrieben durch farbliche Balken, die mit Zunahme der auftretenden Kräfte, als eine Pegelvisualisierung dargestellt werden. Die Farbkodierung reicht von Grün, im ökonomischen Bereich, über die Farbe Orange bis hin zu Rot, welche eine unökonomisches Beschleunigungsverhalten reflektiert. Dieses Feedback wird im peripheren Blickfeld mit einer numerischen Repräsentation des momentanen Kraftstoffverbrauchs dargestellt.

Die Stillstandwarnung wird bei Bedarf eingeblendet. Sobald das Kraftfahrzeug zum Stillstand kommt, gibt dieses Feedback Aufschluss über die verstrichene Zeit, die der Motor bei Stillstand läuft. Somit soll der Kraftfahrzeuglenker dazu motiviert werden, bei Stillstand, den Motor abzustellen und somit den Verbrauch zu senken. Die Visualisierung der verstrichenen Zeit wird als einfacher Timer in numerischer sowie in chronotypischer Form dargestellt und farblich, wie der *Celerometer* bei ungünstigen Zeitspannen kodiert.

Kapitel 3

Kraftfahrzeugtechnische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die technischen sowie verbrauchsrelevanten Parameter der Fahrzeugtechnik nach dem *Kraftfahrtechnischen Taschenbuch Bosch* [3] und *Dorrer C.* [6] erläutert. Sie dienen als Grundlage für die Berechnung des Kraftstoffverbrauchs im *EcoModul* des *Dashboard-Frameworks*, sowie zur Verdeutlichung, welche Einflussfaktoren den Verbrauch eines Kraftfahrzeuges bestimmen. Für die folgenden Erklärungen und mathematischen Ausdrücke werden die Symbole aus Tabelle A.1 in Anhang A verwendet.

3.1 Fahrwiderstände

Bei den Fahrwiderständen unterscheidet man zwischen permanenten (z. B. Masse) und temporären Einflussfaktoren (z. B. Steigungswinkel). Der Gesamtfahrwiderstand F_W setzt sich aus dem Rollwiderstand F_R , dem Luftwiderstand F_{LW} , dem Beschleunigungswiderstand F_a und dem Steigungswi-

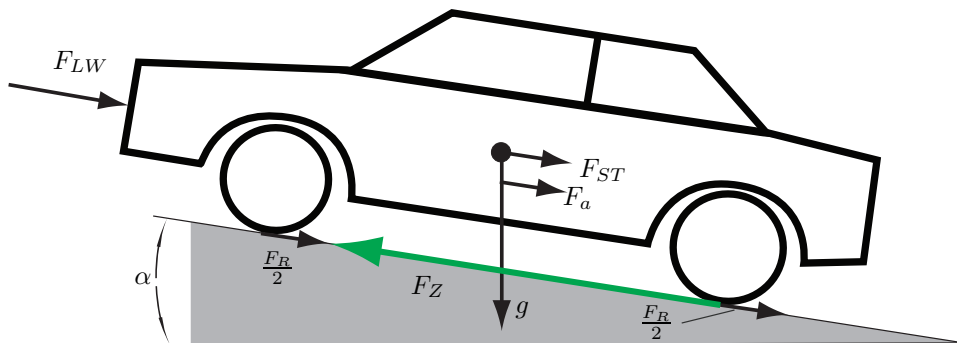


Abbildung 3.1: Auftretende Longitudinal-Kräfte am Kraftfahrzeug. Die Rollreibung F_R ist achsbezogen, daher $\frac{F_R}{2}$ pro Achse eingezeichnet.

derstand F_{ST} zusammen, sodass gilt:

$$F_W = F_R + F_{LW} + F_a + F_{ST} = F_Z. \quad (3.1)$$

Die Summe dieser Widerstände ist zugleich die Zugkraft F_Z , die benötigt wird, um den Gesamtfahrwiderstand F_W zu überwinden und folglich das Kraftfahrzeug zu beschleunigen. Jeder einzelne Widerstand setzt sich aus mehreren Faktoren zusammen und wird folgend detailliert beschrieben.

Rollwiderstand

Der *Rollwiderstand* F_R setzt sich aus den Kräften in der *Radlängsachse* F_L , dem Fahrwiderstand aus der *Seitenkraft* F_S , sowie dem *Schräglaufwinkel* β_S zusammen, sodass für

$$F_R = F_L \cdot \cos \beta_S + F_S \cdot \sin \beta_S \quad (3.2)$$

gilt. Die Kräfte F_L in der Radlängsachse bestehen wiederum aus der *Fahrzeuggesamtmasse* m_G , gebildet aus der Summe von *Fahrzeugmasse* m_F und der *Zuladung* m_{Zu} , sowie dem *Rollwiderstandsbeiwert* f_R , der *Gravitation* g sowie des *Steigungswinkels* α_{St} , sodass gilt:

$$F_L = m_G \cdot f_r \cdot g \cdot \cos \alpha_{St}. \quad (3.3)$$

Da die weiteren Berechnungen auf die Längsdynamik (Beschleunigung, Verzögerung) fokussieren, wird der *Schräglaufwinkel* mit $\beta_S = 0$ vernachlässigt, wodurch aus der ursprünglichen Gleichung 3.4 für

$$\begin{aligned} F_R &= F_L \cdot \cos \beta_S, \text{ bzw.} \\ F_R &= F_L \end{aligned} \quad (3.4)$$

resultiert. Für die annähernde Berechnung des Rollwiderstandes werden die Daten in Tabelle 3.1 aus [3, S. 378] herangezogen. Die Definition des Rollwiderstandsbeiwerts f_r aus [3, S. 378–379] lautet:

Der Rollwiderstandsbeiwert f_r ist um so größer, je kleiner der Reifenradius und je größer die Formänderung ist. Er steigt also mit zunehmender Belastung, zunehmender Geschwindigkeit und abnehmenden Reifenluftdruck.

Laut Wikipedia¹ wird der Koeffizient folgendermaßen beschrieben:

Der Rollwiderstandskoeffizient ist eine dimensionslose (einheitenfreie) Zahl, die von Materialeigenschaften und Geometrie des abrollenden Körpers sowie von der Belastung im Kontaktbereich abhängt. Typische Zahlenwerte des Rollwiderstandskoeffizienten liegen um ein bis über zwei Größenordnungen unter denen des Gleitreibungskoeffizienten.

¹<http://de.wikipedia.org/wiki/Rollwiderstand>, 20.05.2011

Straßendecke	f_r
Großpflaster	0,015
Kleinpflaster	0,015
Beton, Asphalt	0,013
Schotter, gewalzt	0,020
Teermakadam	0,025
Erdweg	0,050

Tabelle 3.1: Verschiedene Straßenmaterialien und deren Rollwiderstandsbeiwert f_r für Pkw-Luftreifen.

Luftwiderstand

Der Luftwiderstand ist abhängig von der *Fahrzeugstirnfläche* A^2 , sowie von dem *Luftwiderstandsbeiwerts* c_W des Fahrzeugs. Auf diese Fläche wirkt der Staudruck der Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Umgebungsluft, der aus der *Dichte der Luft* ρ_L , der momentanen *Fahrzeuggeschwindigkeit* v_F und der *vektoriellen Windgeschwindigkeit* in Fahrtrichtung v_W berechnet wird. Somit gilt für den Luftwiderstand:

$$F_{LW} = \frac{\rho_L}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot (v_F - v_W)^2. \quad (3.5)$$

Besonders anzumerken ist, dass der Luftwiderstand *quadratisch* mit zunehmender Geschwindigkeit steigt. Die Luftdichte ρ_L wird im später verwendeten Rechenmodell mit $\rho_L = 1,202 \text{ kg/m}^3$ angenommen. Dies entspricht der Luftdichte in einer Höhe von 200 m. Die Ermittlung des Widerstandsbeiwerts³ c_W wird wie folgt definiert:

Der Strömungswiderstandskoeffizient wird üblicherweise im Windkanal ermittelt. Der Körper steht dabei auf einer Platte, die mit Kraftsensoren ausgestattet ist. Die Kraft in Richtung der Anströmung wird gemessen. Aus dieser Widerstandskraft und den bekannten Größen wie Luftdichte und Stirnfläche wird der Strömungswiderstandskoeffizient bei gegebener Anströmungsgeschwindigkeit errechnet. Neben der experimentellen Ermittlung kann der Widerstand je nach Komplexität der Modellform und verfügbarer Rechnerkapazität auch numerisch über die Integration der Verteilung von Reibungs- und Druckbeiwert über die Modelloberfläche berechnet werden.

²Bei Pkw ist $A \approx 0,9 \times \text{Spurweite} \times \text{Höhe}$, aus [3, S. 378]

³<http://de.wikipedia.org/wiki/Luftwiderstandsbeiwert>, 19.05.2011

Beschleunigungswiderstand

Bei Beschleunigung und Verzögerung des Fahrzeuges wirken Trägheitskräfte, die bei einer *Beschleunigung* a_F von einer *Fahrzeugmasse* m_G überwunden werden müssen und somit einen Widerstand darstellen. Somit wird der Beschleunigungswiderstand mit:

$$F_a = m_G \cdot a_F \quad (3.6)$$

berechnet.

Steigungswiderstand

Ähnlich dem *Beschleunigungswiderstand* F_a ist der *Steigungswiderstand* (oder auch Hangabtriebskraft) F_{ST} abhängig von der *Fahrzeugmasse* m_G , der *Gravitation* g und dem *Steigungswinkel* α_{St} , sodass gilt:

$$F_{ST} = m_G \cdot g \cdot \sin \alpha_{St}. \quad (3.7)$$

3.2 Motorcharakteristika - Das Motorkennfeld

Das Motorkennfeld beschreibt die Leistungs- und Verbrauchsdaten eines Motors. Hierzu wird auf Motorprüfständen der *spezifische Verbrauch* b_e in Abhängigkeit der Motordrehzahl n und des Motordrehmoments T ermittelt (vgl. [10, S. 1040]) und in das Motorkennfeld eingetragen (siehe Abb. 3.2). Die dadurch entstehenden *Verbrauchslinien* beschreiben die Form einer Muschel, wodurch der Name *Muscheldiagramm* herrührt. Das Drehmoment T eines *4-Takt-Motors* berechnet sich aus

$$T = \frac{V_H \cdot p_e}{4\pi}, \quad (3.8)$$

wobei V_H das *Hubvolumen* in dm^3 und p_e der *relative effektive Mitteldruck* in bar im Brennraum des Kolben darstellt. In *Muscheldiagrammen* (siehe Abb. 3.2) wird daher auf der *y-Achse* das *Drehmoment* des Motors oder der vorherrschende *Mitteldruck* als Einheit verwendet.

Die rote Kurve in Abb. 3.2 beschreibt die *Volllastkurve*, die sich aus dem maximalen Drehmoment des Motors bei voller Drosselklappenöffnung in Abhängigkeit zur Drehzahl ergibt. Erkennbar ist, dass das Drehmoment bis zum *Maximalen Drehmoment* ansteigt und anschließend bei höherer Drehzahl stark absinkt. Dies ist bei *4-Takt Ottomotoren* auf die verkürzte Öffnungszeit der Einlassventile zurückzuführen.

Bei Betrachtung der *Verbrauchslinien* ist erkennbar, dass der Punkt $b_{e,min}$, der den günstigsten spezifischen Verbrauch kennzeichnet, sehr nahe an der *Volllastkurve* liegt. Dies ist der Punkt, an dem der Motor, in Relation zur

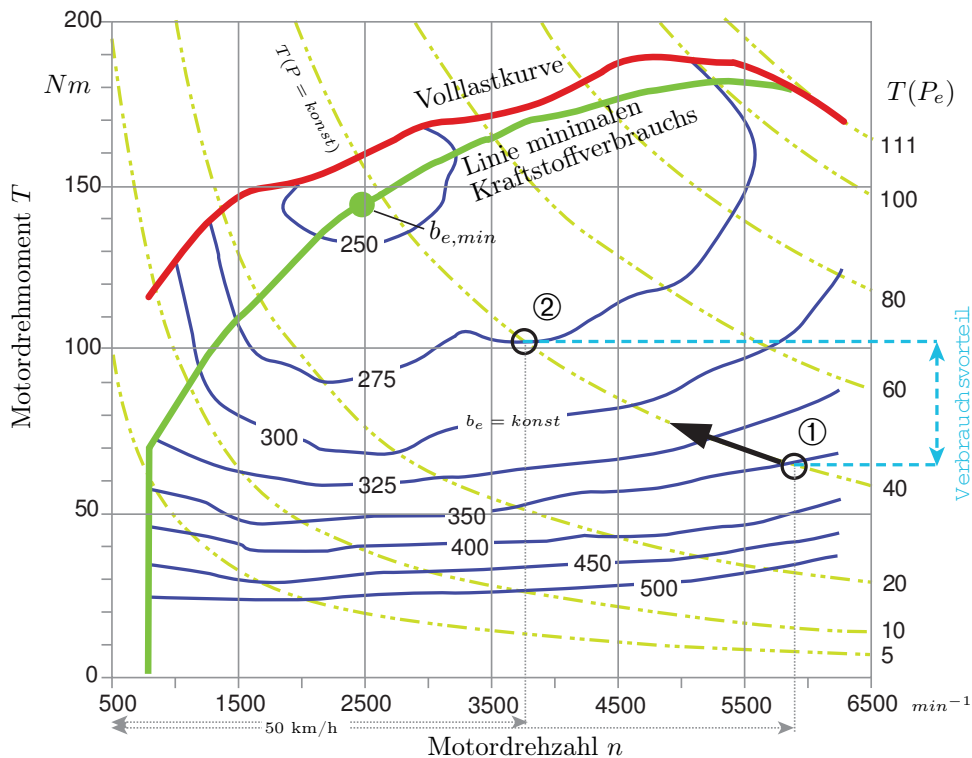


Abbildung 3.2: Darstellung eines Motorkennfeldes in Form eines Muscheldiagramms. Dieses Diagramm ist bei der Berechnung der Verbrauchswerte für den Simulator im Einsatz. Die Punkte ① und ② kennzeichnen die Positionen der Getriebegänge 1 und 2. Blau gekennzeichnet ist der Verbrauchsvorteil durch Hochschalten von Gang 1 auf Gang 2 bei gleichbleibender Leistung $T(P_e)$ und Geschwindigkeit. (Bildquelle: <http://tinyurl.com/66pukkj>)

Leistung, den geringsten Kraftstoffverbrauch aufweist. Über den Drehzahlbereich des Motors betrachtet, ergibt sich die grüne *Linie des minimalen spezifischen Kraftstoffverbrauchs*, welche die günstigste Laststellung des Motors beschreibt. In der Praxis entspricht dies etwa einer Gaspedalstellung von 70-90 %. Somit ist der verbrauchsgünstigste Motorbetrieb⁴ bei einer Drehzahl von $n = 2500 \text{ min}^{-1}$ und einer Gaspedalstellung von 87 % gegeben.

Weiters sind in dem Muscheldiagramm die *Leistungshyperbeln* $T(P_e)$ (gelb strichpunktiert) eingezeichnet. Diese beschreiben konstante Motorleistungen bei unterschiedlichen Drehmoment- und Drehzahlverläufen. Anhand des Betriebspunkts ① mit einer Leistung von $P_e = 40 \text{ kW}$ bei einer Motordrehzahl von $n = 5900 \text{ min}^{-1}$ und einem spezifischen Verbrauch $b_e = 350 \text{ g/kWh}$ zeigt sich im Vergleich mit Betriebspunkt ②, dass letzterer die selbe Leistung von

⁴bezogen auf das Motormodell in Abb. 3.2

$P_e = 40\text{kW}$, bei einem günstigeren Drehzahl- bzw. Drehmomentbereich aufweist. Dieser *Verbrauchsvorteil* kann z. B. durch rechtzeitiges Hochschalten in den nächsten Gang erzielt werden.

3.3 Berechnung von Verbrauch

Um den momentanen Kraftstoffverbrauch zu berechnen, wird zuerst der *fahrwiderstandsinduzierte Energiebedarf* E in [J] sowie in weiterer Folge der *Streckenenergiebedarf* E_s in [J/m] bestimmt, wobei für

$$E_s = \frac{E}{s} \text{ mit } s = \int_0^T v_F dt \text{ und} \quad (3.9)$$

$$E = \int_0^T (F_R + F_{ST} + F_{LW} + F_a) \cdot v_F dt$$

gilt, und detailliert in

$$E = \int_0^T \left(\underbrace{g \cdot (m_F + m_{Zu}) \cdot (f_r \cdot \cos \alpha_{St} + \sin \alpha_{St})}_{F_R + F_{ST}} + \underbrace{\frac{\rho_L}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v_F^2}_{F_{LW}} + \underbrace{(e_i \cdot m_F + m_{Zu}) \cdot a_F}_{F_a} \right) \cdot v_F dt \quad (3.10)$$

ausgedrückt wird. Dabei ist zu beachten, dass bei einem *aktiven Bremsvorgang* (negativer Beschleunigung) für $a_F = 0$ gilt, um eine Rekuperation auszuschließen. Zu Formel 3.10 ist anzumerken, dass in [6] der *translatorische Massenzuschlag* e_i angegeben, jedoch in [3] vernachlässigt wird. Aufgrund der benötigten Genauigkeit wird e_i in folgenden Abschnitten mit $e_i = 1$ gleichgesetzt und nicht mehr explizit in den mathematischen Ausdrücken angeführt.

Basierend auf den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Gleichungen lässt sich nun der streckenbezogene *Momentanverbrauch* B_e über den spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e bestimmen. Hierzu werden die *Fahrwiderstände* der Formel 3.10 mit dem *Übertragungswirkungsgrad des Triebstranges* η_T und dem *spezifischen Kraftstoffverbrauch* b_e multipliziert und über die Zeit t einer zurückgelegten Strecke integriert, sodass für

$$B_e = \frac{\int_0^T b_e \cdot \frac{1}{\eta_T} \cdot E}{\int_0^T v_F dt} \quad (3.11)$$

gilt. Um den *Volumetrischen Streckenkraftstoffverbrauch* B_S in *liter/100km* anzugeben, wird der *Momentanverbrauch* B_e durch die *Kraftstoffdichte* $\rho_{K\tau}$

dividiert (entspricht *liter/m*) und auf 100km aufgerechnet, so dass gilt:

$$B_S = 10^5 \cdot \frac{B_e}{\rho_{Kr}}. \quad (3.12)$$

3.3.1 Berechnung Energie Effizienz Zahl

Da ein direkter Vergleich von Verbrauchsdaten in *Liter* verschiedener Routen, Fahrzeuge bzw. Lenker nur über den absoluten Verbrauch Auskunft gibt, erweist sich dies nicht hilfreich bezüglich der Bewertung der Fahrweise des Lenkers. Um eine ökonomische Fahrweise zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen, Routen und Lenkern zu vergleichen, bedarf es einer Normierung der Verbrauchsdaten. Somit ist es möglich, dass bei leistungsstarken Fahrzeugen mit folglich höherem Verbrauch dennoch eine ökonomische Fahrweise bewertet werden kann, die gegenüber einer unbedachten Fahrweise in einem sparsameren Fahrzeug besser eingestuft wird. In [6, S. 43] wurde hierfür eine *Energie-Effizienz-Zahl EEZ* eingeführt. Diese dimensionslose Zahl ist das Ergebnis aus dem Vergleich des *Streckenenergiebedarfs* und des momentanen *Streckenkraftstoffverbrauchs*. Der *Streckenenergiebedarf* E_S beschreibt den Bedarf an Energie [J/m] welcher aus den Streckengegebenheiten, z. B. Steigungswiderstand und Straßenmaterial, resultiert. Dieser Wert E_S wird dem *Streckenkraftstoffverbrauch* B_{E_s} gegenübergestellt, somit gilt:

$$B_{E_s} = H_u \cdot \frac{1000 \cdot B_e}{s}, \quad (3.13)$$

wobei H_u den *spezifischen Heizwert* des Kraftstoffes angibt, und folglich

$$EEZ = \frac{E_s}{B_{E_s}} \quad (3.14)$$

berechnet wird. Die nun errechnete *Energie-Effizienz-Zahl EEZ* erlaubt eine einfache und aussagekräftige Bewertung des momentanen Verbrauchs bzw. Fahrstils hinsichtlich ökonomischer Gesichtspunkte. Bei unökonomischer Fahrweise konvergiert die errechnete *EEZ* gegen 0, wobei im Gegensatz dazu bei einem ökonomischen Fahrstil die *EEZ* sich dem Wert 1.0 nähert.

Kapitel 4

Analyse verbrauchsrelevanter Faktoren

4.1 Gliederung und Diskussion der Einflussfaktoren

Durch die mathematische Definition der einzelnen Fahrwiderstände werden Art und Ausmaß der Einflussfaktoren und deren Einwirken auf den Kraftstoffverbrauch erläutert. Es zeichnet sich eine Gliederung der Faktoren ab, welche anhand ihrer Abhängigkeit zu unterscheiden sind von:

- Fahrzeug- und Motortechnik, sowie
- Umgebungsbedingungen.

4.1.1 Einflussfaktoren Fahrzeug- und Motortechnik

Rollwiderstand

Der *Rollwiderstand* ist, wie in Gl. 3.4 ersichtlich, von drei Faktoren abhängig. Davon sind das *Fahrzeugleergewicht* m_F und der *Fahrgeschwindigkeitsabhängige Rollwiderstandsbeiwert* f_r für die fahrzeugtechnischen Faktoren von Bedeutung.

Änderungen dieser Faktoren zur Begünstigung des Kraftstoffverbrauchs sind für das *Fahrzeugleergewicht* z. B. die Verringerung von Zuladungen durch das Entfernen von unnötigen Ballast oder der Austausch von Bauteilen durch gewichtsreduzierte Materialien.

Hinsichtlich des *Fahrgeschwindigkeitsabhängigen Rollwiderstandsbeiwerts* sind die Wahl des Felgen- und Reifentyps - z. B. Winter- bzw. Sommerreifen, Reifen mit verringerter Rollreibung, Reifenbreite - sowie der korrekte Reifendruck von Bedeutung. Zusätzlich ist in anbetracht der Unterschiede für unterschiedliche Materialien das Oberflächenmaterial der Fahrbahn ausschlaggebend. Wie in Tabelle 3.1 ersichtlich, variiert der *Rollwiderstandsbeiwert*

wert zwischen 0,013 (min.) und 0,05 (max.), was einem Faktor von $\approx 3,8$ entspricht.

Luftwiderstand

Der *Luftwiderstand* F_{LW} aus Gl. 3.5 enthält die fahrzeugtechnischen Faktoren Stirnfläche A und den Luftwiderstandsbeiwert c_W . Die Stirnfläche A ist mit einer vertikalen Schattenprojektion des Fahrzeugs auf eine senkrechte Wand, hervorgerufen durch einen zur Wand normalen, horizontalen, aus der Fahrtrichtung kommenden Lichteinfall, vergleichbar. Um den *Luftwiderstand* F_{LW} zu senken, bedarf es die Stirnfläche A zu verkleinern, wie es z. B. durch das Entfernen von Dachaufbauten und Gepäckträger oder durch das Ersetzen von Breitreifen durch Reifen mit geringerer Breite ermöglicht wird.

Um eine Kraftstoffverbrauchsoptimierung an dem Luftwiderstandsbeiwert c_W durchzuführen bedarf es einer Änderung - so kann z. B. die Karosserieform, die Oberflächenmaterialbeschaffenheit oder ein Verbau (Glättung) des Fahrzeugunterbodens ebendiese Änderung hervorrufen.

Steigungs- und Beschleunigungswiderstand

Aus fahrzeugtechnischer Sicht ist für den Steigungswiderstand F_{ST} und den Beschleunigungswiderstand F_a die Masse des Kraftfahrzeugs m_G relevant. Somit ist die Gewichtsreduktion, wie in Gl. 3.6 und Gl. 3.7 ersichtlich, eine Möglichkeit zur Senkung des Widerstands und stellt somit eine Optimierung des Kraftstoffverbrauchs dar.

Übertragungswirkungsgrad des Triebstranges

Der *Übertragungswirkungsgrad* η_T zählt zu den *Inneren Fahrwiderständen* und setzt sich aus den Triebstrangverlusten zusammen, die durch Widerstände von z. B. Nebenaggregaten oder durch den technischen Zustand der Radlager bedingt sind. Sie bilden die Summe der Widerstände von der Kurbelwelle bis zu den Rädern. Wie in Gl. 3.11 ersichtlich, ist der *Übertragungswirkungsgrad* η_T ein wichtiger Faktor, der auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch Einfluss nimmt. Eine Optimierung bezüglich einer Kraftstoffverbrauchssenkung erfolgt durch eine korrekte Instandhaltung der Nebenaggregate sowie durch den Einsatz spezieller Leichtlauföle. Laut dem Öl Hersteller *Castrol*¹ wird durch die Verwendung eines Leichtlauf-Getriebeöls, eine Kraftstoffverbrauchsreduzierung von 1,4 % erzielt. Heitger vermerkt in [17] :

Erst durch die Komposition von perfekt an den Antrieb angepassten Schmierstoffen sind Kraftstoffeinsparungen von bis zu sechs Prozent im Vergleich zum mineralölbasischen Basisprodukt möglich.

¹<http://tinyurl.com/69guspc>, 25.05.2011

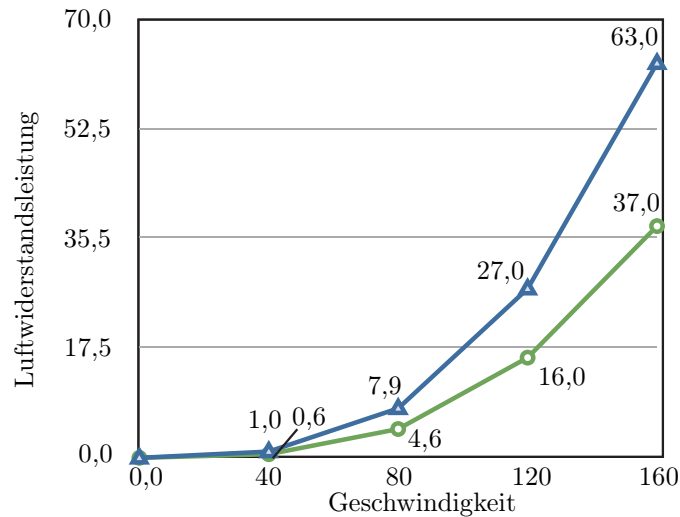


Abbildung 4.1: Anstieg der Luftwiderstandsleistung bei Anstieg der Fahrzeuggeschwindigkeit aus [3] S. 380. Blaue Linie = Offenes Kabriolett mit $c_w = 0,5$ und $A = 2\text{m}^2$, grüne Linie = Keilförmiges Fahrzeug mit $c_w = 0,3$ und $A = 2\text{m}^2$.

Motorbetriebsparameter

Zu den *Motorbetriebsparametern* zählt der *spezifische Kraftstoffverbrauch* b_e , welcher aus den Motoreigenschaften wie z. B. Verbrennungsverfahren oder Einstellungen der Kraftstoffzufuhr resultiert. Eine Optimierung bezüglich der Kraftstoffverbrauchsreduzierung erfolgt z. B. durch *ECO Chiptuning*².

4.1.2 Einflussfaktoren durch Fahr- und Betriebsweise

Geschwindigkeit

Die Wahl der Fahrgeschwindigkeit v_F ist ein gravierender Faktor bei der Berechnung des *Luftwiderstands* F_{LW} . Wie in Gl. 3.5 ersichtlich, steigt dieser quadratisch zur Geschwindigkeit, wodurch hier großes Potential gegeben ist, Kraftstoffverbrauchsreduzierungen durch die Wahl von optimalen Fahrzeuggeschwindigkeiten zu erreichen.

Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges nimmt auch Einfluss auf den *Rollwiderstand* F_R , welcher durch ein Ansteigen des geschwindigkeitsabhängigen *Rollwiderstandsbeiwert* f_r zunimmt (siehe Abb. 4.2 und Gl. 3.4). Dies ist auf eine höhere *Walkverlustarbeit* der Reifen zurückzuführen.

²<http://www.chiptuning-mcchip.com/chiptuning-pkw/eco-optimierung.html>, 25.05.2011

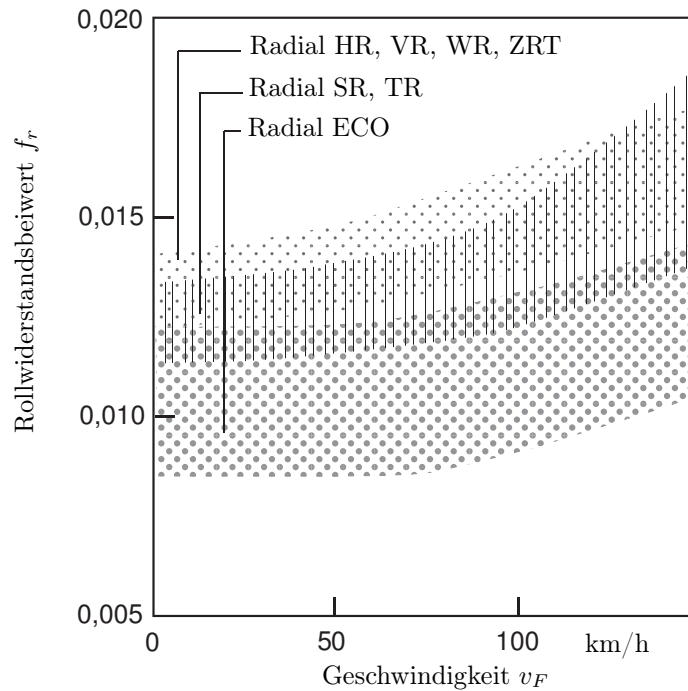


Abbildung 4.2: Rollwiderstand von Pkw-Radialreifen auf glatter, ebener Fahrbahn bei normaler Belastung und vorgeschriebenem Reifenluftdruck.
(Quelle: [3])

Beschleunigung / Fahrodynamik

In Bezug auf die Betriebsweise des Fahrzeugs bildet die Kraftfahrzeugbeschleunigung a_F (siehe Gl. 3.6) den ausschlaggebenden Einflussfaktor. Dieser resultiert aus der Fahrodynamik (Beschleunigung / Verzögerung), die aufgrund eines Verkehrsaufkommnisses, z. B. Stop-and-Go im Stau oder Autobahnfahrt, hervorgeht. Hierbei sind folgende Fälle anzuführen:

- $a_F \geq 0$; entspricht der beschleunigten Vorwärtsfahrt,
- $a_F < 0$: bei Bergfahrt und negativer Beschleunigung und
- $a_F > 0$ und aktiver *Bremsvorgang*: entspricht einer Talfahrt.
Für diese Ausnahme gilt $a_F = 0$ (siehe Gl. 3.10).

Um diesbezüglich Kraftstoffverbrauchsoptimierungen zu erlangen, ist ein harmonisches Fahrverhalten, beschrieben durch nicht übermäßiges Beschleunigen und vorrausblickender Fahrweise nötig.

Triebstrang

Der Triebstrang als Einflussfaktor wird durch die Gangwahl bestimmt. Diesbezüglich unterscheidet man hier zwischen direkter Gangwahl bei Hand-

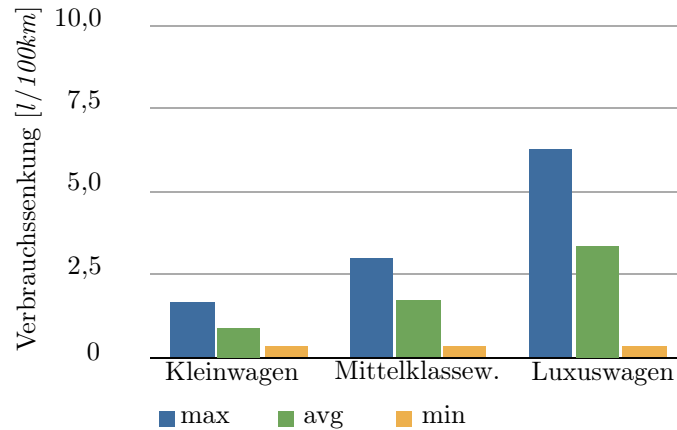


Abbildung 4.3: Mögliche Verbrauchssenkung durch die Absenkung der Schaltdrehzahl von 2500min^{-1} auf 2000min^{-1} . (Quelle: <http://www.motorlexikon.de>, 14.06.2011)

schaltgetriebe und dem manuellen Eingriff (vorzeitiges Hochschalten) bei automatischen Getrieben bzw. provoziertes Hochschalten des Automatikgetriebes durch Fahrpedalbedienung. Ein Überblick über die möglichen Kraftstoffverbrauchseinsparungen ist in Abb. 4.3 ersichtlich.

Elektronische Verbraucher

Durch die wachsende Anzahl von Assistenzsystemen und Komfortelektronik in Kraftfahrzeugen bildet der Stromverbrauch dieser Einrichtungen einen beträchtlichen Energieaufwand und führt folglich zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Laut [24] führt ein um 100 Watt geringerer Stromverbrauch zu einer Kraftstoffverbrauchsoptimierung von 1,3 %. In Tabelle 4.1 ist eine Listung verschiedener Stromverbraucher im Kraftfahrzeug verzeichnet. Nicht gelistet ist die Klimaanlage, die zu den größten Stromverbrauchern zählt. Wie ein Bericht von *Stromverbrauch.de*³ vermerkt:

Wer dosiert kühlt, verbraucht etwa 0,3 bis 0,7 Liter je Stunde Treibstoff, das sind derzeit etwa 0,50 bis 1,00 Euro pro Stunde.

...

Um zum Beispiel die Innenraumtemperatur von 31 Grad auf 22 Grad herunterzukühlen, verbrauchten Testfahrzeuge zwischen 2,5 und 4,2 Liter auf 100 gefahrene Kilometer mehr.

³<http://www.stromverbrauch.de/Benzinhungrige-Klimaanlage-131>, 25.05.2011

Verbraucher	[kW]
Großpflaster	0,015
Heckscheibenheizung	0,100
Frontscheibenheizung	0,700
Wischermotor	0,100
Außenbeleuchtung	0,160
Steuergeräteversorgung	0,200
Kraftstoffpumpe	0,150
Borddisplay	0,150
Soundanlage	0,200
Bordcomputer	0,150
Lüftungsgebläse	0,100
ABS/FDR-Pumpen	0,600
Summe	2,910

Tabelle 4.1: Stromverbraucher und deren Leistungsverbrauch.
(Quelle: <http://www.motorlexikon.de>, 14.06.2011)

4.1.3 Kraftstoffverbrauchsenkendes Verhalten

Die zuvor angeführten Einflussfaktoren verdeutlichen die Ansätze ein Fahrverhalten zu entwickeln, welches einer Optimierung des Kraftstoffverbrauchs zugute kommt. Zusammengefasst bilden diese folgende Punkte:

- bei niedrigst möglichen Drehzahl in den höheren Gang schalten,
- Motor mit hoher Last und niedriger Drehzahl betreiben,
- gleichmäßiges, vorausblickendes Fahren; unnötige Fahrdynamik vermeiden,
- Geschwindigkeit verringern,
- längere Leerlaufphasen vermeiden, z. B. durch Abstellen des Motors,
- nicht benötigte Stromverbraucher abschalten und
- Routenwahl.

Durch das korrekte Zusammenspiel dieser Punkte lässt sich eine maximale Kraftstoffersparnis erzielen, womit dies eine der Anforderungen an *Eco Feedbacks* ist.

Kapitel 5

Konzept

5.1 Informationsvisualisierung im Autointerieur

Die Ideenfindung geschah in Anbetracht der Interaktion die der Fahrzeuglenker mit dem jeweiligen EcoFeedback eingeht. Hierzu wurde besonderer Augenmerk auf visuelle Darstellung der relevanten Informationen für ökonomisches Fahren gelegt. Dies geschah unter der Annahme, dass moderne und zukünftige Fahrzeuge (siehe Abb. 5.1) vermehrt über digitale Displays verfügen, die eine freie und dynamische Gestaltung deren Inhalte ermöglichen. Somit bieten diese Displays nicht nur die Möglichkeit, Inhalte auf die spezielle Fahrsituation abgestimmt darzustellen, gleichwohl auch die Option, bezogen auf die Bedürfnisse des temporären Anwenders einzugehen.



Abbildung 5.1: Hyundai i-Flow Concept auf der Genfer Automesse 2010.
(Bildquelle: <http://tinyurl.com/6b9922n>, 14.06.2011)

Als zusätzliche Herausforderung gestaltet sich das Anwendungsszenario. Ein EcoFeedback in einer Fahrumgebung sollte nicht nur den in Kapitel 1 zuvor angeführten Kriterien entsprechen. Als wichtiger Faktor muss auch in Betracht gezogen werden, dass der Fahrzeuglenker nicht in seiner ursprünglichen Tätigkeit, dem sicheren Lenken des Fahrzeugs, unnötig abgelenkt oder gestört wird. Jedoch sollte das Feedback den Fahrzeuglenker mit genügend Informationen über dessen ökonomisches Handeln in momentaner Fahrsituation versorgen. Hierzu bedarf es einer Klassifizierung des jeweiligen Feedbacks anhand dessen Aktualität und Informationsgehalts, sowie folglich der optimalen Platzierung in der Fahrumgebung.

In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Fahrzeuglenker relevanten Displays gelegt. Darunter sind jene Displays zu verstehen, die Informationen exklusiv für den Lenker darstellen, wie:

- Kombiinstrument und
- Head-Up-Display.

Kombiinstrumente: zeichnen sich dadurch aus, dass üblicherweise alle betriebsrelevanten Daten des Kraftfahrzeugs für den Fahrzeuglenker dargestellt werden. Hierunter zählen nach ihrer Dringlichkeit gelistet:

Instrument	Dringlichkeit
Tachometer Drehzahlmesser	kurzfristig
Uhrzeit Streckenangaben Temperatur, Tankfüllung sonstige Kontroll- und Warnleuchten	mittel- langfristig

Diese Dringlichkeit kann je nach Fahrsituation bzw. Vorlieben des Fahrzeuglenkers variieren. So wird bei Sportwagen¹ oftmals der Fokus im Kombiinstrument auf den Drehzahlmesser gelegt, anders als wie in Kombiinstrumenten von z. B. Kleinwagen².

Head-Up-Displays: bieten die Möglichkeit, dem Fahrzeuglenker Informationen direkt in das Sichtfeld einzublenden. Um Verdeckungen vom Sichtfeld und Ablenkung des Fahrers zu minimieren, werden in diesen Displays Informationen nur sehr reduziert eingeblendet. Der Vorteil dieser Displays ist die sehr kurze Zeit, die der Fahrzeuglenker benötigt, um zwischen der visualisierten Information und dem Verkehrsgeschehen hin und zurück zu fokussieren.

In [4,5] betrachtet Charissis neue Anwendungsmöglichkeiten, die über die konventionellen Fahrzeugdaten, wie Geschwindigkeit, Drehzahl etc., hinaus-

¹<http://www.porsche.at/html/page.php?id=957>, 30.05.2011

²<http://www.powerup2020.com/images/2011-Fiat-Uno-Gauge.jpg>, 30.05.2011

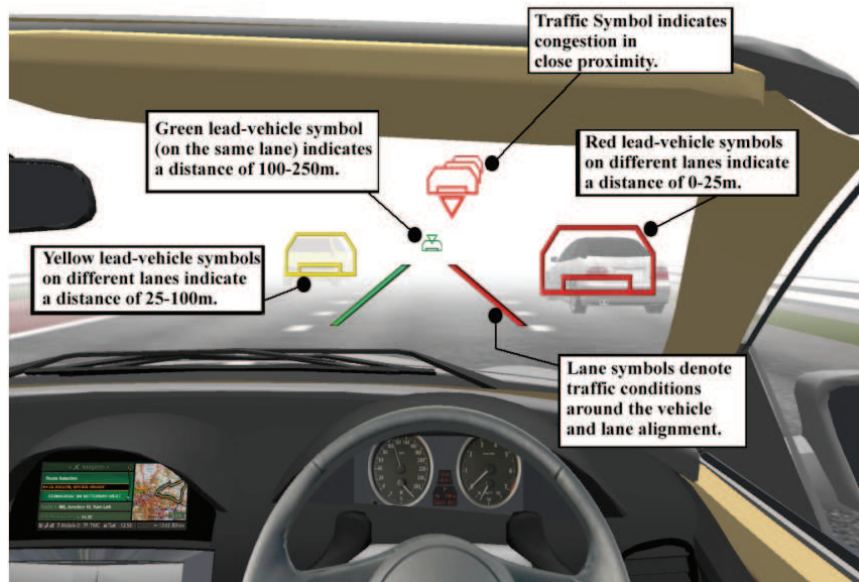


Abbildung 5.2: Das Konzept eines Verkehrsassistenten mit Vollbilddarstellung im Head-Up-Display. (Bildquelle: [4])

gehen. Charissis beschreibt Möglichkeiten zur Visualisierung von Verkehrsassistenten, die die benötigte Information direkt an die benötigte Position im Sichtfeld darstellen. Als konkretes Anwendungskonzept präsentiert Charissis die farbliche Markierung von Fahrzeugen im Sichtfeld in Relation zu ihrem Abstand zum Auto des Fahrzeuglenkers (siehe Abb. 5.2). *General Motors*³ arbeitet hierfür an neuen Head-Up-Displays, die eine Vollbilddarstellung über die gesamte Windschutzscheibe ermöglichen sollen. Diese neuen Möglichkeiten bieten folglich neue Herausforderungen an die Informationsgraphiker. Die von Kamiya in [16] durchgeführten Tests zeigen, dass die Probanden für eine in 10 Buchstaben dargestellte Information, 1,5 Sekunden benötigen, um diese zu erkennen und zu verstehen. Dies entspricht bei einer Fahrgeschwindigkeit $v_F = 70 \text{ km/h}$ einer Distanz d von:

$$\frac{v_F}{3,6} = 19,45 \text{ m/s} \quad (5.1)$$

$$d = 19,45 \text{ m/s} \cdot 1,5 \text{ s} = 29,16 \text{ m}$$

die nicht unter voller Aufmerksamkeit vom Fahrzeuglenker zurückgelegt wird.

Nach Berücksichtigung dieser Punkte wurde eine Menge von verschiedenen Feedbacks erdacht, um diese wie folgt als einen *Papierprototypen* zu realisieren.

³<http://www.wired.com/autopia/2010/03/gm-next-gen-heads-up-display/>, 30.05.2011

5.2 Papierprototyp

5.2.1 Instrumente und Szenario

Für den ersten Anlauf wurden fünf unterschiedliche Feedbacks entwickelt:

Feedback	Dringlichkeit	Positionierung
Ambient Light GearGuide	kurzfristig	Head-Up-Display
EcoTrophy EcoMeter EcoFlower	mittel- langfristig	Kombiinstrument Amaturenbrett

und Aufgrund ihrer Dringlichkeit klassifiziert. Die Elemente des Papierprototypens (siehe Abb. 5.3) sind folgend im Detail beschrieben.

EcoFeedbacks

Ambient Light: Dieses Feedback basiert auf den bestehenden EcoFeedbacks des *Honda Insight* und *Nissan Leaf*. Eine Projektion der Geschwindigkeit in das periphere Sichtfeld des Fahrzeuglenkers durch die Windschutzscheibe stellt das Hauptelement dar. Eine farbliche „Aura“ um die numerische Geschwindigkeitsdarstellung vermittelt dem Fahrzeuglenker seinen momentanen Fahrstil. Das Erhalten einer „grünen Aura“ sollte den Fahrer dazu motivieren, seinen Fahrstil ökonomisch zu gestalten.

Gear Guide: Dies ist ein Assistent der bei der richtigen und rechtzeitigen Gangwahl behilflich sein soll. Somit wird dem Fahrzeuglenker verdeutlicht, wie der Motor am optimalen Betriebspunkt betrieben wird.

Visualisiert wird der *Gear Guide* am linken Rand im *Head-Up-Display*. Bei unökonomischer Fahrweise durch zu hohe Drehzahl, erscheint am linken Rand ein roter Kreis mit dem momentan eingelegten Gang. Darüber erscheint ein grüner Kreis, der den ökonomischen Gang in der momentanen Fahrsituation vorschlägt. Sobald der Fahrzeuglenker in den ökonomischen Gang wechselt verschwinden die Kreise und werden durch eine kurze Repräsentation der erlangten *EcoPoints* ersetzt. Diese *EcoPoints* werden als Belohnung und Motivation für ökonomisches Gangschalten vergeben und fließen in die Bewertung, der später in diesem Kapitel erläuterten *EcoTrophy* ein.

EcoTrophy: Eine Auswertung der erlangten *EcoPoints* resultiert in einer Rangplatzierung innerhalb einer Community. Somit soll der Fahrzeuglenker motiviert werden, sich in dieser Community zu profilieren, bzw. sich eigene Ziele in der Rangplatzierung zu setzen.

Dargestellt wird dieses Feedback im Kombiinstrument, sobald das Fahrzeug zum Stillstand kommt (z. B. Garage, Ampel, Tankstelle). Das Kombiinstrument wird zur Gänze mit einer Highscoreliste gefüllt, aus der ersichtlich

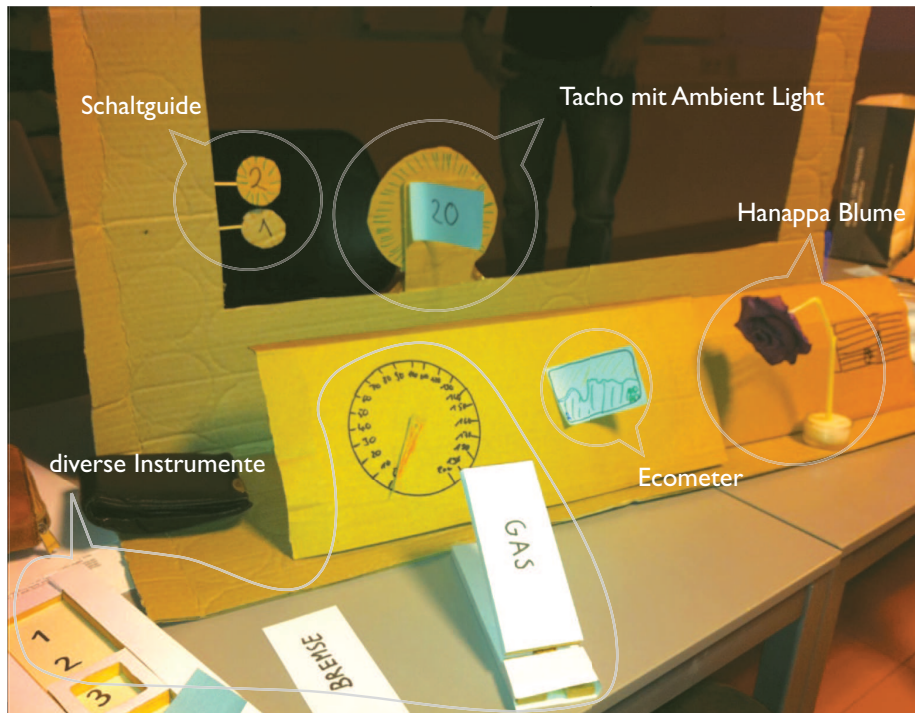


Abbildung 5.3: Aufbau des Papierprototyps.

ist, wer die Rangliste anführt, bzw. an welcher Position sich der Anwender befindet. Setzt der Fahrzeuglenker die Fahrt fort, verblasst die Darstellung der Rangliste und das Kombiinstrument geht in den *Fahrmodus* wieder über.

Dieses Feedback gibt nicht Auskunft über den unmittelbaren Fahrzustand, jedoch beleuchtet es das langfristige Fahrverhalten und erlaubt somit dem Anwender eine kritische Auseinandersetzung mit seinem ökonomischen Handeln in den vorangegangenen Fahrten.

EcoMeter: Dieses Feedback wurde für das Kombiinstrument konzipiert und gibt Aufschluss über das Fahrverhalten im mittelfristigen Zeitrahmen. Als mittelfristiger Zeitrahmen wird z. B. ein Tag angenommen, oder der Zeitrahmen, bezogen auf die Dauer einer Reise, ähnlich einem Tageskilometerzähler. Die Funktionsweise ist angelehnt an das Balkendiagramm des Eco-Feedbacks wie im *Toyota Prius*, jedoch wird bei dem *EcoMeter* der Verlauf als graphische Linie dargestellt, um die erlangten Verbrauchswerte auf die zurückgelegte Strecke zu projizieren.

Ein zusätzliches Feature bildet der eingezeichnete Graph der Community, der dem Kraftfahrzeuglenker erlaubt, seine Werte in Echtzeit mit denen anderer Fahrer auf diesem Streckenabschnitt zu vergleichen. Hierzu wird an-

genommen dass die Daten von momentanen Verkehrsteilnehmer über *Car-to-Car*⁴ oder *Car-to-X*⁵ zugänglich gemacht werden.

EcoFlower: Ein eher aussergewöhnliches Feedback bildet eine Kunststoffblume am Amaturenbrett. Angelehnt an die dekorative Blumenvase in Modellen des *Volkswagen Käfer* im Baujahr 1953 (siehe Abb.5.4), findet sie in diesem Papierprototypen eine Anwendung als EcoFeedback. Dieses Feed-



Abbildung 5.4: Platzierung einer Blumenvase im VW Käfer Baujahr 1953.
(Bildquelle: Toadstools <http://tinyurl.com/5twemm2> , 31.05.2011)

back agiert sehr subtil, da es sich am äussersten Rand des Sichtfeldes des Fahrzeuglenkers befindet. Die Blume visualisiert anhand ihrer Haltung das mittel- bis langfristige Fahrverhalten. Durch das Visualisieren eines längeren Zeitraumes werden hastige Bewegungen der Blume, die die Aufmerksamkeit des Fahrers beeinflussen könnten, vermieden.

Die Motivation zu ökonomischen Handeln soll durch die Assoziation: „*unökonomische Fahrweise - verwelkende Blume*“, sowie durch die Identifizierung des Feedbacks als Charakter, um dessen Wohl gesorgt werden muss, initiiert werden.

⁴http://de.wikipedia.org/wiki/Car2Car_Communication, 31.05.2011

⁵<http://tinyurl.com/689pd8s>, 31.05.2011

Diverse Instrumente

Um die Interaktion mit den zuvor genannten Feedbacks zu Erlauben und zu Testen, wurden zusätzliche Instrumente realisiert. Ein beweglicher Zeigertachometer sollte die Testpersonen über ihre momentane Geschwindigkeit informieren. Weiters wurden für die Testpersonen ein Gas- und Bremspedal zur Verfügung gestellt, um mögliche Auswirkungen der EcoFeedbacks auf z. B. die Gaspedalstellung zu beobachten. Ein beweglicher Schieber auf einer Zahlenreihe fungierte als Gangschaltung, die für das Testen des *Gear Guides* von Nöten war.

5.2.2 Prototypevaluierung

Aufgaben an die Testpersonen

Für anschließende Tests wurden folgende sechs Aufgaben entwickelt:

1. Anfahren und das Fahrzeug auf 50 km/h beschleunigen
2. Von 50 auf 70 km/h beschleunigen und die Geschwindigkeit halten
3. 70 km/h auf der Landstraße fahrend, einen Überholvorgang durchführen
4. Geschwindigkeit aufgrund einer roten Ampel verringern und anschließendes Anhalten
5. 130 km/h auf der Autobahn fahrend, abruptes Bremsmanöver mit anschließender Beschleunigung
6. Beurteilen einer Situation anhand diverser EcoFeedbacks

die darauf abzielten, bestimmte Interaktionen zu beleuchten. Für *Aufgabe 1-2* war primär vorgesehen, dass der Testperson der Umgang mit den Displays und den Interaktionsmöglichkeiten (dynamisches Gas- bzw. Bremspedal, Gangschaltung) vertraut wurde. Durch die einfache Handlung des Beschleunigens, sollten sich erste Displayelemente dem Fahrzeuglenker von selbst erklären.

Bei *Aufgabe 3* wurde die Reaktion des Probanden ergründet, die aus der Diskrepanz zwischen ökonomischen Handeln und verkehrsbezogenen Motiven resultiert. Diese Diskrepanz wurde durch den Überholvorgang der ein maximales Beschleunigen und ergo unökonomisches Handeln fordert provoziert.

Mit *Aufgabe 4* galt es zu untersuchen, wie die Testperson die Inhaltsänderungen des Kombiinstrument, hervorgerufen durch den Stillstand, wahrnimmt. Der wichtige Aspekt hierzu ist, dass der Stillstand nicht dauerhaft vorgesehen war (z. B. nach Einparken in die Garage), sondern nur eine temporäre Pause im Fahrzyklus darstellte. Zugleich wurde das Verständnis der *EcoTrophy*, die durch den Stillstand im Kombiinstrument sichtbar ist, geprüft.



Abbildung 5.5: Evaluierung des Papierprototypen

Die Erwartungshaltung des Lenkers wurde bei *Aufgabe 5* durchleuchtet. Hierzu wurde eine zu Aufgabe 3 ähnliche Situation dargestellt, die darauf abzielte, die Testperson zum Überprüfen der EcoFeedbacks zu bewegen. Somit wurde geprüft, ob die Testperson die EcoFeedbacks *EcoMeter* und *Ambient Light* verstanden hatte und die Darstellung auch zum Bestätigen seines Fahrverhalten nutzte.

Für *Aufgabe 6* war ein Überprüfen der Verständlichkeit der mittel- bis langfristigen EcoFeedbacks *EcoMeter* und *EcoFlower* vorgesehen. Hierzu wurde für die Testperson die Situation einer Urlaubsfahrt auf der Autobahn mit überdurchschnittlich hoher Geschwindigkeit dargestellt. Nun sollte der Proband die unterschiedlichen Anzeigen interpretieren.

Die Evaluierung (siehe Abb.5.5) wurde an drei Personen, männlich, im Alter von 25-28 Jahren, durchgeführt. Der Testleiter erteilte dem Probanden jeweils die Anweisung für die nächste Aufgabe und modifizierte das Erscheinungsbild des Papierprototypens. Ein Testschreiber protokollierte die Handlungen und Kommentare des Probanden schriftlich. Zusätzlich wurde am Ende des Testablaufs, der Proband über seine Favoriten unter den verwendeten EcoFeedbacks befragt.

Diskussion der Resultate

Die sich ergebenden Resultate gaben Aufschluss über die passende Anwendung des jeweiligen Feedbacks. Das *Ambient Light* wurde von allen Teil-

nehmern erkannt, jedoch fehlte das korrekte Verständnis dazu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der zeitliche Bezug von Handlung und Reaktion des Feedbacks nicht optimal funktionierte. Dieses Feedback war auf kurz- bis mittelfristigen Zeitraum konzipiert und unterdrückte daher kurzfristige Spitzenwerte. Dies führte zu Verwirrungen bei den Probanden, da diese den Visualisierungen im *Head-Up-Display* kurzfristige und dringliche Feedbacks zuschrieben. Diese erwartete Kurzfristigkeit wurde von den sich in Echtzeit ändernden Werten des Tachometers, dessen „Aura“ vom Ambient Light gebildet wurde, unterstrichen. Somit hatte sich herauskristallisiert, dass das *Ambient Light* nicht für mittelfristige Visualisierungen im *Head-Up-Display* geeignet scheint. Als die daraus erkannten Verbesserungen gelten nun eine Verkürzung der Visualisierungszeitspanne und/oder eine anderweitige Platzierung im Cockpit.

Im Gegensatz dazu wurde der *Gear Guide* sehr positiv angenommen. Dieses Feedback hatte sich bei der abschließenden Probandenbefragung als das hilfreichste EcoFeedback offenbart. Bei Aufgabe 3 wurde die Rückmeldung des *Gear Guides* von allen Testpersonen bewusst ignoriert.

Die größte Verwirrung trat bei der Änderung des Kombiinstruments im Stillstand auf. Die *EcoTrophy* wurde von allen Probanden als diese erkannt, jedoch empfanden alle Testpersonen ein Fehlen des Bezugs zwischen *EcoTrophy* und den im *Gear Guide* erworbenen *EcoPoints*. Folglich wurden als Verbesserungen bezüglich Visualisierung der Zeitpunkt der Änderung des Kombiinstruments auf das Starten bzw. Abstellen des Fahrzeugs gelegt. Bezüglich des Erkennens des Bezugs zwischen *EcoPoints* und *EcoTrophy*, soll eine einheitliche Farbe und ein identisches Blattsymbol in beiden Visualisierungen aushelfen.

Das *EcoMeter* zeichnete sich als leicht verständliches Feedback ab. Durch den Echtzeit-Graphen wurde dem Betrachter eine detaillierte jedoch einfache Darstellung geboten. Die numerischen Werte der Achsen des Graphen waren nicht sichtbar, wodurch dem Graphen der technische Aspekt entzogen wurde. Dies förderte jedoch die Einfachheit durch das Visualisieren relativer Werte.

Als das EcoFeedback mit der einfachsten Darstellung erwies sich die *EcoFlower*. Die Testpersonen kommentierten die Darstellung der Blume als selbsterklärend, jedoch wurde sie nicht als sehr hilfreich empfunden.

Abschließend zur Diskussion wird nochmals darauf hingewiesen, dass der Papierprototyp nur Aufschluss über die Verständlichkeit der logischen visuellen Abfolgen in der sehr abstrakten Simulationsumgebung gab. Durch die unterschiedlichen Dringlichkeiten der Feedbacks (kurz-, mittel-, langfristig), sind diese nicht in direkter Gegenüberstellung der Effektivität zueinander vergleichbar. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bildeten eine wichtige Grundlage zur Weiterentwicklung der EcoFeedbacks und der Simulationsumgebung.

5.3 Konzeptionierung

5.3.1 Grundmodell der Simulationsumgebung

Um die EcoFeedbacks in einer Fahrsituation zu evaluieren und um etwaige Tests zu ermöglichen, bedurfte es eine geeignete Simulationsumgebung zu entwickeln. Hierzu wurden folgende Anforderungen, wie:

- Schaffen einer Verkehrssituation,
- Realitätsnahe Eingabekontroller,
- Berechnung der fahrzeugtechnischen Werte und
- Flexible Visualisierung von Instrumenten

gestellt. Daraus ergab sich, wie in Abb. 5.6 ersichtlich, ein Grundmodell von Komponenten die die zuvor angeführten Anforderungen bedienen.

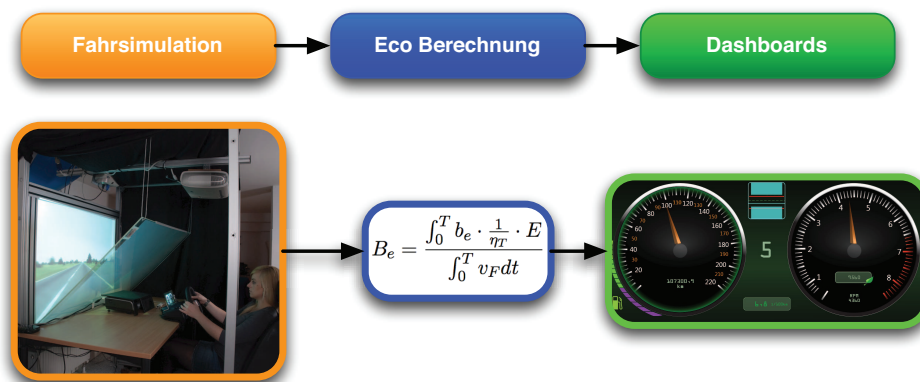


Abbildung 5.6: Aufbau der Simulationsumgebung.

Fahrsimulation-Software

Die Anforderung an die Fahrsimulation war das Schaffen einer realitätsnahen Fahrsituation. Eine Fahraufgabe sollte die Testpersonen zum achtsamen Fahrzeuglenken fordern, um so die Einwirkung der EcoFeedbacks in z. B. Stresssituationen zu beleuchten. Zusätzlich sollte die Fahrsimulation der Testperson ermöglichen, ihre Fahrweise auf die Reaktion der EcoFeedbacks zu schlussfolgern und vice versa mit diesen zu interagieren.

In technischer Hinsicht war die Verfügbarkeit der fahrtechnischen Parameter wie: Geschwindigkeit, Motordrehzahl, Gas- und Bremspedalstellung sowie der momentan gewählte Gang von Bedeutung. Für das virtuelle Fahrzeugmodell bedurfte es noch den fahrzeugtechnischen Parameter wie: Gewicht, Übersetzung der einzelnen Gänge, sowie eine Vollastkurve des Motors

um diese anderweitig für Berechnungen des Kraftstoffverbrauchs zu verwenden.

Berechnung der Energie-Effizienz

Dieses Modul sollte die benötigten Berechnungen bezüglich des Kraftstoffverbrauchs berechnen. Dieses empfängt die fahrtechnischen Daten der Fahrsimulation und berechnet den momentanen Kraftstoffverbrauch, den Durchschnittsverbrauch sowie den Wert der Energie-Effizienz (näheres siehe Kapitel 3.3.1). Hierzu sollte ein dem in der Fahrsimulation verwendeten virtuellen Fahrzeugmodell identisches Berechnungsmodell herangezogen werden, um einerseits aus dem Fahrverhalten korrekte Verbrauchswerte zu berechnen und andererseits dem Fahrzeuglenker ein stimmiges Fahrverhalten zu gewährleisten.

Dashboard Framework

Um die verfügbaren Displays flexibel nutzen zu können, sollte ein Framework für diverse Fahrzeuginstrumente entworfen werden. Es sollte die Möglichkeit bieten, rasch neue Instrumente zu entwerfen, die über die relevanten Fahrzeugdaten verfügen. Somit sollte die Aufgabe des Frameworks die grafische Visualisierung aller Instrumente sein, sowie die Umrechnung der Fahrzeugdaten in Werte, die für die Animation der Instrumente relevant waren.

Fahr Simulator-Hardware

Den geeigneten Rahmen für die Fahrsimulation sollte vom Fahr Simulator gegeben sein. Hierzu war es wichtig ein Setup zu entwickeln, dessen Aufgabe es war mehrere Projektionsflächen, sowie Raum für ein simuliertes Fahrzeugcockpit zu bieten. Als von einander unabhängige Projektionen sollten das Kombiinstrument, die Windschutzscheibe (Projektion der Straße) und ein Head-Up-Display realisiert werden. Für die Testperson war ein Lenkrad mit Schaltfunktion und diversen Schaltern, sowie ein Brems- und Gaspedal vorgesehen.

5.3.2 Änderung getesteter EcoFeedbacks

Die im *Papierprototypen* realisierten EcoFeedbacks wurden nun in Anbetracht deren Evaluierung (siehe Kapitel 5.2.2) vollends konzipiert. Folgend sind die vorgenommenen Änderungen erläutert.

Ambient Light

Hinsichtlich dieses Feedbacks wurde eine Anpassung des Zeitfensters der Datenvisualisierung vorgenommen. Dieses Zeitfenster der Verbrauchsdatenana-

lyse sollte nunmehr zwischen 1-4 Sekunden betragen. Somit würden zeitlich feiner aufgelöste Daten dem Betrachter präsentiert und Änderungen der Fahrweise in kurzer Zeit sichtbar sein. Eine genauere Festlegung dieses Zeitfensters sollte bei der Implementierung und anschließenden Tests festgelegt werden. Da das *Ambient Light* Feedback nicht als Echtzeitfeedback fungiert, wurde dessen Platzierung in das Kombiinstrument verlegt. Dort würde es als farblicher Ring in einem analogen Tachometer nachempfundenen Instrument, das ökonomische Verhalten visualisieren (siehe Abb. 5.7a).

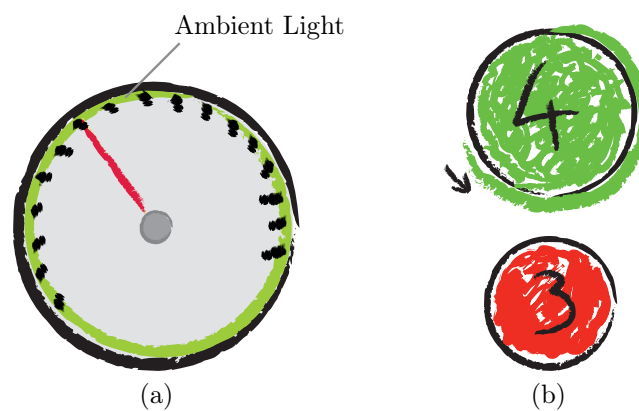


Abbildung 5.7: (a) Konzept des Ambient Lights. Das grüne Licht am Rand des Tachometers visualisiert ein ökonomisches Fahrverhalten. (b) Konzept des Gear Guides.

Gear Guide

Änderungen erfuhr dieses Feedback bei der Darstellung der ablaufenden Zeitspanne, in dieser der Fahrzeuglenker den nächsten Gang wählen sollte. Der im *Head-Up-Display* erscheinende Gangvorschlag soll nun mit einem Ring ausgestattet werden, dessen Größe im Laufe der Zeit gegen den Uhrzeigersinn abnimmt (siehe Abb. 5.7b). Dies soll dazu motivieren, schnellstmöglich in den vorgeschlagenen Gang zu schalten. Zusätzlich würde die Anzeige des Gangvorschlags grün eingefärbt, hingegen der momentane unökonomische Gang sollte mit roter Farbe warnen. Dies sollte die periphere Wahrnehmung des *Gear Guides* ermöglichen, da ein Aufleuchten eines grünen Feldes im *Head-Up-Display* genügt, um den Fahrzeuglenker zu symbolisieren, dass ein ökonomischer Gang zu wählen ist.

Bei erfolgter ökonomischer Gangwahl würden die gesammelten Punkte in grüner Farbe kurz erscheinen und im Kombiinstrument mit der selben Farbe im *EcoPoints*-Zähler aufscheinen. Somit ist bei Fahrt das Sammeln der Punkte ersichtlich und die Verknüpfung zur *EcoTrophy* erleichtert.



Abbildung 5.8: Ein einfaches Darstellen des ökonomischen Fortschritts durch die EcoTrophy soll den Fahrzeuglenker zu weiteren ökonomischen Handeln in der Community motivieren.

EcoTrophy

Für dieses EcoFeedback wurde eine Änderung des Zeitpunkts der Darstellung vorgenommen. Die *EcoTrophy* sollte nicht mehr selbstständig bei Fahrzeugstillstand am Kombiinstrument erscheinen. Nur beim Anstellen der Zündung sowie beim Abstellen des Fahrzeugs ist vorgesehen, dass dieses Feedback am Kombiinstrument erscheint und den Fahrer über seinen momentanen Punktestand bzw. Rangplatzierung informiert (siehe Abb. 5.8).

5.3.3 Konzipierung neuer EcoFeedbacks

Zusätzlich zu den bestehenden EcoFeedbacks wurden unter Rücksichtnahme der gewonnenen Erkenntnisse, neue Feedbacks entwickelt.

EcoBalance

Dieses Feedback ist an ein EcoFeedback im *Honda Insight* angelehnt. Es zielt darauf ab, den Fahrzeuglenker zu einem flüssigen Fahrverhalten zu motivieren. Hierzu werden die Beschleunigung sowie die Verzögerung anhand eines Balkens (in Abb. 5.9a grün gefärbt) zwischen zwei Blöcken (in der Abb. 5.9a, blau eingefärbt) visualisiert. Durch übermäßiges Beschleunigen oder Abbremsen bewegt sich der Balken in die blauen Bereiche und stellt somit ein unökonomisches Handeln dar. Der Fahrer soll durch die Information über seine Fahrdynamik dazu motiviert werden, diese anhand dieses EcoFeedbacks sehr harmonisch zu gestalten. Die Visualisierung der Daten basiert auf Echtzeit-Wiedergabe, jedoch sind zwei Spitzenindikatoren vorgesehen (in der Abbildung rot strichliert), die den Fahrer auch nach einem Bremsvorgang informieren, welche Spitzenwerte dieser verursachte. Somit fände dieses EcoFeedback im *Head-Up-Display* sowie im *Kombiinstrument* an Anwendung.

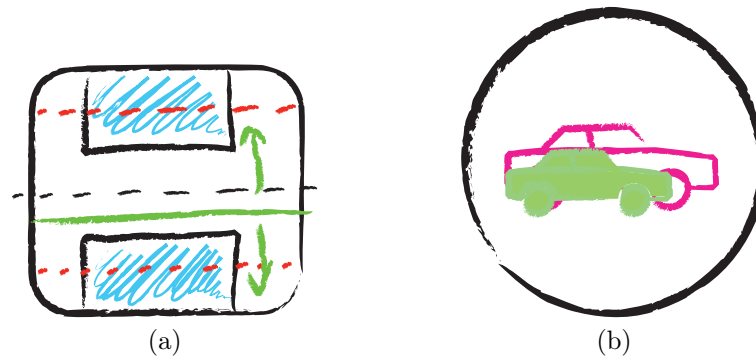


Abbildung 5.9: Konzept des EcoBalance (a), Konzept des EcoLoadAdvisor (b).

Eco Load Advisor

Um eine Kraftstoffersparnis durch Gewichtsreduzierung zu erzielen, soll beim Anstellen der Zündung, dieses EcoFeedback den Fahrzeuglenker über seine zusätzlich Beladung informieren. Eine grafische Repräsentation der Zuladung im Gegensatz zu dem Leergewicht (siehe Abb. 5.9b) sowie eine numerische Darstellung des zu erwartenden durchschnittlichen Mehrverbrauchs sollen den Fahrzeuglenker motivieren, das Gewicht der benötigten Zuladung stets zu überprüfen. Die Platzierung dieses EcoFeedbacks war ähnlich der *Eco-Trophy* im Kombiinstrument vorgesehen.

EcoBubble

Dieses als mittel- bis langfristiges konzipierte EcoFeedback ist eine Ableitung des *EcoMeters*. Es zielt darauf ab den momentanen Kraftstoffverbrauch in einer Farbe bezüglich ökonomischer Hinsicht kodiert, in einem Jahresringe-Diagramm darzustellen. Somit ist ähnlich einem klassischen Diagramm, die Verbrauchshistorie ersichtlich, jedoch entspricht in diesem Fall die horizontale x -Achse den „Jahresringen“ der *EcoBubble* (siehe Abb. 5.10a).

Als Motivation für den Fahrzeuglenker soll die Aufklärung über sein mittel- bis langfristiges Fahrverhalten dienen. Zusätzlich soll dieses Feedback den Fahrer zum ökonomischen Fahren motivieren anhand dessen grafischen Eigenschaften. Je ausgewogener und ökonomischer der Fahrzeuglenker fährt, desto harmonischer und gleichmässig gefärbt ist die *EcoBubble*. Im Idealfall wäre die *EcoBubble* eine grüne Blase. Bei unökonomischer Fahrweise würden farbliche Dissonanzen entstehen, die im Gegenzug den Fahrer wiederum zu ökonomischen Handeln motivieren sollen.

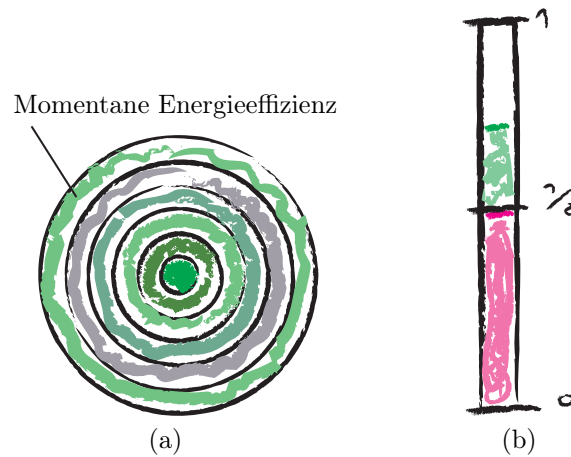


Abbildung 5.10: Das Konzept der EcoBubble (a) und der EcoFuelGauge (b).

EcoFuelGauge

Um die Vertrautheit mit konventionellen Anzeigen in Fahrzeugcockpits sich zu Nütze zu machen, wurde mit der *EcoFuelGauge* versucht, bestehende Instrumente am Amaturenbrett zu verbessern bzw. mit zusätzlichen Informationsgehalt zu visualisieren. Dieses EcoFeedback präsentiert zusätzlich zu dem verbleibenden Tankinhalt, den Tankinhalt der noch bei ökonomischer Fahrweise vorhanden wäre. Dies ist ähnlich den schon bestehenden Anzeigen von der errechneten Reichweite des Fahrzeugs. Somit dient dieses Instrument nicht nur als Tankanzeige, sondern dient auch als mittelfristiges EcoFeedback.

Als Motivation für den Fahrzeuglenker soll der mögliche „Mehrinhalt“ (in Abb. 5.10b, grün eingezeichnet) und die damit verbundenen Treibstoffsparnis dienen. Je größer die Dissonanz zwischen aktuellen Inhalt (magenta) und „Mehrinhalt“ (grün) desto größer sollte die Motivation des Fahrers angesprochen werden.

Green Street Project

Dieses EcoFeedback wurde konzipiert um die Beziehung zwischen dem Fahrzeuglenker zu seiner Fahrumgebung zu verstärken. Ein Manko vieler EcoFeedbacks ist, dass deren Auswirkungen auf die Umwelt nicht unmittelbar verfolgt werden können. Das ökonomische Handeln hat bei vielen EcoFeedbacks nur sehr abstrakte Ziele und Erfolge, die vom Fahrzeuglenker als Mehrwert empfunden werden können. Jedoch fehlt jegliche Lokalisierung wo die Auswirkungen des ökonomischen Fahrens zu tragen kommen.



Abbildung 5.11: Mockup von Green Street Project.
(Quelle Originalbild: <http://tinyurl.com/6kotb7w>, 31.05.2011)

Das *Green Street Project* versucht dem Fahrzeuglenker die Auswirkungen des Autoverkehrs ortsbezogen zu visualisieren. Hierzu würden die Kraftstoffverbrauchsdaten aller Fahrzeuge mit ihren Positionsdaten in einem Netzwerk gespeichert. Somit würde eine „*Verbrauchskarte*“ aller Routen entstehen, oder in anderen Worten ausgedrückt: die Straße „weiß“ wie ökonomisch auf ihr gefahren wird. Aus der Sicht des Fahrers sollte dies wie in einer Fotomontage in Abb. 6.14 ersichtlich, als grüne bzw. blaue Straße erkennbar sein. Diese „*Einfärbung*“ der Straße würde im Sichtfeld des Fahrzeuglenkers im *Head-Up-Display* realisiert werden. Somit gibt es dem Lenker den Eindruck, als würde dieser auf einem färbigen Straßenabschnitt fahren. Die Farbe der Straße gibt Aufschluss über das Fahrverhalten der gesamten *Community*. Ist der Streckenabschnitt blau gefärbt, so wurde auf diesem Teil der Strecke im Durchschnitt nicht ökonomisch gehandelt. Der einzelne Fahrer kann somit mit seinem ökonomischen Fahren dazu beitragen, die Straße grün „einzufärben“.

Somit sollte jedem Fahrzeuglenker bewusst gemacht werden, wo Handlungsbedarf besteht. Als Nebeneffekt würden dadurch auch Problemzonen, z. B. Staugebiete ersichtlich, die zu anderen Zeitpunkten nicht als diese er-

kennbar sind. Zusätzlich ist die Effektivbelastung der Umgebung durch einen erhöhten CO_2 -Ausstoß regional beobachtbar.

Primär jedoch zielt dieses Feedback darauf ab, Autofahrern ein Bewusstsein zu schaffen, wo ihr Handeln Auswirkungen hat und dass dies aus einem Zusammenwirken aller Autofahrer entsteht. Um den eigenen Beitrag zu dem *Green Street Project* zu visualisieren, würde dies anhand einer Kombination mit anderen EcoFeedbacks realisiert werden (z. B. *EcoFlower*).

Als Motivation würden mehrere Techniken zur Anwendung kommen. Durch die Information, wo Handlungsbedarf besteht, sollen handlungswillige Personen motiviert werden ihren Fahrstil gemäß der Umgebung anzupassen. Die *Community* stellt ein wichtiges Instrument dar, da sie in diesem Fall nicht als Plattform zum Profilieren der Fahrleistungen einzelner Autofahrer dient. Bei *Green Street Project* wird die *Community* als Anzeiger der Gesellschaft verwendet. Dies soll den Autofahrer dazu bewegen, in der *Community* etwas bewirken zu wollen. Fahrzeuglenker die an ökonomischen Fahren nicht interessiert sind wird zumindest vermittelt, dass es Autofahrer gibt, die sehr wohl an einer „grünen“ Straße arbeiten.

Zusätzlich soll die Motivationstechnik der *kognitiven Dissonanz* zur Anwendung kommen. Dieser Fall würde bei grünen Streckenabschnitten auftreten, wenn z. B. umweltbewusste Autofahrer erkennen, dass ihre Fahrweise nicht ökonomisch ist, bzw. wenn unbedachte Fahrzeuglenker beobachten, dass ihre Fahrleistung nicht der Leistung der *Community* entspricht.

Kapitel 6

Implementierung

6.1 Simulator

Aufbau der Simulationsumgebung

Um eine geeignete Fahrumgebung zu realisieren wurde ein Aluminiumgerüst mit Profilschienen verschraubt (siehe Abb. 6.1). Dieses Gerüst bildet die Trägereinheit für die Hauptprojektionsfläche der Fahrsimulation, sowie einer *Holoprojektions*-Scheibe die als *Head-Up-Display* fungiert. Die zugehörigen Projektoren wurden auf Profilschienen montiert, um einfache Justierungen ihrer Ausrichtung schnell zu ermöglichen. Durch die sehr kurzen Abstände zwischen Projektoren und deren Projektionsfläche kommen *Weitwinkel*-Projektoren der Firma *3M* zum Einsatz.

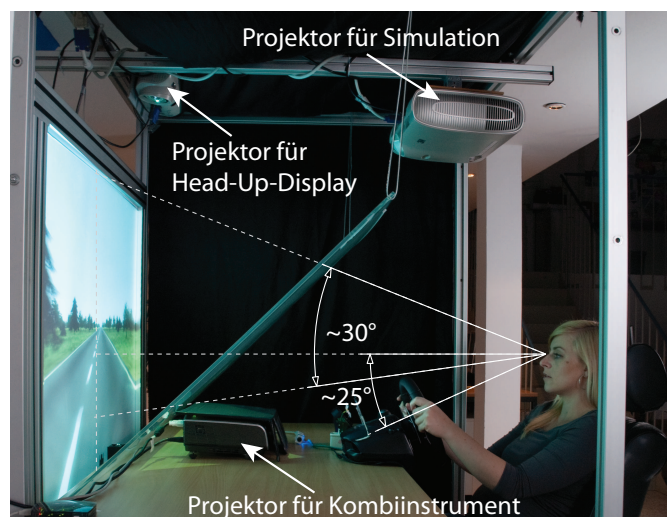


Abbildung 6.1: Aufbau des Fahrsimulators.



Abbildung 6.2: Logitech G27 Lenkrad mit Kombiinstrument.

Als Eingabegeräte für den Fahrzeuglenker werden ein *G27 Force-Feedback*-Lenkrad und zugehörige Brems- sowie Gaspedale von Logitech¹ verwendet. Das Lenkrad verfügt über *Paddles* für die Gangschaltung sowie mehrere Bedienknöpfe, um zwischen verschiedenen Modi des Kombiinstrumentes zu schalten.

Zur Realisierung des Kombiinstrumentes wurde ein Stück Rückprojektionskunststoff mit den Maßen 21cm × 9cm per Metallwinkel am Korpus des *G27 Force-Feedback*-Lenkrads befestigt (siehe Abb. 6.2). Ein Projektor mit den Bildproportionen von 16:9, projiziert per Rückprojektion die Instrumente in das Kombiinstrument. Eine genaue Justierung der Sitzposition ist hier von Nöten, da das Lenkrad im Vergleich zu konventionelle Lenkräder, einen sehr kleinen Radius besitzt. Dadurch wird die Sicht auf das Kombiinstrument durch das Lenkrad erschwert, jedoch anhand individueller Anpassung an den betroffenen Fahrer ausgeglichen.

Simulationsprogramm

Die Fahrumgebung wurde realisiert mit *Tile Racer*², einer Freeware 3D Fahrsimulation, die für die Anwendung in diesem Fahr Simulator modifiziert wurde. Die Schwierigkeit lag darin, der Fahrsimulation den Charakter eines Computerspiels zu nehmen und somit eine Annäherung an einen realitätsgetreuen Fahr Simulator zu erhalten.

So wurden Modifikationen im Bereich der Lenkung vorgenommen um den Lenkradius zu vergrößern. Eine Veränderung der Fahrerkamera im Spiel bewirkte eine realitätsgetreue Skalierung der Straßenbreite sowie eine angepasste Sicht an die Sitzposition in diesem Fahr Simulator. Als sehr vorteil-

¹<http://www.logitech.com/de-at/gaming/wheels/devices/5184>

²<http://tileracer.model-view.com/tl/index.php/media.html>

haft erwies sich *Tile Racer* durch die frei editierbaren Fahrstrecken sowie die leichte Zugänglichkeit zu sämtliche fahrzeugtechnischen Parameter des Fahrzeugmodells.

Somit war es durch speziell erstellte Fahrstrecken möglich, bestimmte Fahraufgaben an den Fahrzeuglenker zu stellen. Das Verfügen über die fahrzeugtechnischen Parameter erlaubte ein Justieren des Automodells an realistische Fahrbedingungen sowie ein Anpassen an das Berechnungsmodell dies in weiterer Folge den Kraftstoffverbrauch kalkuliert.

Um für die Fahrsimulation Energieeffizienz und Kraftstoffverbrauch zu berechnen, werden die Daten der Fahrsimulation via *UDP*-Netzwerkprotokoll an das Berechnungsmodul der *Dashboard Applikation* gesendet (siehe Abb.6.3). Die gesendeten Daten bestehen aus:

- Geschwindigkeit des Fahrzeugs,
- Motordrehzahl,
- momentan eingelegter Gang,
- prozentuelle Gaspedalstellung,
- prozentuelle Bremspedalstellung,

und werden in einem eigenen Protokoll beschrieben. Dieses Protokoll wird im Format

```
String dataString = velocity + "#" + rpm + "#" + currentGear  
+ "#" + acceleration + "#" + brake;
```

verfasst und pro Renderdurchgang des Fahrsimulators gesendet.

6.2 Dashboard Applikation

Die Dashboard Applikation wurde in der Programmiersprache *C#* und in Verbindung mit der *Windows Presentation Foundation* realisiert. Sie bildet den Rahmen für: die Platzierung der *EcoFeedbacks* auf den Displays, die Aufbereitung der vom Simulator eintreffenden Daten, sowie den *KeyListener* für Aktionen der Lenkradschalter zu verarbeiten.

Die eintreffenden Daten werden in der Klasse *UDPReceive* empfangen und in einem Datenobjekt gespeichert. Aufgrund parallel laufender Threads die sich dieses Datenobjekt teilen (Producer - Consumer Problematik), wird für jeden Thread eine Lese- bzw. Schreibsperre bei Zugriff verwendet. Bei Aktualisierung des Datenobjekts wird dieses an den *EcoManager* übertragen. Dieser informiert das *Dashboard Modul* über aktuelle Fahrdaten wie Geschwindigkeit, Drehzahl und initiiert die Berechnung der Verbrauchsdaten. Zusätzlich wurde eine zuschaltbare Protokollierung implementiert die die Daten:

- momentane Geschwindigkeit,
- Drehzahl,

- momentaner Gang,
- Gaspedalstellung,
- ökonomisch optimaler Gang und
- Energie-Effizienzwert

in Zeitabständen von 500ms speichert und diese in eine Textdatei exportiert. Dadurch besteht die Möglichkeit diese Daten in einem Tabellenkalkulationsprogramm auszuwerten und somit unterschiedliche Fahrsituationen und Fahrzeuglenker zu vergleichen.

6.3 Kraftfahrzeugtechnische Berechnungen

Die Berechnungen für Kraftstoffverbrauch, Energieeffizienz und den ökonomisch optimalen Gang werden in der Klasse `EnergyEfficiencyCalculator` implementiert (in Abb. 6.3 als „*Fahrzeugtechnische Berechnungen*“ beschrieben).

Die Berechnung des momentanen Verbrauchs wird in Kapitel 3 beschrieben. Um jedoch Verbrauchswerte für eine Simulationsumgebung zu berechnen, bedarf es der Schaffung eines virtuellen Automodells, dessen physikalischen Werte mit der Simulation und dem Fahrverhalten abgeglichen sind. Dies ist nötig um eine realitätsgetreue Abbildung der Werte zu gewährleisten, bzw. um korrekte Werte zu erhalten. Für diesen Simulator wurde ein Mittelklassewagen angenommen, dessen Parameter dem *Nissan 240SX*³ nachempfunden und wie folgt definiert wurden:

```

1 //Mittelklassewagen
2 cw = 0.28;           // cw-Wert Luftwiderstand
3 A = 2.06;           // Stirnfläche des Fahrzeugs bezüglich Luftwiderstand [m²]
4 mZu = 85.0;         //Masse Zuladung [kg]
5 mF = 1285.0;        //Masse Fahrzeug [kg]
6 tireRadius = 0.2286; //Radius der Reifen [m]
7
8 //Getriebeübersetzung der einzelnen Gänge
9 FIRST_GEAR_RATIO = 3.321;
10 SECOND_GEAR_RATIO = 1.902;
11 THIRD_GEAR_RATIO = 1.308;
12 FOURTH_GEAR_RATIO = 1.0;
13 FIFTH_GEAR_RATIO = 0.759;
14 FINAL_GEAR_RATIO = 4.1; //Übersetzung des Differentials

```

Um die Leistungseigenschaften des Motors zu definieren, wurde die Volllastkurve aus Abb. 3.2 in Kapitel 3 entnommen und in eine Textdatei ausgelagert. Diese wird bei Programmstart geladen und in einer Liste

```
List<KeyValuePair<double, double> > vollLastKurve;
```

³<http://tinyurl.com/6jyur65>, 16.04.2011

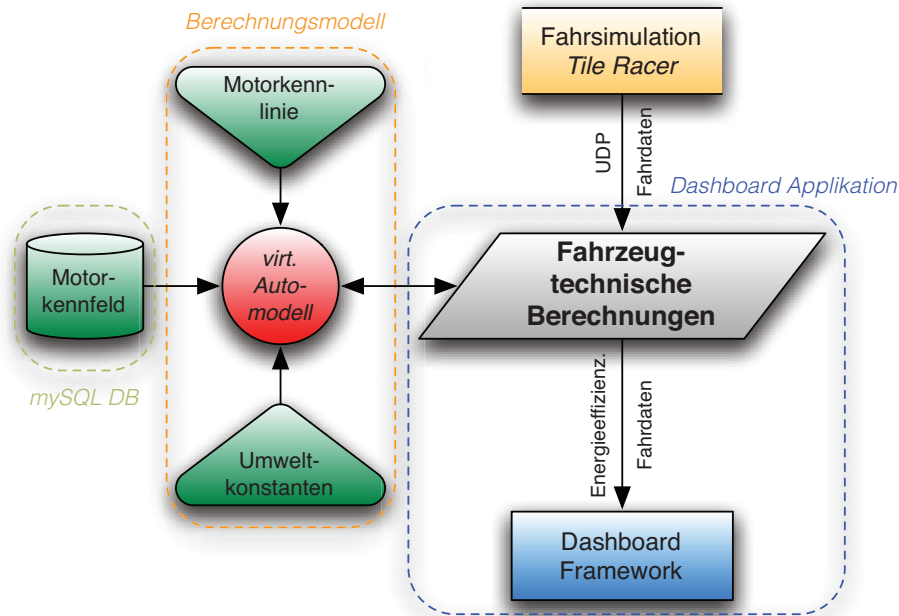


Abbildung 6.3: Schemata der Berechnungskomponenten.

gespeichert (Key = Drehzahl, Value = Maximales Drehmoment). Durch *Spline*-Interpolation wird die Volllastkurve interpoliert und somit über den gesamten Drehzahlbereich fein aufgelöst. Diese Kurve wird benötigt, um die Drehmomenteigenschaften des Motors zu definieren und somit bei Abfragen an das Motorkennfeld ein Maximum zu kennzeichnen.

Das Motorkennfeld mit dem *spezifischen Verbrauch* aus Abb. 3.2 wurde in einer *MySQL*-Datenbank abgebildet (siehe Abb. 6.4). Dies ermöglicht einfache und schnelle Abfragen, um den spezifischen Verbrauch bei einer bestimmten Drehzahl zu einem bestimmten Drehmoment zu erhalten. Diese Abfragen wurden in der Klasse `DataBaseManager` implementiert. Um den spezifischen Verbrauch (b_e) aus der Datenbank zu erhalten wird folgende Methode, wie im Code ersichtlich, implementiert.

```

1 public double getSpecificConsumption(int rpm, int torque)
2 {
3     double specConsumption = 0.0;
4     connection = new MySqlConnection(MY_CONNECTION_STRING);
5     MySqlCommand command = connection.CreateCommand();
6     command.CommandText = "SELECT consumption FROM specificconsumption
7     WHERE rpm =" + rpm + " AND torque = "+ torque;
8     MySqlDataReader reader = command.ExecuteReader();

```

```

9   while (reader.Read())
10  {
11      specConsumption = double.Parse(reader.GetValue(0).ToString());
12  }
13  connection.Close();
14  return specConsumption;
15 }

```

			ID	rpm	torque	consumption
<input type="checkbox"/>			62	2500	70	300
<input type="checkbox"/>			63	2500	80	290
<input type="checkbox"/>			64	2500	90	275
<input type="checkbox"/>			65	2500	100	270
<input type="checkbox"/>			66	2500	110	265
<input type="checkbox"/>			67	2500	120	260
<input type="checkbox"/>			68	2500	130	253
<input type="checkbox"/>			69	2500	140	243
<input type="checkbox"/>			70	2500	150	245
<input type="checkbox"/>			71	2500	160	250
<input type="checkbox"/>			72	3000	10	500
<input type="checkbox"/>					20	500

Abbildung 6.4: Abbildung des Motorkennfeldes in einer MySQL Datenbank.

Um das Berechnungsmodell zu vervollständigen wurden die Umweltkonstanten [3] wie folgt definiert.

```

1 g = 9.80665; // Erdbeschleunigung [m/s2]
2 fuelDensity = 0.73; // Kraftstoffdichte für Benzin [kg/dm3]
3 nT = 0.96; // 96% Wirkungsgrad auf Hinterachse
4 fr = 0.013; // Autoreifen auf Asphalt
5 p1 = 1.293; // Luftdichte [kg/m3]

```

Eine Änderung der Konstanten erlaubt somit eine Simulation von verschiedenen Witterungsverhältnissen und unterschiedlichen Fahrzeugtypen.

Die Berechnung der Energie-Effizienzzahl resultiert aus der Berechnung des momentanen Verbrauchs im Vergleich zu dem Verbrauch der für diesen Streckenabschnitt benötigt würde. Hier werden die Gleichungen aus Kapitel 3 herangezogen und an die Verwendung mit einem Fahrsimulator angepasst. Die Berechnung des momentanen Kraftstoffverbrauchs ist in der Methode `calculateCurrentConsumptionInLiters(...)` implementiert. Bei realen Kraftfahrzeugen werden die Daten des Verbrauchs aus Sensoren der Kraftstoffeinspritzung verarbeitet. Da diese Sensoren bei dem virtuellen Fahrzeug in der Simulation fehlen, bedurfte es daher einer Berechnung der auftretenden Kräfte im Antriebsstrang.

Hierzu wird die Gleichung 3.11 in abgeänderter Form verwendet. Da der Verbrauch nur punktuell berechnet wird, ist auf das Integral über die Zeit T verzichtet worden. Um das Drehmoment zu ermitteln das auf den Motor wirkt, bedarf es zuerst der Berechnung der Kraft die, resultierend aus allen Fahrwiderständen, auf die Straße wirkt. Wie im folgenden Code ersichtlich werden zuerst die Fahrwiderstände berechnet und durch den Wirkungsgrad nT dividiert.

```
1 pitch = (Math.PI / 180.0) * pitch; //Konvertierung zu Radianen
2 double mG = mZu + mF;
3 // Energieaufwand / Meter
4 double F_onStreet = (1 / nT) * ((mG * fr * g * Math.Cos(pitch) + p1/2 *
    cw * A * Math.Pow(vF, 2)) + mG * (aF + g * Math.Sin(pitch)));
```

Folglich wird durch Multiplikation der Kraft `F_onStreet` mit dem Radius der Autoreifen, das Drehmoment `tireTorque` berechnet das auf die Autoreifen wirkt. Dieses wird letztendlich durch den Übersetzungsfaktor des gesamten Antriebstrangs (momentan eingelegter Gang und Differenzial) dividiert, um nun das am Motor wirkende Drehmoment `engineTorque` zu berechnen. Um nun das auf den Motor wirkende Drehmoment zu berechnen wird die zuvor berechnete Kraft mit dem Radius der Autoreifen multipliziert und durch die Übersetzung des restlichen Antriebstrangs mit dem aktuell eingelegten Gang dividiert.

```
1 double tireTorque = F_onStreet * tireRadius;
2 double engineTorque = tireTorque /
3     engine.getFinalTranslation(currentGear);
```

Das Drehmoment `engineTorque` dient nun dazu, den spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e aus dem Motorkennfeld zu eruieren. Folgender Code zeigt die Abfrage des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und die anschließende Umrechnung in die Einheit Kilogramm pro Joule.

```
1 double specificConsumption = engine.getSpecificConsumptionWithTorque(
2     rpm, engineTorque);
3 // Umrechnung von [g/kWh] -> [kg/J]
4 specificConsumption = (specificConsumption/(3600.0 * 1000.0 * 1000.0));
```

Nach Erhalt des spezifischen Kraftstoffverbrauchs b_e (`specificConsumption`) wird dieser mit der auf die Straße wirkende Kraft `F_onStreet` multipliziert, um den Verbrauch in Kilogramm pro Meter zu erhalten. Um nun diesen Verbrauch in Liter pro 100 Kilometer anzugeben, wird dieser durch die Dichte des Kraftstoffs `fuelDensity` dividiert und mit 10^5 multipliziert um folglich den *Volumetrischen Streckenkraftstoffverbrauch* B_S (vgl. Gl. 3.12) zu berechnen.

```
1 double perMeter = specificConsumption * F_onStreet; // [kg/J] * [J/m]
2 consumptionInLiters = (perMeter / fuelDensity) * 100000.0;
```

Die Berechnung des *ökonomischen Gangs*, die für den *Gear Guide* maßgeblich ist basiert auf selbiger Ermittlung des *spezifischen Kraftstoffver-*

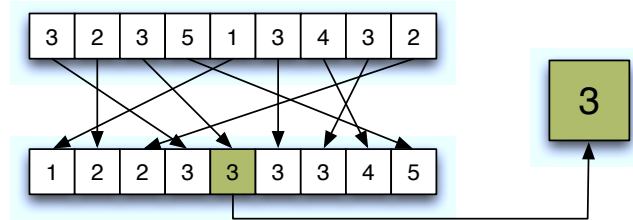


Abbildung 6.5: Medianfilter zur Ermittlung des ökonomischen Getriebegangs. Sortierung der vorgeschlagenen Gänge und Ermittlung des Medians.

brauchs. Hierzu werden für jeden möglichen Gang die Verbrauchswerte ermittelt, verglichen und der Gang mit dem niedrigsten *spezifischen Verbrauch* b_e als Ergebnis retourniert. Da der optimale Gang in Zeitabständen von 200ms berechnet wird, erzeugt dies fünf theoretische Gangvorschläge pro Sekunde. Da durch Verwendung von Echtzeitdaten hiermit auch noch unbrauchbare Spitzenwerte entstehen, erfordert dies eine Filterung der vorgeschlagenen Gänge. Hierzu werden die ermittelten Gangvorschläge in einer Liste mit neun Elementen gespeichert. Auf diese Liste wird schließlich ein *Medianfilter* (siehe Abb. 6.5) angewendet um etwaige „Ausreisser“ zu entfernen und einen optimalen Gangvorschlag zu ermöglichen.

Um die *Energie-Effizienzzahl* zu bestimmen, wird nun die zuvor angeführte Berechnung des Kraftstoffverbrauchs einerseits mit der momentanen Beschleunigung und eingelegten Gang berechnet um den *Streckenkraftstoffverbrauch* zu ermitteln. Um den *Streckenenergiebedarf* zu kalkulieren, wird die selbige Berechnung *ohne* Beschleunigung ($aF = 0$) und dem *ökonomischen Gang* (kleinstmögliches b_e) durchgeführt. Wie in Kapitel 3.3.1 werden nun die beiden Werte gegenübergestellt und somit die *Energie-Effizienzzahl* gebildet.

6.4 Dashboard Modul

Klassenstruktur

Die Funktionalität zur Visualisierung der EcoFeedbacks zu einheitlich zu gestalten, wurde eine Basisklasse `GaugeBase` geschaffen, die die Signaturen der Eventlistener bezüglich Fahrdaten definiert. Diese Basisklasse wurde von der Klasse `UserControl` des Windows Presentation Frameworks abgeleitet, die sämtliche visuellen Eigenschaften und Methoden zur Darstellung der EcoFeedbacks implementiert. Das Interface `IGauge` gibt die Signaturen vor, die ein Instrument (Gauge) im Dashboard Modul implementieren muss.

Die einzelnen EcoFeedbacks wurden folglich von der Klasse `GaugeBase`

abgeleitet, und implementieren die Methoden zur Verarbeitung der spezifischen relevanten Daten (siehe Abb. 6.6).

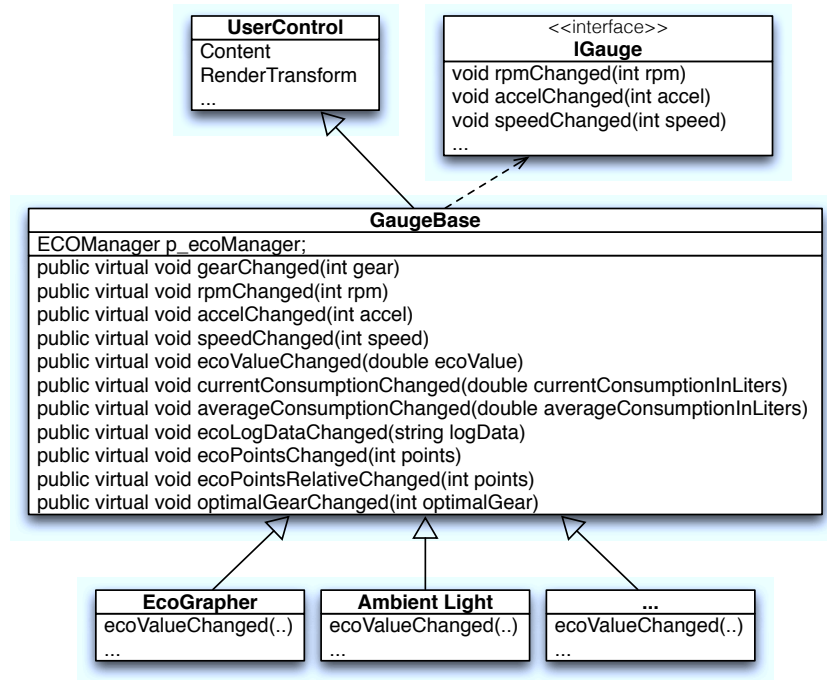


Abbildung 6.6: Klassenhierarchie der EcoFeedbacks.

Ambient Light

Das Ambient Light wurde nun in einem konventionellen Tachometer implementiert. Die Einfärbung des färbigen Rings (siehe Abb. 6.1) wurde durch zwei kreisförmige Farbverläufe realisiert. Um die Farbmischung nahtlos von grün bis violett zu überblenden, wird die Deckkraft der Farbverläufe entgegengesetzt gesteuert, wie in folgendem Code ersichtlich.

```

1 public void setECOValueLight(double ecoValueAvg)
2 {
3     ECO_Ambient_Light.Fill.Opacity = ecoValueAvg;
4     ECO_Ambient_Light_NOT.Fill.Opacity = 1 - ecoValueAvg;
5 }
  
```

Um ein sprunghaftes Ändern des Ambient Lights durch Spitzenwerte zu verhindern, wurden die eintreffenden *Energie-Effizienzwerte* (im Code *EcoValue* bezeichnet) in einer Liste mit zehn Elementen gespeichert und daraus der Durchschnittswert errechnet. Die Liste fungiert als *Queue* im

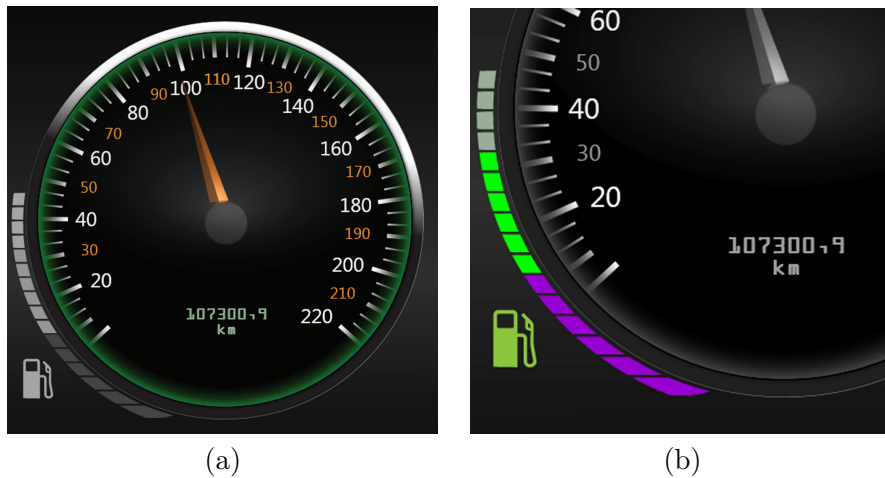


Tabelle 6.1: Tachometer mit Ambient Light (a). Die grüne Farbe symbolisiert ökonomisches Fahrverhalten. Das Konzept der EcoFuelGauge (b).

FIFO-Prinzip (First-in-First-out), deren Durchschnittswert ein Zeitfenster von 2 Sekunden beschreibt.

EcoFuelGauge

Das in Abb. 6.1b abgebildete Feedback wurde gemäß dem Konzept rein grafisch umgesetzt. Der violette Bereich der Anzeige symbolisiert den momentanen Tankinhalt, hingegen der grüne den Inhalt der bei ökonomischer Fahrt noch vorhanden wäre. Je weniger die Unterschiede auseinanderklaffen, desto ökonomischer ist der Fahrstil des Fahrzeuginskers. Somit gibt das Feedback Aufschluss über die Fahrweise des Lenkers sowie eine Veranschaulichung des Potentials, das noch durch ökonomisches Fahren genutzt werden kann.

EcoLoadAdvisor

In Abb. 6.7 ist die Realisierung des EcoLoadAdvisors ersichtlich. Diese Anzeige erfolgt bei Start der Simulation als Vollbildmodus im Kombiinstrument. Im kreisförmigen Bereich ist eine grafische Gegenüberstellung des Normalgewichts zu dem momentanen Gewicht mit zusätzlicher Zuladung. Eine Infobox informiert in numerischen Werten über das Ausmaß der Zuladung und des vorraussichtlichen Mehraufwand des Kraftstoffverbrauchs. Nach Bestätigung des Fahrzeuginskers über Knopfdruck am Lenkrad, fährt die Infobox als Animation hinter die kreisrunde Darstellung ein, welche daraufhin in den Fahrmodus (Tachometer) überblendet.

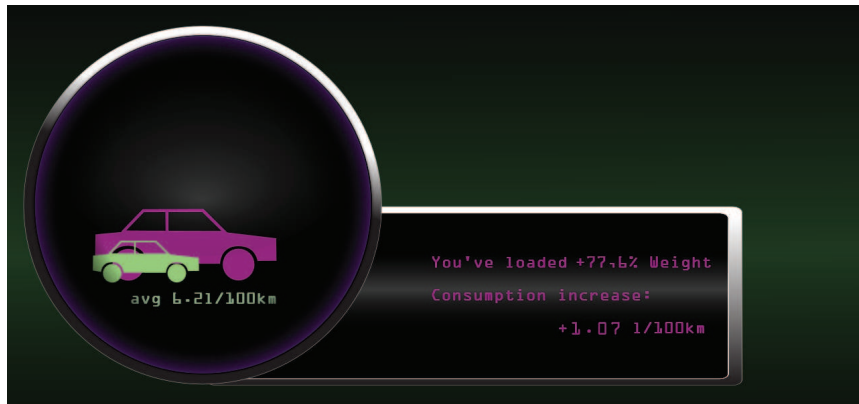


Abbildung 6.7: Bei Start der Simulation gibt der EcoLoadAdvisor Auskunft über die aktuelle Zuladung.

EcoBalance

Um die Beschleunigungswerte der Brems- bzw. Beschleunigungsvorgänge zu berechnen, wird bei Eintreffen der aktuellen Geschwindigkeitsdaten, die Differenz zu zuvor empfangenen Werten gebildet. Da die Häufigkeit der Datenaktualisierung mit der Frequenz der aktuellen UDP-Datenübertragung (siehe Kapitel 6.1) auftritt, werden die berechneten Differenzen in einer Liste mit 60 Elementen gespeichert. Wie schon zuvor bei der Implementierung des Ambient Lights angeführt, fungiert in diesem Fall die Liste ebenfalls als *Queue*. Der Durchschnittswert der beinhaltenden Elemente wird als die momentan auftretende Beschleunigung als türkise Linie visualisiert (siehe Abb. 6.8).

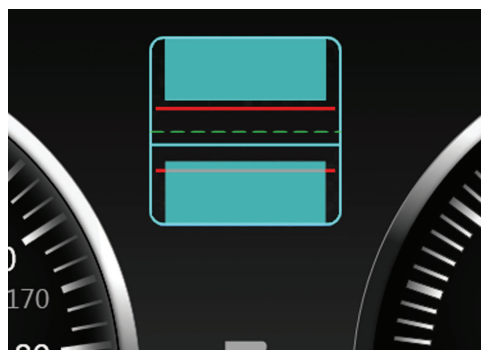


Abbildung 6.8: Das EcoBalance visualisiert die Kräfte die bei Brems- und Beschleunigungsvorgänge auftreten. Die roten Linien markieren die Spitzenwerte die in der letzten Minute aufgetreten sind.

Zur Kennzeichnung der aufgetretenen Spitzenwerte, werden diese als rote Linien im EcoBalance markiert. Diese werden bei Nichtüberschreitung nach 50 Sekunden gelöscht, oder bei Überschreitung dem jeweiligen Spitzenwert angepasst. Folgender Code veranschaulicht die Berechnung der Geschwindigkeitsdifferenzen, die Skalierung der Werte zur Visualisierung und die Transformation des *Balance Indicators* (siehe Abb. 6.8, türkise Linie).

```

1 private void gatherSamplesAndCalculateAccDeccValue(double speed)
2 {
3     speedDiv = speed - lastSpeed;
4     lastSpeed = speed;
5     if (speedSamplesList.Count >= MAX_SAMPLES_FOR_CALCULATION)
6     {
7         speedSamplesList.RemoveAt(0); //Lösche erstes Element...
8     }
9     speedSamplesList.Add(speedDiv); //...füge am Ende ein neues hinzu
10    double acceleration = speedSamplesList.Average();
11    double transformValue = acceleration * SPEED_SCALE_FOR_TRANSFORM;
12    if (transformValue > MAX_LIMIT_DISPLAY)
13        transformValue = MAX_LIMIT_DISPLAY;
14    if (transformValue < MIN_LIMIT_DISPLAY)
15        transformValue = MIN_LIMIT_DISPLAY;
16
17    TranslateTransform translation = new TranslateTransform(0,
18        transformValue);
19    TransformGroup transforms = new TransformGroup();
20    transforms.Children.Add(translation);
21    BalanceIndicator.RenderTransform = transforms;
22
23    //Prüft Spitzenwerte und aktualisiert bei Bedarf Markierungen
24    setBalanceLimits(transformValue);
25 }

```

EcoBubble

Dieses Feedback wurde an der Position des Drehzahlmessers platziert und wird bei Bedarf eingeblendet. Die Implementierung zur Einfärbung der Ringe entspricht dem wie beim *Ambient Light* angeführt wurde. Zur Visualisierung der momentanen Aktivität, wurde eine Animation im äusseren Ring implementiert. Diese beschreibt eine Ellipse dessen Form sich abwechselnd in horizontaler sowie vertikaler Richtung ausdehnt. Die inneren Ringe zur Visualisierung der historischen Verbrauchswerte wurden in diesem Fall rein grafisch umgesetzt, da für die Simulation kein mehrtägiges Auswerten der Verbrauchsdaten nötig war.

EcoTrophy

Die *EcoTrophy* wurde ähnlich dem *EcoLoadAdvisor* implementiert. Bei Start der Simulation erscheint als Vollbild im Kombiinstrument das aktuelle Ran-

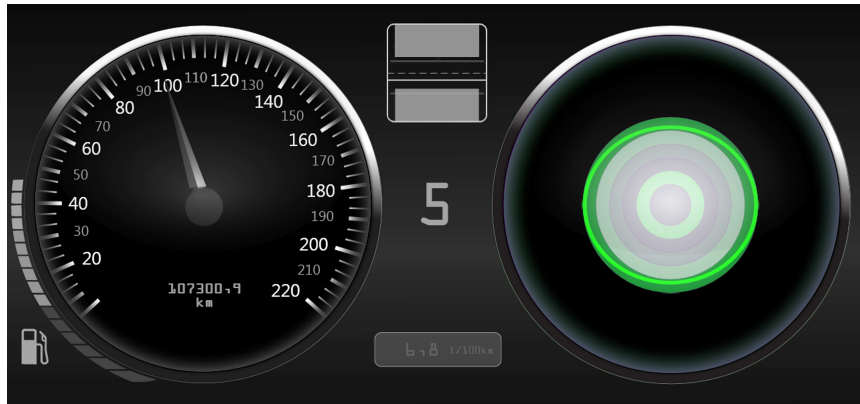


Abbildung 6.9: Die EcoBubble überblendet bei Zuschaltung den Drehzahlmesser und gibt Auskunft über momentane Energie-Effizienz.

king des Fahrzeuginnenkenners (siehe Abb. 6.10). Zusätzlich ist dessen persönlicher Fortschritt gesammelter *EcoPoints* ersichtlich, sowie die noch fehlenden Punkte, um das nächste Level zu erreichen. Die im *Gear Guide* erreichten

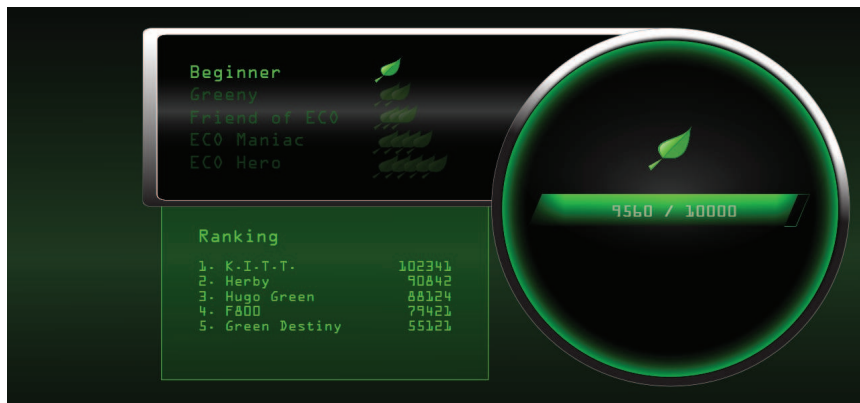


Abbildung 6.10: Bei Start der Simulation gibt der EcoLoadAdvisor Auskunft über die aktuelle Zuladung.

Punkte werden an den EcoManager gesendet. Dieser übergibt diese Punkte per Event an den Eventlistener `ecoPointsRelativeChanged`. Bei jedem Auftreten dieses Events werden somit im Hintergrund die Punkte akkumuliert und im Ranking dargestellt. Als Ersatz zum Zündschlüssel, wird per Knopfdruck am Lenkrad in den Fahrmodus überblendet.

Gear Guide

Der technische Hintergrund des Gear Guides wurde in den *kraftfahrzeugtechnischen Berechnungen* (siehe Kapitel 6.3) implementiert. Diese kalkulieren stets den im Moment ökonomischen Gang und übergeben diesen dem Eco-Manager. Der Gear Guide implementiert die Methode `optimalGearChanged`, die als Eventlistener in `GaugeBase` definiert ist. Somit wird bei Änderung des ökonomischen Gangs, dem Gear Guide die Ganginformation per Event übergeben. Der Gear Guide implementiert die Methoden zur Animation der

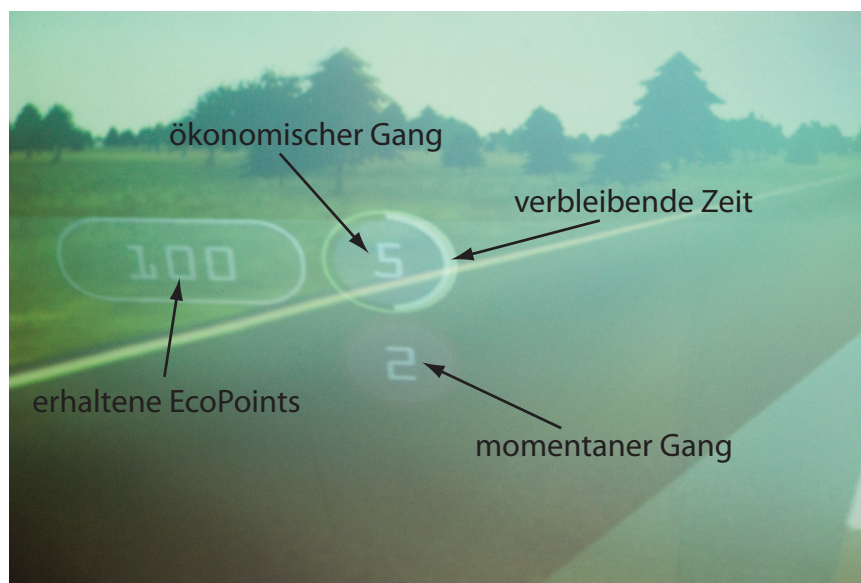


Abbildung 6.11: Die Elemente des Gear Guides im Head-Up-Display.

visuellen Darstellung, sowie die Berechnung der *EcoPoints* bei auftretendem Schaltvorgang. Diese *EcoPoints* werden wiederum an den `EcoManager` übergeben, der durch dies den `ecoPointsRelativeChanged`-Event feuert und somit weitere EcoFeedback über das Aktualisieren der *EcoPoints* informiert.

In Abb. 6.11 sind die einzelnen visuellen Elemente des Gear Guides ersichtlich. Die Animation der verbleibenden Zeit wurde auf eine Sekunde festgelegt. Im folgenden Code ist die Berechnung der Ringlänge `dblSectorRadius` sowie die Animation der Hintergrundtransparenz zur Darstellung des momentan eingelegten Gangs ersichtlich. Der rot leuchtende Hintergrund des momentanen Gangs verliert an Transparenz je weniger Zeit zum Hochschalten verbleibt.

```

1 private void updateCountdown(double elapsedTime)
2 {
3     dblSectorRadius = 360.0 * (1.0 - elapsedTime);
4     LowerGear_Alert_Background.Opacity = elapsedTime;
5     InvalidateVisual();
6 }

```

EcoFlower

Die Realisierung der *EcoFlower* (siehe Abb. 6.13) wurde anhand einer modifizierten *Hanappa*⁴, einer interaktiven Plastikblume, umgesetzt. Deren Funktionsweise basiert auf Kontraktion von *Shape Memory Alloy*⁵ (SMA), ein Metall das durch Erwärmung eine vorgegebene Form annimmt. Die Erwärmung wird durch den elektrischen Widerstand des Metalls hervorgerufen. Somit ist es möglich Kontraktionen durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an das SMA hervorzurufen. Bei der verwendeten *Hanappa* findet dieses Metall im Stängel der Plastikblume Anwendung (siehe Abb. 6.12), um diese per elektrischer Spannung in verschiedene Haltungen (geneigte Blüte bis zu aufrechter Stellung) zu bewegen. Um Bewegungen per Programm-

⁴<http://www.segatoys.co.jp/hanappa/>, 14.06.2011

⁵<http://de.wikipedia.org/wiki/Formgedächtnislegierung> 16.06.2011

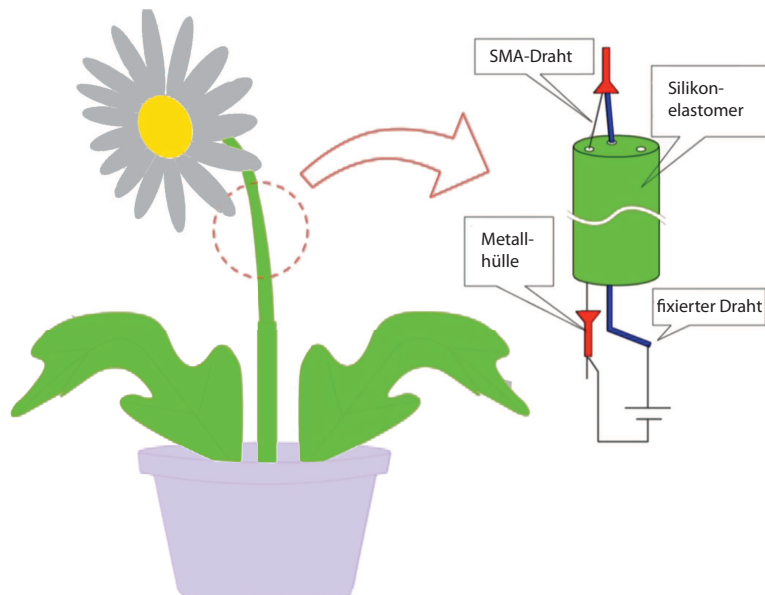


Abbildung 6.12: Funktionsweise der Hanappa.
(Bildquelle: [13])



Abbildung 6.13: Die EcoFlower in Aktion.

aufzurufen zu initiieren, wurde ein *Arduino* Mikrokontroller zur Steuerung der *Hanappa* eingesetzt. Somit ist es über einen seriellen Anschluss möglich, die Blume und deren Blätter mit vordefinierten ASCII-Zeichen zu bewegen.

Ein wiederholtes Senden des selbigen Zeichens (z. B. „aaa“, maximal acht Zeichen) bewirkt ein verstärktes Neigen, bzw. Aufrichten der Blume. Dies ermöglicht die Visualisierung eines Wertebereichs in acht Stufen. In der Anwendung als EcoFeedback wurde daher der zu visualisierende Wert auf acht Wertebereiche quantisiert. Um ruckartige Bewegungen zu vermeiden, wurde der Durchschnittswert aller berechneten Energie-Effizienz-Werte im Zeitrahmen von 10 Sekunden ermittelt.

Green Street Project

Die Implementierung des Green Street Projects beschränkt sich momentan auf die Visualisierung einer 3D-Fläche am Head-Up-Display. Um den Eindruck zu vermitteln, dass diese Fläche „auf der Straße“ liegt, wurde ein einfaches Kalibrationsstool implementiert, das eine perspektivische Einpassung der farbigen 3D Fläche im *Head-Up-Display* auf den dahinter liegenden projizierten Straßenverlauf ermöglicht (siehe Abb. 6.14).

Hierzu wurde eine WPF - 3D Szenerie geschaffen, deren Viewport die Maße 1024×768 besitzt. Eine Lichtquelle vom Typ *Ambient Light* sorgt für eine gleichmäßige Beleuchtung der Szenerie, die von einer perspektivischen Kamera gerendert wird. Um die Fläche als Viereck zu zeichnen bedarf es einer



Abbildung 6.14: Ansicht des Cockpits mit der Head-Up-Display Projektion auf die Holo-Projektionsscheibe und der dahinter liegenden Fahrsimulation auf der Hauptprojektionsfläche.

Kombination zweier Dreiecke. Um dies zu Vereinfachen wurde in der Klasse `Utils3D` die Methode `createTriangleModel` implementiert. Diese erstellt eine Viereck vom Typ `Model3DGroup` aus vier einzelnen Eckpunkten vom Typ `Point3D`. Folgender Code zeigt die Implementierung der Kombination der Dreiecke und eine Hilfsmethode `calculateNormal` zur Berechnung der Flächennormalen.

```
1 Model3DGroup createTriangleModel(Point3D p0, Point3D p1, Point3D p2)
2 {
3     MeshGeometry3D mesh = new MeshGeometry3D();
4     mesh.Positions.Add(p0);
5     mesh.Positions.Add(p1);
6     mesh.Positions.Add(p2);
7     mesh.TriangleIndices.Add(0);
8     mesh.TriangleIndices.Add(1);
9     mesh.TriangleIndices.Add(2);
10    Vector3D normal = calculateNormal(p0, p1, p2);
11    mesh.Normals.Add(normal);
12    mesh.Normals.Add(normal);
13    mesh.Normals.Add(normal);
14    Material material = new DiffuseMaterial(new SolidColorBrush(Colors.
    LightGreen));
15    GeometryModel3D model = new GeometryModel3D(mesh, material);
```

```

16     Model3DGroup group = new Model3DGroup();
17     group.Children.Add(model);
18     return group;
19 }
20
21 Vector3D calculateNormal(Point3D p0, Point3D p1, Point3D p2)
22 {
23     Vector3D v0 = new Vector3D(p1.X - p0.X, p1.Y - p0.Y, p1.Z - p0.Z);
24     Vector3D v1 = new Vector3D(p2.X - p1.X, p2.Y - p1.Y, p2.Z - p1.Z);
25     return Vector3D.CrossProduct(v0, v1);
26 }

```

Die von der Methode `createTriangleModel` retournierte `Model3DGroup` wird folglich dem Viewport hinzugefügt. Die Kalibrierung der „Green Street“ erfolgt bei Einrichtung des Fahrsimulators. Hierzu implementiert die Klasse `HUDCalibrationTool` Methoden zur Skalierung, Rotation und Translation der Straßenfläche per Tastatureingabe, wie in folgenden Code ersichtlich.

```

1 private void rotateRect(double x, double y, double z, double angle)
2 {
3     RotateTransform3D rotateTransform3D = new RotateTransform3D(new
4     AxisAngleRotation3D(new Vector3D(x, y, z), angle));
5     transformGroup.Children.Add(rotateTransform3D);
6     model.Transform = transformGroup;
7 }
8 private void translateRect(double offsetX, double offsetY, double
9     offsetZ)
10 {
11     TranslateTransform3D translateTransform3D = new TranslateTransform3D
12     (offsetX, offsetY, offsetZ);
13     transformGroup.Children.Add(translateTransform3D);
14     model.Transform = transformGroup;
15 }
16 private void scaleRect(double scaleX, double scaleY, double scaleZ)
17 {
18     ScaleTransform3D scaleTransform3D = new ScaleTransform3D(scaleX,
19     scaleY, scaleZ);
20     transformGroup.Children.Add(scaleTransform3D);
21     model.Transform = transformGroup;
22 }

```

Nach Anpassung an die Sitzposition des Fahrzeuglenkers, wird die erhaltene Transformationsmatrix `transformGroup` in eine Datei exportiert um bei Programmstart zur Verfügung zu stehen. Das hiermit erzeugte Bild (siehe Abb. 6.14) soll den Eindruck vermitteln, dass die Straße einen Farbverlauf besitzt. Um den Richtungsverlauf dieses Farbstreifen an die Umgebung (Kurven, Berge, etc..) in Echtzeit anzupassen, würde eine viel tiefgreifendere Umsetzung nötig sein. Hierzu bedarf es einer Berücksichtigung der Kopfposition des Fahrers (Tracking des Viewports) sowie eine Verarbeitung der telematischen Daten des Streckenabschnitts, um 3D Geometrien darin zu projizieren.

Kapitel 7

Ausblick und Resümee

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Ansätze von EcoFeedbacks behandelt und implementiert. Die Vielfalt der gegenwärtigen Feedbacks in Kraftfahrzeugen gibt einen Einblick über die Komplexität der Thematik: „Wie motiviere ich zu ökonomischen Fahren?“.

Es wird auch ersichtlich, dass viele dieser Feedbacks nicht alleinig optimale Lösungen bieten, sondern jede für sich einen gewissen Rezeptionskanal bedienen. Um diesen vom Empfänger richtig zu verstehen, ist nur ein Teil der Anforderungen an das EcoFeedback. Der nächste Schritt, Fahrzeuglenker zusätzlich zum Verständnis ihrer Situation auch für Änderungen hinsichtlich ökonomischeren Fahrweisen zu motivieren ist die große Herausforderung die sich weiterhin Designern von EcoFeedbacks stellt.

Diese Arbeit zielte darauf ab, gegenwärtige Feedbacks zu implementieren und deren Vorteile in neuen Konzepten zu verarbeiten. So bildet das *Green Street Project* einen doch neuartigen Ansatz, Online-Communities, Umwelt und eigene Bewusstseinsbildung miteinander zu verbinden.

7.2 Verbesserungsmöglichkeiten

7.2.1 Fahrsimulator-Hardware

Der Fahrsimulator ist hinsichtlich der Bildung einer Testumgebung ausbaufähig. Das Integrieren von Testprogrammen wie z. B. den *Lane-Change-Test*¹ (LCT) würden Tests bezüglich Ablenkung der Aufmerksamkeit des Fahrzeuglenkers messbar machen. Es wurde versucht, Testabläufe für den LCT zu konzipieren, jedoch war dieser durch seine Rahmenbedingungen (Konstante Geschwindigkeit, repetitive Wiederholung der Tasks) ungeeignet. Eine Adaption des LCT hinsichtlich neuen Testabläufen zur Instrumentenanalyse

¹<http://tinyurl.com/68ugkwe>, 15.06.2011

könnten hier Abhilfe schaffen.

Eine weitere Möglichkeit, die Auswirkungen der EcoFeedbacks auf die Aufmerksamkeit des Fahrzeuglenkers zu testen, wäre ein *Eye-Tracking*-System, welches erlaubt die Augenbewegungen der Testperson aufzuzeichnen. Dies wäre in weiterer Folge im Zusammenhang mit weiteren Displays z. B. Center-Konsole, Navigationssystem, etc. von großen Nutzen. Eine zukunftsgerichtete Entwicklung spricht für eine größere Anzahl von Displaymöglichkeiten (siehe Abb. 5.1), die unter anderem auch z. B. Touch-Interaktionen unterstützen.

Zuletzt ist auch das „Interieur“ des Simulators anzuführen. Hinsichtlich realitätsnahe Simulationen, bedarf es hier der Bildung eines Cockpits mit realen Größenordnungen. Probleme bezüglich Sichtbarkeit des Kombiinstruments aufgrund eines zu kleinen Lenkrads, sollten somit der Vergangenheit angehören.

7.2.2 Fahrsimulation

Um eine realitätsnahe Fahrsimulation zu erhalten, bedarf es weitere Modifikationen der Fahrsimulationssoftware. Dies wäre ein z. B. unterschiedliches Verkehrsaufkommen von anderen Verkehrsteilnehmer, sowie ein Reglement der Fahrsituation durch beschilderte Ge- und Verbote. Zusätzliche Verbesserungen bezüglich Fahrphysik, in Form von Abstimmung der Fahrzeugwerte und Fahrverhalten (z. B. Motorbremse, Beschleunigungsverhalten) könnten noch zu einer verstärkt realitätsnahen Simulation führen.

7.2.3 EcoFeedbacks

Bei den implementierten EcoFeedbacks, wären Verbesserungen bezüglich dem Zeitpunkt ihres Einsatzes von Bedeutung. Dies ist in Abhängigkeit von ihrem Design und ihrer Platzierung im Cockpit ein wesentlicher Bestandteil den es noch zu untersuchen gilt. Die Wichtigkeit der Aufmerksamkeit des Fahrzeuglenkers beim Autofahren ist unumstritten und somit eine der wichtigsten Anforderungen an das EcoFeedback. Die Entwicklung geeigneter Tests (z. B. *Eye-Tracking*) sollte hier Abhilfe schaffen, um aus konzeptionellen Annahmen, realitätsgebundene Tatsachen zu bilden.

Anhang A

Technische Informationen

Drehmoment

Das *Drehmoment* ist ähnlich der *Kraft* eine physikalische Größe in der klassischen Mathematik. Findet die Größe *Kraft* für geradlinige Bewegung Verwendung, so ist die Größe *Drehmoment* für Drehbewegungen (Torsion, Rotation) relevant. Das *Drehmoment* wird durch

$$\text{Drehmoment} = \text{Kraft} \cdot \text{Hebelarm} \quad (\text{A.1})$$

definiert und wird folglich in der Einheit *Newtonmeter* (Nm) angegeben. Für das *Newtonmeter* mit den Basiseinheiten Kilogramm, Meter und Sekunde gilt:

$$1\text{Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}. \quad (\text{A.2})$$

In [2, S. 181] wird das *Drehmoment* mit folgenden Worten beschrieben:

Ein Drehmoment wirkt zum Beispiel auf einen Körper, der sich um einen festgehaltenen Punkt drehen kann, wenn an ihm außerhalb dieses Punktes eine Kraft angreift.

	Größe	Einheit
A	Fahrzeugstirnfläche	$[\text{m}^2]$
a_F	Fahrzeugbeschleunigung	$[\text{m}/\text{s}^2]$
B	Kraftstoffmasse	$[\text{kg}]$
b_e	Spezifischer Kraftstoffverbrauch	$[\text{g}/\text{kWh}]$
B_e	Streckenverbrauch	$[\text{g}/\text{m}]$
B_s	Volumetrischer Streckenverbrauch	$[\text{l}/100\text{km}]$
c_W	Luftwiderstandsbeiwert	$[-]$
dt	Zeitintervall	$[\text{s}]$
E	Energiebedarf	$[\text{kJ}]$
E_s	Wegbezogener Energiebedarf	$[\text{kJ}/\text{km}]$
F_a	Beschleunigungswiderstand	$[\text{N}]$
F_{LW}	Luftwiderstand	$[\text{N}]$
f_r	Rollwiderstandsbeiwert	$[-]$
F_R	Rollwiderstand	$[\text{N}]$
F_{ST}	Steigungswiderstand	$[\text{N}]$
F_W	Gesamtfahrwiderstand	$[\text{N}]$
F_Z	Zugkraft	$[\text{N}]$
g	Erdbeschleunigung	$[\text{m}/\text{s}^2]$
H_u	Spezifischer Heizwert	$[\text{J}/\text{g}]$
m_F	Fahrzeugmasse	$[\text{kg}]$
m_G	Fahrzeuggesamtmasse = Fahrgewicht	$[\text{kg}]$
m_{Zu}	Zuladung	$[\text{kg}]$
s	Weg	$[\text{m}]$
t	Zeit	$[\text{s}]$
v_F	Fahrzeuggeschwindigkeit	$[\text{m}/\text{s}]$
v_W	Vektorielle Windgeschwindigkeit in Fahrtrichtung	$[\text{m}/\text{s}]$
\dot{v}_F	Erste Ableitung der Fahrzeuggeschwindigkeit = Beschleunigung	$[\text{m}/\text{s}^2]$
α_{St}	Steigungswinkel	$[\text{°}]$
β_S	Schräglaufwinkel	$[\text{°}]$
η_T	Übertragungswirkungsgrad des Triebstranges	$[-]$
ρ_L	Dichte der Luft	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_{Kr}	Dichte des Kraftstoffs	$[\text{kg}/\text{l}]$

Tabelle A.1: Auflistung der verwendeten Größen und Symbole.

Anhang B

Inhalt der CD-ROM

Format: CD-ROM, ISO9660-Format

B.1 Diplomarbeit

Pfad: /
Wasserbauer_Stefan_2011.pdf Diplomarbeit

B.2 Implementierung

Pfad: /Code/
database/engineconsumption.sql MySQL-Daten Exportfile,
Motorkennfeld
ECO_Feedback/ VisualStudio 2010 Solution

B.3 Online Quellen

Pfad: /OnlineReferences/
insight_e-brochure.pdf Broschüre des Honda Insight
BroschuerePrius.pdf . . Broschüre des Toyota Prius

B.4 Media

Pfad: /Media/
Projektpraesentation.mov Video der Projektpräsentation
Screenshots/ Screenshots der EcoFeedbacks

Literaturverzeichnis

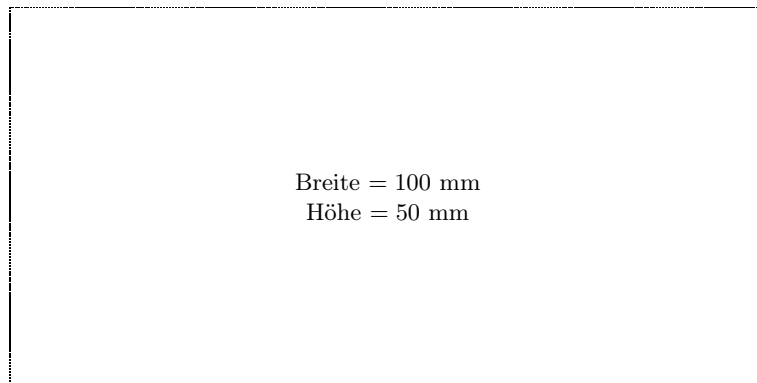
- [1] Abrahamse, W., L. Steg, C. Vlek und T. Rothengatter: *A review of intervention studies aimed at household energy conservation*. Journal of Environmental Psychology, 25(3):273–291, Sep. 2005.
- [2] Alfred, R.: *Physik - Mechanik*. Verlag Technik, Berlin, 1990.
- [3] Bauer, H., J. Crepin, K.H. Dietsche und F. Dinkler: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 24. Aufl., 2002.
- [4] Charissis, V. und M. Naef: *Evaluation of Prototype Automotive Head-Up Display Interface: Testing Driver's Focusing Ability through a VR Simulation*. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, S. 560–565, Juni 2007.
- [5] Charissis, V., M. Naef, S. Papanastasiou und M. Patera: *Designing a Direct Manipulation HUD Interface for In-Vehicle Infotainment*. Transportation Research, S. 551–559, 2007.
- [6] Dorrer, C.: *Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung telematischer Informationen*. Nr. 24. Expert Verlag, 2003.
- [7] Ecker, R., B. Slawik und V. Broy: *Location Based Challenges on Mobile Devices for a Fuel Efficient Driving Behavior*. Techn. Ber., BMW Group Research and Technology, Munich, Germany, 2010.
- [8] Festinger, L.: *A theory of cognitive dissonance*. Stanford University Press, 1957.
- [9] Fishburn, P.C.: *Utility Theory for Decision Making*. Wiley, 1970.
- [10] Fred, S.: *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. Vieweg + Teubner, 2009.
- [11] Froehlich, J., T. Dillahunt, P. Klasnja, J. Mankoff, S. Consolvo, B. Harrison und J. Landay: *UbiGreen: investigating a mobile tool for tracking and supporting green transportation habits*. In: *Proceedings of the 27th*

- International Conference on Human Factors in Computing Systems*, S. 1043–1052. ACM, 2009.
- [12] Ganti, R., N. Pham, H. Ahmadi, S. Nangia und T. Abdelzaher: *GreenG-PS: a participatory sensing fuel-efficient maps application*. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, S. 151–164. ACM, 2010.
- [13] Haller, M., C. Richter, P. Brandl, S. Gross, A. Schrempf, H. Nii, M. Sugimoto und M. Inami: *Finding the right way for interrupting people improving their sitting posture*. Techn. Ber., Media Interaction Lab, Upper Austria University of Applied Sciences, Austria, 2010.
- [14] He, H. und S. Greenberg: *Motivating Sustainable Energy Consumption in the Home*. *Psychologist*, S. 1–5, 2008.
- [15] Holmes, T.: *Eco-visualization: combining art and technology to reduce energy consumption*. In: *Proceedings of the 6th ACM SIGCHI Conference on Creativity & Cognition*, S. 153–162. ACM, 2007.
- [16] Kamiya, H.: *A study on recognition of in-car visual information*. *JSAE Review*, 16(3):320, Juli 1995.
- [17] Kraneburg, P., T. David, A. Schenk und A. Forster: *Die Entwicklung eines Leichtlaufgetriebeöls*. *ATZ worldwide*, 108(ATZ 01/2006 Jahrgang):34–37, 2006.
- [18] Pace, T., S. Ramalingam und D. Roedl: *Celerometer and idling reminder: persuasive technology for school bus eco-driving*. In: *CHI'07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, S. 2085–2090. ACM, 2007.
- [19] Pierce, J., C. Fan, D. Lomas, G. Marcu und E. Paulos: *Some consideration on the (in) effectiveness of residential energy feedback systems*. In: *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems*, S. 244–247. ACM, 2010.
- [20] Pierce, J. und E. Paulos: *Designing for emotional attachment to energy*. In: *Proceedings of Design & Emotion Conference. Chicago, Illinois, USA.*, S. 5. James Pierce, 2010. <http://www.jamesjpierce.com/cv.html>.
- [21] Pierce, J. und E. Paulos: *Materializing energy*. In: *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems*, S. 113–122. ACM, 2010.
- [22] Pierce, J. und D. Roedl: *Changing Energy Use Through Design*. *Interactions*, 15(4):6–8, 2008.

- [23] Riener, A., A. Ferscha, P. Frech, M. Hackl und M. Kaltenberger: *Subliminal vibro-tactile based notification of CO2 economy while driving Categories and Subject Descriptors*. In: *Proceedings of the Second International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, November 11-12, 2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA*, S. 92–101, 2010.
- [24] Schmidt, G. und J. Liebl: *Senkung der Pkw-CO2-Emission - wirksame Maßnahmen für alle Betriebsbedingungen*. MTZ Motortechnische Zeitschrift, (6):482–489, 2001.
- [25] Shipworth, M.: *Motivating Home Energy Action: A handbook of what works*. Techn. Ber. April, Australian Greenhouse Office, 2000.
- [26] Yamabe, T., V. Lehdonvirta, H. Ito, H. Soma, H. Kimura und T. Nakajima: *Applying pervasive technologies to create economic incentives that alter consumer behavior*. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing*, S. 175, New York, New York, USA, 2009. ACM Press.
- [27] Young, R. D.: *Changing Behavior and Making It Stick: The Conceptualization and Management of Conservation Behavior*. Environment and Behavior, 25(4):485–505, 1993.

Messbox zur Druckkontrolle

— Druckgröße kontrollieren! —



— Diese Seite nach dem Druck entfernen! —