

Facharbeit in Informatik

# **Steuerung und Simulation von Automatikgetrieben in Kraftfahrzeugen**

verfasst von  
**Leo Herrmann**

Betreuende Lehrkraft:	Michael Savorić
Kursbezeichnung:	12 Informatik LK
Schule:	Hohenstaufen-Gymnasium Kaiserslautern
Abgabetermin:	25.05.2020

# Inhaltsverzeichnis

1. Kurzzusammenfassung	3
2. Einleitung	4
3. Hauptteil	4
3.1 Simulator	4
3.1.1 Implementierung der wichtigsten Eigenschaften	4
3.1.1.1 Motordrehmoment	5
3.1.1.2 Übersetzung und Getriebe	7
3.1.1.3 Fahrwiderstände	8
3.1.1.4 Fahrzeugdaten	8
3.1.2 Hauptfunktion	9
3.2 Schaltstrategien	10
3.2.1 Ziele von Schaltstrategien	10
3.2.2 Motordrehzahlbasierte Schaltstrategie	11
3.2.2.1 Grundlage	11
3.2.2.2 Verbesserung der Maximalbeschleunigung	12
3.2.2.3 Automatische Nutzung der Motorbremse bergab	13
3.2.3 Weitere Ansätze	13
3.2.4 Beurteilung des Verhaltens in der Realität	15
4. Schlussteil	15
5. Quellen	17
6. Anhang	18
6.1 Formelzeichen	18
6.2 Formelherleitungen	19
6.2.1 Modell für das Motordrehmoment	19
6.2.2 Schaltfortschritt	20
6.2.3 Geschwindigkeit	21
6.2.4 Drehzahl aus Geschwindigkeit	22
6.2.5 Schaltdrehzahl für maximale Beschleunigung	23
6.3 Quellcode	24
6.3.1 Hauptfunktion	24
6.3.2 Grundlage der drehzahlbasierten Schaltstrategie	25
6.4 Benutzeroberfläche des Simulators	26
7. Selbstständigkeitserklärung	27

# 1. Kurzzusammenfassung

In dieser Facharbeit beschäftige ich mich mit der Entwicklung von Schaltstrategien für Automatikgetriebe in Kraftfahrzeugen und eines Simulators, mit dessen Hilfe diese Schaltstrategien getestet und weiterentwickelt werden sollen.

Zunächst wird die Implementierung der benötigten Eigenschaften von Kraftfahrzeugen in die Simulation behandelt. Die meisten Eigenschaften wie Fahrwiderstände, Übersetzungen oder Beschleunigung lassen sich mit Hilfe der entsprechenden physikalischen Formeln nachbilden. Für das Verhalten des Drehmoments von Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Last und Drehzahl sind hingegen nicht genügend Informationen verfügbar. Deshalb entwerfe ich ein Modell, das Drehmomentkurven von Verbrennungsmotoren mit Hilfe einer quadratischen Funktion darstellt.

Schaltstrategien sollen sowohl kraftstoffsparendes Fahren als auch hohe Beschleunigung ermöglichen und für die Fahrer eine möglichst gute Berechenbarkeit gewährleisten. Eine der entwickelten Schaltstrategien besteht darin, eine Zielmotordrehzahl zu berechnen, die sich mit zunehmender Last erhöht und anschließend den Gang zu wählen, mit der der Motor dieser Zieldrehzahl am nächsten kommt. Nach einigen Optimierungen bezüglich Kraftstoffverbrauch und Berechenbarkeit ist diese Schaltstrategie bereits in der Lage, alltägliche Fahrsituationen auf eine zufriedenstellende Weise zu bewältigen. Nimmt man Informationen über die Drehmomentkurve und die Steigung hinzu, lässt sich die Maximalbeschleunigung erhöhen und eine Funktion einbauen, die die Motorbremswirkung nutzt, um das Fahrzeug bergab auf seiner Geschwindigkeit zu halten. Neben der an der Motordrehzahl orientierten Lösung sind auch weitere Ansätze vorstellbar, die sich beispielsweise anstelle von Motordrehzahlen Übersetzungsverhältnisse oder Beschleunigungen als Ziel setzen.

Es ist also möglich, mit relativ einfachen Mitteln und unterschiedlichen Ansätzen alltagstaugliche Schaltstrategien zu entwickeln. Diese lassen sich unter Zuhilfenahme weiterer Daten optimieren und um zusätzliche Funktionen erweitern. Außerdem wird deutlich, dass Simulationen, selbst wenn sie die Realität nicht perfekt abbilden, gut geeignet für das Modellieren von Situationen sein können, die in der Realität aufwendig herbeizuführen sind.

## 2. Einleitung

Als ich in der Fahrschule meine ersten Erfahrungen mit dem Autofahren gemacht habe, hatte ich auch einmal die Gelegenheit, ein Auto mit Automatikgetriebe zu fahren. Ich war beeindruckt, von der Tatsache, dass das Getriebe immer zu wissen schien, wie es sich in den verschiedenen Fahrsituationen zu verhalten hat und dem entsprechend geeignete Gänge wählte. Hat man etwas Erfahrung im Umgang mit Schaltgetrieben gesammelt, fängt man an, die richtigen Gänge nach Gefühl zu wählen. Bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe hingegen wird die Gangwahl durch Computer anhand von Algorithmen gesteuert. Diese Feststellung führte in Kombination mit meinem generellen Interesse an Kraftfahrzeugtechnik und Informatik zur Fragestellung, wie solche Algorithmen aussehen könnten, woraufhin ich beschlossen habe, dieser Frage auf den Grund zu gehen, indem ich selbst versuche, welche zu entwickeln.

## 3. Hauptteil

### 3.1 Simulator

Damit ich die Schaltstrategien testen und weiterentwickeln kann, programmiere ich eine Webanwendung, die die Eigenschaften von Kraftfahrzeugen simuliert, in die ich die Schaltstrategien implementieren kann. Mit Hilfe von Schiebereglern lässt sich das Verhalten der Gas- und Bremspedale nachbilden und die Steigung der Strecke variieren. Die Gänge des Getriebes lassen sich über Knopfdruck schalten, wobei die Schaltvorgänge automatisch hervorgerufen werden, wenn eine Schaltstrategie aktiviert ist. Das Fahrzeug, seine Geschwindigkeit und die Steigung der Strecke werden visualisiert und es werden Informationen wie Motordrehzahl, Motor- und Raddrehmoment und Beschleunigung angezeigt. Ein Bild der Benutzeroberfläche befindet sich unter 6.4 im Anhang.

#### 3.1.1 Implementierung der wichtigsten Eigenschaften

Damit die Simulation möglichst realistisch ist, müssen Wege gefunden werden, die Eigenschaften von Kraftfahrzeugen so zu implementieren, dass sie möglichst genau das Verhalten in der Realität widerspiegeln.

### 3.1.1.1 Motordrehmoment

Das Drehmoment  $M$ , das ein Verbrennungsmotor produziert, hängt von seiner Drehzahl  $n$  und Last  $p_{Last}$  ab<sup>1</sup>. Das Verhalten des Drehmoments in Abhängigkeit zur Motordrehzahl lässt sich durch Drehmomentkurven darstellen, die bei Saugmotoren Parabeln ähneln. Der Arbeitsbereich von Verbrennungsmotoren wird nach unten durch die Leerlaufdrehzahl und nach oben durch den Drehzahlbegrenzer eingeschränkt. Unterhalb der Leerlaufdrehzahl können Verbrennungsmotoren nicht arbeiten, jedoch nehme ich der Einfachheit halber an, dass die Kurve bis 0 U/min fortgeführt wird und dort einen Wert von 0 Nm besitzt. Kennt man das maximale Drehmoment eines Verbrennungsmotors und die Drehzahl, bei der dieses erreicht wird, lässt sich eine quadratische Funktion erzeugen, die das Drehmoment von Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Drehzahl und Last modelliert:

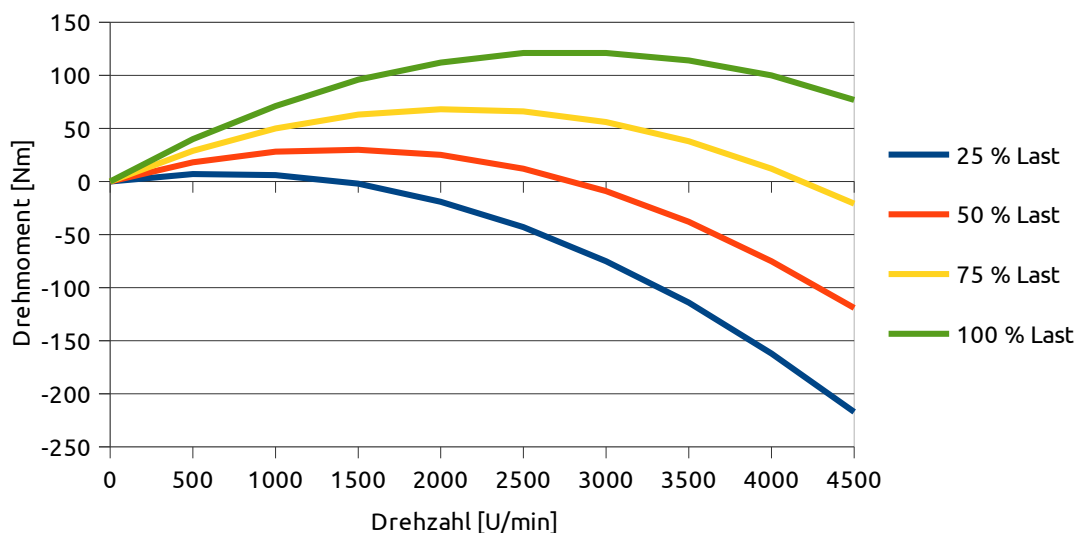
$$M(n, p_{Last}) = \frac{-M_{max}}{n_{maxM}^2} \cdot p_{Last}^2 \cdot \left(\frac{n}{p_{Last}} - n_{maxM}\right)^2 + p_{Last}^2 \cdot M_{max}$$

(Herleitung im Anhang unter 6.2.1).

Um zu verhindern, dass durch Null geteilt wird, beschränke ich im Simulator den Mindestwert der Last auf 1 %. Der Bereich der Kurve, in dem das Motordrehmoment negativ ist, stellt die Motorbremswirkung dar.

#### Modell für das Motordrehmoment

Am Beispiel des 1997cm<sup>3</sup> Dieselmotors aus dem 1985er Mercedes-Benz 190 D W201



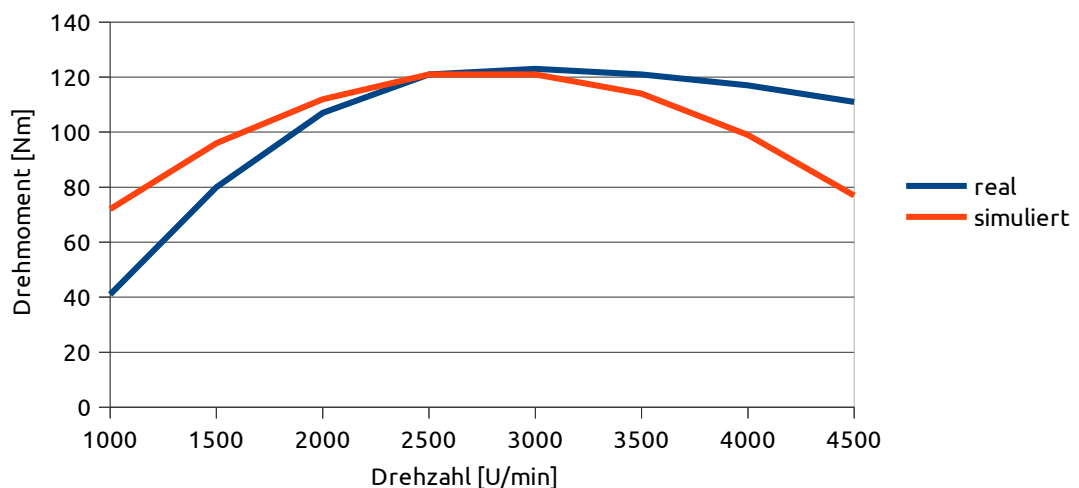
Bei dieser Darstellung handelt es sich um einen Versuch, eine Drehmomentkurve aus einer möglichst kleinen Datenmenge und unter geringem Aufwand zu erzeugen. Da es sich hierbei um eine starke Vereinfachung handelt und Informationen über das Verhalten der

<sup>1</sup> Stark, Stand: 22.05.2020

Motorbremswirkung oder das Drehmoment unter Teillast fehlen, ist davon auszugehen, dass dieses einfache Modell nicht ganz der Realität entspricht. Im Vergleich mit dem tatsächlichen Verhalten zeigt sich, dass das Modell im mittleren Drehzahlbereich ein relativ akkurates Bild abliefern, jedoch an den Enden des Drehzahlbandes starke Abweichungen auftreten. Außerdem erscheint mir die Motorbremswirkung unrealistisch hoch. Diese Schwächen haben jedoch vermutlich keinen allzu großen Einfluss auf die Entwicklung der Schaltstrategien, somit sollte dieses Modell seinen Zweck im Rahmen dieser Arbeit erfüllen. Eine genaue Darstellung würde erfordern, detaillierte Messungen des Motor- oder Raddrehmoments für jedes simulierte Fahrzeug aufzunehmen.

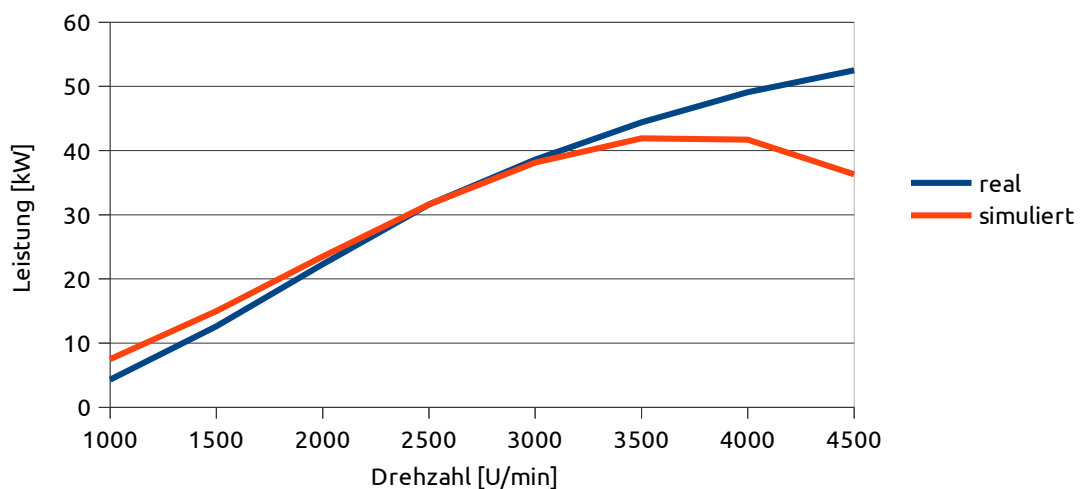
### Vergleich des realen und simulierten maximalen Motordrehmoments

Am Beispiel des 1997cm<sup>3</sup> Dieselmotors aus dem 1985er Mercedes-Benz 190 D W201



### Vergleich der realen und simulierten maximalen Motorleistung

Am Beispiel des 1997cm<sup>3</sup> Dieselmotors aus dem 1985er Mercedes-Benz 190 D W201



### 3.1.1.2 Übersetzung und Getriebe

Bei der Übersetzung einer Drehbewegung ändert sich ihre Drehzahl und ihr Drehmoment. Das Übersetzungsverhältnis gibt das Verhältnis zwischen der Antriebs- und Abtriebsdrehzahl und dem Abtriebs- und Antriebsdrehmoment an<sup>2</sup>:

$$i = \frac{n_{An}}{n_{Ab}} = \frac{M_{Ab}}{M_{An}}$$

Bei Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren treten Übersetzungen am Getriebe, Differenzial und an den Rädern auf. Das Getriebe stellt mehrere Gänge bereit, die unterschiedliche Übersetzungen hervorrufen, was das Anpassen der Motordrehzahl und des Raddrehmoments an die aktuelle Radgeschwindigkeit und Fahrsituation ermöglicht. Die Raddrehzahl  $n_{Rad}$  und das Raddrehmoment  $M_{Rad}$  werden mit folgenden Formeln beschrieben:

$$n_{Rad} = n_{Motor} / i_{Getriebe} / i_{Diff}$$

$$M_{Rad} = M_{Motor} \cdot i_{Getriebe} \cdot i_{Diff}$$

Der Schaltvorgang ist bei den meisten Automatikgetrieben (Wandler-Automatik- und Doppelkupplungsgetriebe) fließend, geschieht ohne Zugkraftunterbrechung und erfolgt in Sekundenbruchteilen<sup>3,4</sup>. Ich habe ihn so in die Simulation implementiert, dass die Getriebeübersetzung  $i_{Getriebe}$  und das Raddrehmoment zunächst den Werten vor dem Schaltvorgang entsprechen, wobei sie sich mit zunehmendem Schaltfortschritt  $p_{Schalt}$  den Werten nach dem Schaltvorgang nähern. Dieses Verhalten lässt sich mit folgenden Formeln ausdrücken:

$$i_{Getriebe} = p_{Schalt} \cdot i_{GetriebeVorher} + (1 - p_{Schalt}) \cdot i_{GetriebeNachher}$$

$$M_{Rad} = p_{Schalt} \cdot M_{RadVorher} + (1 - p_{Schalt}) \cdot M_{RadNachher}$$

Da ich der Einfachheit halber keine Kupplungen oder Drehmomentwandler in die Simulation eingebaut habe, die eine Drehzahldifferenz zwischen dem Motor und der Eingangswelle des Getriebes erlauben, sodass der Motor bei Stillstand der Räder weiterlaufen kann, habe ich einen Start-Knopf eingebaut, der das Fahrzeug auf eine bestimmte Geschwindigkeit und den Motor auf die entsprechende Drehzahl setzt.

Die im Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen auftretenden Verluste werden in der Simulation nicht berücksichtigt.

---

<sup>2</sup> Höfler, Stand: 22.05.2020

<sup>3</sup> Nirschl (Hg.); Soutschka (Hg.); Weissenberger (Hg.), Stand: 22.05.2020

<sup>4</sup> Wikipedia, Stand: 22.05.2020

### 3.1.1.3 Fahrwiderstände

Bei konstanter Geschwindigkeit wirkt der Kraft, die durch den Motor über das Getriebe und Differenzial an die Räder gelangt, die Fahrwiderstandskraft  $F_{Fahr}$  entgegen. Diese entspricht im Wesentlichen der Summe von Luft-, Roll- und Steigungswiderstandskraft<sup>5</sup>.

Die Luftwiderstandskraft  $F_{Luft}$  wird durch die Bewegung eines Körpers relativ zur Luft hervorgerufen und wird mit folgender Formel beschrieben:

$$F_{Luft} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot A$$

Die Rollwiderstandskraft  $F_{Roll}$  wird durch die Verformung der Reifen und des Untergrunds beim Abrollen der Räder verursacht und entspricht:

$$F_{Roll} = c_R \cdot F_N = c_R \cdot \cos(\alpha) \cdot m \cdot g$$

Der Steigungswiderstand  $F_{Steigung}$  kommt dann zustande, wenn sich das Fahrzeug auf einer Steigung befindet. In diesem Fall besitzt die Gewichtskraft eine Komponente, die das Auto entweder beschleunigt oder verzögert:

$$F_{Steigung} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

Einige Fahrzeuge haben Bauteile, die während der Fahrt Einfluss auf den Luftstrom nehmen können, was dazu führt, dass sich der Luftwiderstandskoeffizient und der Rollwiderstand des Fahrzeugs ändert<sup>6</sup>. Das wird jedoch zur Vereinfachung im Simulator nicht berücksichtigt.

### 3.1.1.4 Fahrzeugdaten

Der Simulator ermöglicht das Modellieren verschiedener Fahrzeuge, damit sichergestellt werden kann, dass die entwickelten Schaltstrategien möglichst allgemeingültig sind. Die meisten Eigenschaften der jeweiligen Fahrzeuge wie zum Beispiel die Fahrzeugmasse, das maximale Drehmoment oder die Übersetzungen sind einer Datenbank entnommen<sup>7</sup>. Die Leistungswerte der Motoren werden mit Hilfe des Modells für das Motordrehmoment berechnet und für den Rollwiderstandskoeffizienten wird für alle Fahrzeuge ein Wert von 0,01 angenommen<sup>8</sup>.

Bemerkenswert ist, dass die Höchstgeschwindigkeiten in der Simulation bei drei der vier getesteten Fahrzeugen weniger als 10 % von den jeweiligen Herstellerangaben<sup>9</sup> abweichen:

---

5 Grehn (Hg.), Krause (Hg.), 2007, S.51

6 Neiger, 2014

7 Zal, Stand: 22.05.2020

8 Grehn (Hg.), Krause(Hg.), 2007, S.51

9 Zal, Stand: 22.05.2020



Fahrzeug	Angabe	Simulation	Abweichung
1985 Mercedes-Benz 190 D automatic	156 km/h	154 km/h	+ 1,30 %
2006 BMW 320i Touring Steptronic	213 km/h	220 km/h	+ 3,29 %
2012 Porsche 911 Carrera Coupe PDK	287 km/h	325 km/h	+ 13,24 %
2004 Lexus IS 300 automatic	230 km/h	251 km/h	+ 9,13 %

Die Ausnahme stellt dabei der Porsche 911 dar, was vermutlich daran liegt, dass dieser Spoiler besitzt, die erst bei hohen Geschwindigkeiten ausfahren, sodass dass der Luftwiderstands-koeffizient erhöht wird und sich die Höchstgeschwindigkeit verringert.

### 3.1.2 Hauptfunktion

Die Hauptfunktion des Simulators wird in einem festen Intervall (Standard: 60 mal pro Sekunde) aufgerufen und ist verantwortlich für die Koordinierung der wesentlichen Prozesse der Simulation. Der Quellcode ist im Anhang unter 6.3.1 zu finden. Zunächst werden die Eingabewerte der Schieberegler für das Gas- und Bremspedal und die Steigung eingelesen. Findet gerade ein Schaltvorgang statt, wird der Schaltfortschritt  $p_{Schalt}$  mit folgender Formel aktualisiert, wobei dieser höchstens auf 1 gesetzt wird:

$$p_{Schalt} = p_{Schalt0} + \frac{t_{Intervall}}{t_{Schalt}}$$

(Herleitung im Anhang unter 6.2.2).

Anschließend wird die Geschwindigkeit  $v$  berechnet:

$$v = v_0 + \left( \frac{M_{Rad} \cdot r_{Rad} - F_{Fahr}}{m} - p_{Brems} \cdot a_{BremsMax} \right) \cdot t_{Intervall}$$

(Herleitung im Anhang unter 6.2.3)

und die Motordrehzahl  $n$  wird bestimmt:

$$n = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r_{Rad}} \cdot i_{Diff} \cdot (p_{Schalt} \cdot i_{ag} + (1 - p_{Schalt}) \cdot i_{vg})$$

(Herleitung im Anhang unter 6.2.4).

Daraufhin kommt die Schaltstrategie zum Einsatz, die bei Notwendigkeit einen Schaltvorgang einleitet. Zuletzt werden die zurückgelegte Strecke und Steigung visualisiert und die dargestellten Informationen (z.B. Drehzahl, Geschwindigkeit, Raddrehmoment, ...) aktualisiert.

## **3.2 Schaltstrategien**

### **3.2.1 Ziele von Schaltstrategien**

Moderne Automatikgetriebe werden elektronisch durch eine TCU (Transmission Control Unit) gesteuert. Um zu bestimmen, welcher Gang gewählt wird, greift sie neben den Daten verschiedener Sensoren auf eine Schaltstrategie zurück<sup>10</sup>. Dabei soll den Ansprüchen der Fahrer möglichst genau Folge geleistet werden.

Zum Minimieren des Kraftstoffverbrauchs, sollte unter geringer Last möglichst früh hochgeschaltet und spät heruntergeschaltet werden, weil Verbrennungsmotoren im geringeren Drehzahlbereich am effizientesten arbeiten. Bei Vollast hingegen erwarten Fahrer, dass das Auto so schnell wie möglich beschleunigt. Dafür muss in den Gang geschaltet werden, in dem das höchste Raddrehmoment erzielt wird, wodurch der Motor in der Regel im höheren Drehzahlbereich landet.

Außerdem sollte eine Schaltstrategie für die Fahrer möglichst berechenbar und zuverlässig sein. Das setzt unter anderem voraus, dass das Fahrzeug generell bei höherer Last auch stärker beschleunigt und dass bei den üblichen Steigungen jede Geschwindigkeit gehalten werden kann, ohne dass ständig hoch- und heruntergeschaltet wird (Pendelschaltung).

Eine Schaltstrategie kann auch um zusätzliche Funktionen erweitert werden, wodurch ihr Verhalten an bestimmte Bedingungen angepasst werden kann<sup>11</sup>. Beispielsweise wäre es praktisch, wenn die Schaltstrategie bei einem Gefälle so schaltet, dass die Motorbremswirkung genutzt wird, um das Fahrzeug auf seiner Geschwindigkeit zu halten und das Risiko der Überhitzung der Bremsanlage und deren Verschleiß zu minimieren. Darüber hinaus könnte eine Schaltstrategie die Nutzung hoher Motordrehzahlen verhindern, um den Motor zu schonen, solange seine Betriebstemperatur noch nicht erreicht ist.

---

<sup>10</sup> Meti, Stand: 22.05.2020

<sup>11</sup> Mohne, Stand: 22.05.2020

## 3.2.2 Motordrehzahlbasierte Schaltstrategie

### 3.2.2.1 Grundlage

Eine Möglichkeit den optimalen Gang zu finden, besteht darin, in Abhängigkeit von der Last eine Zielmotordrehzahl  $n_{Ziel}$  zu berechnen und den Gang zu wählen, mit der man dieser am nächsten kommt. Diese Zieldrehzahl sollte unter Teillast möglichst gering sein, um Kraftstoff zu sparen, und sich mit zunehmender Last erhöhen, um das Beschleunigungspotenzial zu vergrößern.

Zunächst wird die Zieldrehzahl aus dem gewichteten Mittelwert zwischen der Leerlaufdrehzahl  $n_{Leerlauf}$  und Maximaldrehzahl  $n_{max}$  bestimmt, wobei mit zunehmender Last das Gewicht von der Leerlaufdrehzahl auf die Maximaldrehzahl verschoben wird:

$$n_{Ziel} = (1 - p_{Last}) \cdot n_{Leerlauf} + p_{Last} \cdot n_{max}$$

Anschließend werden die Motordrehzahlen berechnet, die bei der aktuellen Geschwindigkeit mit den verfügbaren Getriebeübersetzungen erreicht werden können. Gewählt wird der Gang mit der kleinsten Differenz zwischen der Motor- und Zieldrehzahl.

Um zu verhindern, dass die Motordrehzahl außerhalb des Arbeitsbereichs des Motors gerät, wird automatisch hochgeschaltet, wenn im aktuellen Gang die Maximaldrehzahl erreicht wird und heruntergeschaltet, wenn die Motordrehzahl unterhalb der Leerlaufdrehzahl liegt.

Beim Testen in der Simulation fällt auf, dass bei Teillast die Schaltstrategie meistens zu kleine Gänge wählt, die den Motor auf eine hohe Drehzahl bringen, was zu einem unnötig hohen Kraftstoffverbrauch führen würde. Außerdem treten beim Versuch, bergauf Geschwindigkeiten zu halten, störende Pendelschaltungen auf.

Zum Reduzieren des Kraftstoffverbrauchs bei Teillast wird die Formel so angepasst, dass sie bei geringer Last niedrigere Drehzahlen zurückgibt:

$$n_{Ziel} = (1 - p_{Last}^3) \cdot n_{Leerlauf} + p_{Last}^3 \cdot n_{max}$$

Um den Pendelschaltungen entgegenzuwirken, verändere ich die Schaltstrategie so, dass nur dann nach einem neuen Gang gesucht wird, wenn die Differenz zwischen der aktuellen Motordrehzahl und der Zieldrehzahl größer als ein bestimmter Schwellwert ist, der in Abhängigkeit von der Größe des Drehzahlbandes des Motors gesetzt wird. Das Problem dabei ist, dass ein kleiner Schwellwert mehr Pendelschaltungen verursacht, während ein großer Schwellwert dazu führt, dass Gänge übersprungen werden, sodass in vielen Fällen der optimale Gang nicht mehr erreicht werden kann. Dieses ungewollte Überspringen kommt zustande, wenn die Differenz zwischen der Motordrehzahl im benachbarten Gang und der aktuellen Motordrehzahl kleiner ist als der Schwellwert. Also besteht die Lösung darin, nicht

direkt den besten Gang zu wählen, sondern immer den benachbarten Gang zu nehmen, der näher am besten Gang ist und die Schaltlogik so oft zu durchlaufen, bis ein Gang gefunden wurde, bei der die Differenz zwischen der Motor- und Zieldrehzahl kleiner ist als der Schwellwert.

Nun ist die Schaltstrategie gut berechenbar, arbeitet unter Teillast relativ kraftstoffsparend und es können mit den getesteten Fahrzeugen problemlos alle Geschwindigkeiten bis 130 km/h bei Steigungen bis 15 % gehalten werden. Die benötigten Daten (Last, Motordrehzahl, Leerlaufdrehzahl, Maximaldrehzahl, Getriebe- und Differenzialübersetzungen) könnten ohne großen Aufwand durch den Bordcomputer ermittelt werden, was die Implementierung in ein echtes Fahrzeug relativ einfach macht.

Der entsprechende Quellcode befindet sich im Anhang unter 6.3.2.

### 3.2.2.2 Verbesserung der Maximalbeschleunigung

Ein Problem der Schaltstrategie ist, dass die maximale Beschleunigung unter Volllast nicht sichergestellt ist, weil erst bei der Maximaldrehzahl hochgeschaltet wird, obwohl schon bereits vorher mit dem nächsten Gang ein höheres Raddrehmoment und somit eine stärkere Beschleunigung erzielt werden könnte. Bestätigt wird das dadurch, dass sich bei manchen Fahrzeugen bei Volllast das berechnete Raddrehmoment nach dem Schaltvorgang deutlich erhöht. Das lässt sich verbessern, indem in der Formel für die Zieldrehzahl die Maximaldrehzahl durch die Drehzahl  $n_{sinnvoll}$  ersetzt wird, bei der im nächsten Gang das gleiche Raddrehmoment erzielt wird:

$$n_{Ziel} = (1 - p_{Last}^3) \cdot n_{Leerlauf} + p_{Last}^3 \cdot n_{sinnvoll}$$

Diese Drehzahl wird mit folgender Formel berechnet:

$$n_{sinnvoll} = 2 \frac{i_{ag} \cdot n_{maxM} \cdot (i_{ng}^2 - i_{ag}^2)}{i_{ng}^3 - i_{ag}^3}$$

(Herleitung im Anhang unter 6.2.5)

Falls  $n_{sinnvoll}$  größer ist als die Maximaldrehzahl, wird sie auf die Maximaldrehzahl gesetzt. Außerdem wird automatisch hochgeschaltet, wenn  $n_{sinnvoll}$  erreicht wird und es darf nicht in einen Gang geschaltet werden, wenn die Motordrehzahl  $n_{sinnvoll}$  übersteigen würde. Im letzten Gang wird  $n_{sinnvoll}$  auf den Wert des vorletzten Ganges gesetzt.

Tests im Simulator zeigen, dass in der Tat die Fahrzeuge, die vorher zu spät hochgeschaltet haben, nun früher schalten, sodass sie vor und nach dem Schaltvorgang das gleiche Raddrehmoment produzieren. Diese Funktion erfordert jedoch Informationen über die

Drehmomentkurve unter Vollast. In der Simulation wird sie ohne großen Aufwand anhand des Modells für das Motordrehmoment berechnet. Da jedoch die Darstellung in der Simulation nicht ganz realistisch ist, würde eine Implementierung in einem echten Fahrzeug voraussetzen, dass eine möglichst genaue Messung der Vollastkurve im Bordcomputer eingespeichert ist.

### **3.2.2.3 Automatische Nutzung der Motorbremse bergab**

Zusätzlich baue ich eine Funktion ein, die dafür sorgt, dass bergab bei Nulllast, anstelle des Ganges mit der geringsten Motordrehzahl, der Gang gewählt wird, mit der das Fahrzeug mit Hilfe der Motorbremswirkung möglichst auf seiner Geschwindigkeit gehalten wird, wodurch dessen Bremsanlage entlastet werden soll.

Dafür wird, wenn sich das Fahrzeug auf einem Gefälle und unter Nulllast befindet, zunächst der Steigungswiderstand berechnet. Anschließend wird für jeden Gang die durch den Motor verursachte Radkraft berechnet, woraufhin der Gang gewählt wird, bei der die Differenz zwischen der durch den Motor verursachten Radkraft und dem Steigungswiderstand die geringste ist. Da es gefährlich sein kann, wenn das Fahrzeug bergab ungewollt verzögert, werden nur Gänge gewählt, deren Radkraft kleiner ist als die Steigungswiderstandskraft.

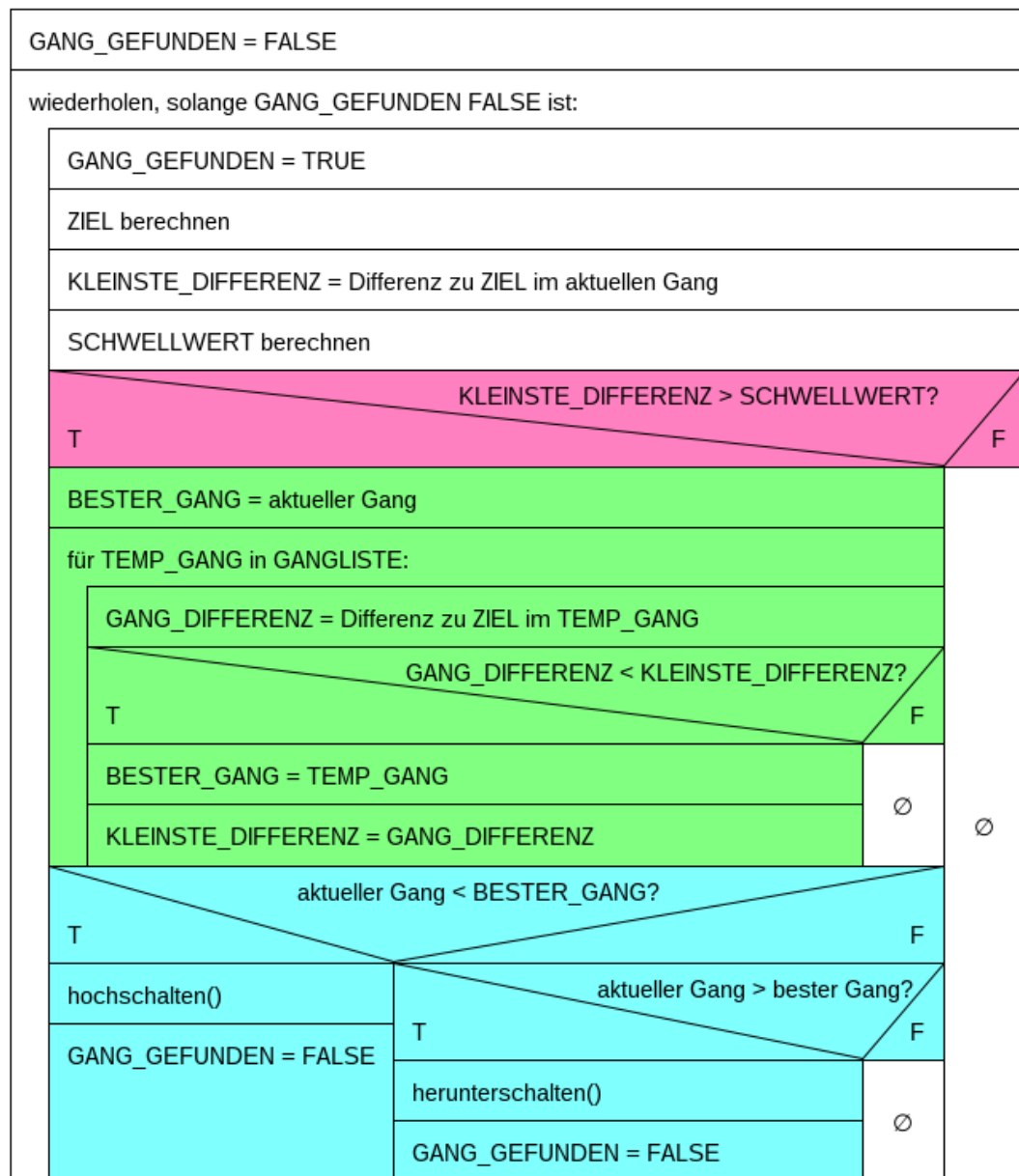
Beim Testen fällt auf, dass es jetzt schwierig ist, kontrolliert zu bremsen, weil sich jedes Mal, wenn die Schaltstrategie herunterschaltet, die Beschleunigung ändert. Das lässt sich verbessern, indem nur dann automatisch heruntergeschaltet wird, wenn gerade das Bremspedal nicht betätigt wird.

Die automatische Nutzung der Motorbremse ist äußerst praktisch, erfordert jedoch auch viele schwer zu beschaffene Daten. Eine Implementierung in einem echten Fahrzeug würde beispielsweise erfordern, dass eine Messung des Motordrehmoments unter Nulllast im Bordcomputer vorliegt. Außerdem würden beispielsweise eine Änderung der Masse durch Zuladung oder ein hoher Luftwiderstand bei hohen Geschwindigkeiten oder starkem Wind dazu führen, dass die Berechnungen keine akkuraten Ergebnisse mehr liefern und diese Funktion nicht mehr wie vorgesehen arbeitet.

### **3.2.3 Weitere Ansätze**

Neben der motordrehzahlbasierten Schaltstrategie habe ich auch weitere Schaltstrategien mit anderen Ansätzen ausprobiert, wobei das Grundkonzept, sich ein Ziel zu suchen und anschließend den Gang zu wählen, mit dem das Ziel so gut wie möglich erreicht wird, jeweils erhalten bleibt:

### Allgemeiner Aufbau der Schaltstrategien



Rosa: Bedingung für die Suche nach einem neuen Gang (optional)

Grün: Such nach dem besten Gang durch Vergleich der Gänge

Blau: Bei Notwendigkeit hoch- oder herunterschalten

Der erste Ansatz besteht darin, anstelle einer Zielmotordrehzahl eine Zielübersetzung zu berechnen. Diese bringt unter geringer Last den Motor auf eine möglichst niedrige Drehzahl und nähert sich mit zunehmender Last der Getriebeübersetzung, mit der der Motor die Drehzahl mit der maximalen Leistung erreicht und somit die höchstmögliche Beschleunigung erzielt wird. Nach einigen Optimierungen funktioniert diese Schaltstrategie ähnlich gut wie die motordrehzahlbasierte Schaltstrategie.

Im zweiten Ansatz wird in Abhängigkeit von der Last eine Zielbeschleunigung berechnet. Diese beträgt bei Nulllast Null und nähert sich mit zunehmender Last der in der Situation höchstmöglichen Beschleunigung. Ich habe erwartet, dass eine Schaltstrategie mit diesem Ansatz relativ zuverlässig sein müsste, weil sichergestellt ist, dass mit höher Last auch höhere Beschleunigung erzielt wird. Beim Testen stellt sich jedoch heraus, dass das überhaupt nicht der Fall ist. Der Versuch, der Zielbeschleunigung möglichst nahe zu kommen führt dazu, dass bei konstanter Last die tatsächliche Beschleunigung auf- und abschwankt. Außerdem erfordert die Berechnung der Maximalbeschleunigung Informationen über die Fahrwiderstände, die schwer zu beschaffen sind, weil sie sich beispielsweise durch Zuladung ändern können. Der einzige Vorteil besteht darin, dass bergab automatisch die Motorbremswirkung genutzt wird, wodurch das Fahrzeug auf seiner Geschwindigkeit gehalten wird.

### **3.2.4 Beurteilung des Verhaltens in der Realität**

Es muss angemerkt werden, dass die Simulation zwar eine gute Grundlage für die Entwicklung von Schaltstrategien bietet, sie jedoch nicht ausreicht, um deren Verhalten in der Realität vollständig zu beurteilen. Beispielsweise würde vermutlich die Tatsache, dass die Fahrzeuge in der Simulation durch Schieberegler anstatt durch Pedale gesteuert werden, bei der Implementierung in echte Fahrzeuge zusätzliche Anpassungen erfordern. Außerdem, gibt die Simulation keine Auskunft über unangenehme, auf das Fahrzeug wirkende Kräfte, die durch unpassende Schaltvorgänge hervorgerufen werden könnten. Darüber hinaus ist denkbar, dass ein Schaltvorgang während einer Kurvenfahrt das Fahrzeug aus dem Gleichgewicht bringen könnte, was in der Simulation jedoch nicht beurteilt werden kann, weil sich die Fahrzeuge dort nur geradeaus bewegen können. Um die Schaltstrategien für den Einsatz in der Realität zu optimieren, sind also genauere Simulationen und Tests in echten Fahrzeugen unabdingbar.

## **4. Fazit**

Für die Entwicklung von Schaltstrategien sind möglichst realistische Testbedingungen notwendig. Aufgrund des hohen Aufwands, der für Tests mit echten Fahrzeugen erforderlich wäre, besteht die nächstbeste Option darin, eine Simulation zu programmieren, die diese Bedingungen nachbildet. Um ein realistisches Verhalten zu gewährleisten, müssen viele Faktoren berücksichtigt und implementiert werden. Bei fehlenden Daten muss auf Vereinfachungen und Annahmen zurückgegriffen werden, wodurch die Simulation weniger realistisch wird, was sich beispielsweise an der simulierten Drehmomentkurve zeigt. Außerdem gibt es bestimmte Faktoren, die durch die Simulation nicht berücksichtigt werden

und nur mit komplexeren Simulationen oder durch Tests mit echten Fahrzeugen ermittelt werden können. Dennoch wird hierbei ein wesentlicher Zweck von Simulationen deutlich: Sie können Situationen modellieren, die in der Realität zu aufwendig herbeizuführen sind, was dazu führt, dass kleine Abstriche im Realismus gerne in Kauf genommen werden, solange das reale Verhalten gut genug nachgebildet wird.

Wurden die Testbedingungen geschaffen, lässt sich bereits mit relativ einfachen Mitteln eine sich an der Motordrehzahl orientierende Schaltstrategie entwickeln, die unter Teillast kraftstoffsparend arbeitet, hohe Beschleunigung ermöglicht, gut berechenbar ist und somit die Ziele von Schaltstrategien weitgehend erfüllt. Diese lässt sich weiter optimieren und um zusätzliche Funktionen ergänzen, jedoch vergrößert das den Bedarf an Informationen, was ihre Implementierung in ein echtes Fahrzeug erschwert und ihre Fehleranfälligkeit erhöht. Darüber hinaus gibt es auch weitere Ansätze für Schaltstrategien, wobei deren genauere Untersuchung den Rahmen dieser Facharbeit sprengen würde.



## 5. Quellen

Grehn, Joachim (Hg.); Krause, Joachim (Hg.). Metzler Physik. 4. Auflage. Schroedel, 2007, S.51

Höfler, Andreas (Hg.): Funktionsweise,  
<https://www.tec-science.com/de/getriebe-technik/grundlagen/funktionsweise/>, Stand:  
22.05.2020

Meti, Ashok C.: Transmission Control. <http://164.100.133.129:81/econtent/Uploads/MAS-7%20Transmission%20Control.pdf>, Stand: 22.05.2020

Mohne, Jochen (Hg.): Funktion eines Automatikgetriebes,  
<https://www.str-automatik.de/automatikgetriebe/funktion/>, Stand: 22.05.2020

Neiger, Chris: „Active aerodynamics, a slippery obsession“,  
<http://www.bbc.com/autos/story/20140819-carmakers-slippery-new-buzzword>, 13.11.2014

Nirschl, Dieter (Hg.); Soutschka, Lars (Hg.); Weissenberger, Oliver (Hg.): „Schaltung oder Automatik: Stärken und Schwächen“, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/schaltung-oder-automatik-getriebe/>, Stand: 22.05.2020

Stark, Anthony: Power vs. Torque, <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/power-vs-torque/>, Stand: 22.05.2020

Wikipedia: Luftdichte, <https://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte>, Stand: 22.05.2020

Wikipedia: Shift time, [https://en.wikipedia.org/wiki/Shift\\_time](https://en.wikipedia.org/wiki/Shift_time), Stand: 22.05.2020

Zal, Pawel (Hg.): Automobile-Catalog, <https://www.automobile-catalog.com>, Stand:  
22.05.2020

# 6. Anhang

## 6.1 Formelzeichen

$A$	Stirnfläche des Fahrzeugs
$a$	Beschleunigung
$a_{BremsMax}$	Maximale Verzögerung durch Bremsanlage
$\alpha$	Steigungswinkel
$c_L$	Luftwiderstandsbeiwert
$c_R$	Rollwiderstandskoeffizient
$F$	Kraft
$F_N$	Normalkraft
$F_{Fahr}$	Fahrwiderstandskraft
$F_{Luft}$	Luftwiderstandskraft
$F_{Roll}$	Rollwiderstandskraft
$g$	Schwerebeschleunigung
$i$	Übersetzungsverhältnis
$i_{Differenzial}$	Übersetzungsverhältnis des Differenzials
$i_{Getriebe}$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes
$i_{GetriebeVorher}$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes vor dem Schaltvorgang
$i_{GetriebeNachher}$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes nach dem Schaltvorgang
$i_{ag}$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes im aktuellen Gang
$i_{vg}$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes im vorherigen Gang
$i_{ng}$	Übersetzungsverhältnis des Getriebes im nächsten Gang
$M$	Drehmoment
$M_{Motor}$	Motordrehmoment
$M_{max}$	Maximales Motordrehmoment
$M_{Rad}$	Raddrehmoment
$M_{RadNachher}$	Raddrehmoment nach dem Schaltvorgang
$M_{RadVorher}$	Raddrehmoment vor dem Schaltvorgang
$m$	Masse (des Fahrzeugs)
$n$	Drehzahl
$n_{Motor}$	Motordrehzahl

$n_{maxM}$	Motordrehzahl, bei der das maximale Motordrehmoment erzielt wird
$n_{max}$	Maximale Motordrehzahl
$n_{Leerlauf}$	Leerlaufdrehzahl des Motors
$n_{Ziel}$	Zieldrehzahl
$n_{sinnvoll}$	Motordrehzahl, bei der im nächsten Gang das gleiche Raddrehmoment erzielt wird
$n_{Rad}$	Raddrehzahl
$p_{Schalt}$	Fortschritt des Schaltvorgangs (zwischen 0 % und 100 %)
$p_{Schalt 0}$	Fortschritt des Schaltvorgangs beim letzten Aufruf der Hauptfunktion
$p_{Last}$	Last (zwischen 1 % und 100 %)
$p_{Brems}$	Betätigung des Bremspedals (zwischen 0 % und 100 %)
$r_{Rad}$	Radradius
$\rho$	Dichte (für Luft auf Meeresspiegelhöhe bei 20 °C: 1,204 kg/m <sup>3</sup> ) <sup>12</sup>
$t$	Zeit
$t_{Schalt}$	Dauer eines Schaltvorgangs
$t_{Intervall}$	Zeit zwischen Aufrufen der Hauptfunktion
$v$	Geschwindigkeit

## 6.2 Formelherleitungen

### 6.2.1 Modell für das Motordrehmoment

Bei dem Modell für das Motordrehmoment handelt es sich um eine quadratische Funktion, die das Motordrehmoment in Abhängigkeit von seiner Drehzahl und Last zurückliefert. Es wird angenommen, dass der Motor bei einer Drehzahl 0 U/min 0 Nm Drehmoment produziert. Unter Vollast beträgt der Wert des Scheitelpunktes  $M_{max}$  und tritt an der Stelle  $n_{max}$  auf.

Scheitelpunktform für quadratische Funktionen:

$$f(x) = q(x - b)^2 + c$$

Übertragen auf das Modell bei Vollast:

$$M_{Vollast}(n) = q(n - n_{maxM})^2 + M_{max}$$

---

<sup>12</sup> Wikipedia, Stand: 22.05.2020

Bestimmen von  $q$ :

$$M(0)=0$$

$$q(0-n_{\max M})^2+M_{\max}=0$$

$$q \cdot n_{\max M}^2 + M_{\max} = 0$$

$$q = \frac{-M_{\max}}{n_{\max M}^2}$$

Einsetzen von  $q$  in  $M_{\text{Vollast}}(n)$ :

$$M_{\text{Vollast}}(n) = \frac{-M_{\max}}{n_{\max M}^2} \cdot (n - n_{\max M})^2 + M_{\max}$$

Bei Teillast verringert sich das maximale Drehmoment und wird bei einer geringeren Drehzahl erreicht. Um das Drehmoment auch unter Teillast bestimmen zu können, wird die Funktion folgendermaßen angepasst:

$$M(n, p_{\text{Last}}) = \frac{-M_{\max}}{n_{\max M}^2} \cdot p_{\text{Last}}^2 \cdot \left(\frac{n}{p_{\text{Last}}} - n_{\max M}\right)^2 + p_{\text{Last}}^2 \cdot M_{\max}$$

## 6.2.2 Schaltfortschritt

Der Schaltfortschritt verhält sich während dem Schaltvorgang proportional zur Zeit  $t$  und wird durch eine lineare Funktion  $p_{\text{Schalt}}(t)$  dargestellt, wobei  $t$  die Zeit seit dem Beginn des Schaltvorgangs ist.  $p_{\text{Schalt}}$  wird auf Werte zwischen 0 und 1 begrenzt.

Für lineare Funktionen allgemein gilt:

$$f(x) = q \cdot x + b$$

Bezogen auf diesen Fall bedeutet das:

$$p_{\text{Schalt}}(t) = q \cdot t + b$$

Am Anfang des Schaltvorgangs ist der Schaltfortschritt 0:

$$p_{\text{Schalt}}(0) = 0$$

$$q \cdot 0 + b = 0$$

$$b = 0$$

Einsetzen von  $b$  in  $p_{Schalt}(t)$ :

$$p_{Schalt}(t) = q \cdot t$$

Nach  $t_{Schalt}$  beträgt  $p_{Schalt}(t)$  1:

$$p_{Schalt}(t_{Schalt}) = 1$$

$$q \cdot t_{Schalt} = 1$$

$$q = \frac{1}{t_{Schalt}}$$

Einsetzen von  $q$  in  $p_{Schalt}(t)$ :

$$p_{Schalt}(t) = \frac{t}{t_{Schalt}}$$

Während  $t_{Intervall}$  schreitet Schaltfortschritt um  $t_{Intervall} / t_{Schalt}$  voran:

$$p_{Schalt}(t_{Intervall}) = \frac{t_{Intervall}}{t_{Schalt}}$$

Also gilt bei jedem Aufruf der Hauptfunktion für  $p_{Schalt}$ :

$$p_{Schalt} = p_{Schalt0} + \frac{t_{Intervall}}{t_{Schalt}}$$

$p_{Schalt0}$  : Schaltfortschritt im letzten Aufruf der Hauptfunktion

## 6.2.3 Geschwindigkeit

Bei jedem Aufruf der Hauptfunktion muss die neue Geschwindigkeit bestimmt werden.

Allgemein gilt für die Geschwindigkeit:

$$v = v_0 + a \cdot t_{Intervall}$$

$v_0$  ist hierbei der Geschwindigkeit, die beim letzten Durchgang der Hauptfunktion berechnet wurde und  $t_{Intervall}$  ist die Zeit zwischen den Aufrufen der Hauptfunktion.

Für die Beschleunigung  $a$  gilt allgemein:

$$a = \frac{F}{m}$$

Davon wird die Verzögerung durch die Bremsanlage abgezogen:

$$a = \frac{F}{m} - p_{\text{Brems}} \cdot a_{\text{BremsMax}}$$

Die restlichen auf das Fahrzeug wirkenden Kräfte sind:

$$F = F_{\text{Rad}} - F_{\text{Fahr}}$$

wobei für die Radkraft gilt:

$$F_{\text{Rad}} = M_{\text{Rad}} \cdot r_{\text{Rad}}$$

Somit ergibt sich für die Beschleunigung:

$$a = \frac{M_{\text{Rad}} \cdot r_{\text{Rad}} - F_{\text{Fahr}}}{m} - p_{\text{Brems}} \cdot a_{\text{BremsMax}}$$

Und für die Geschwindigkeit:

$$v = v_0 + \left( \frac{M_{\text{Rad}} \cdot r_{\text{Rad}} - F_{\text{Fahr}}}{m} - p_{\text{Brems}} \cdot a_{\text{BremsMax}} \right) \cdot t_{\text{Intervall}}$$

## 6.2.4 Drehzahl aus Geschwindigkeit

Die Formel für die Raddrehzahl:

$$n_{\text{Rad}} = n_{\text{Motor}} / i_{\text{Getriebe}} / i_{\text{Differenzial}}$$

wird nach der Motordrehzahl aufgelöst:

$$n_{\text{Motor}} = n_{\text{Rad}} \cdot i_{\text{Getriebe}} \cdot i_{\text{Differenzial}}$$

Dabei gilt für die Raddrehzahl:

$$n_{\text{Rad}} = \frac{v}{2 \pi \cdot r_{\text{Rad}}}$$

und für die Getriebeübersetzung:

$$i_{\text{Getriebe}} = p_{\text{Schalt}} \cdot i_{\text{ag}} + (1 - p_{\text{Schalt}}) \cdot i_{\text{vg}}$$

Einsetzen:

$$n = \frac{v}{2 \pi \cdot r_{\text{Rad}}} \cdot (p_{\text{Schalt}} \cdot i_{\text{ag}} + (1 - p_{\text{Schalt}}) \cdot i_{\text{vg}}) \cdot i_{\text{Diff}}$$

## 6.2.5 Schaltdrehzahl für Maximalbeschleunigung

Um die maximale Beschleunigung zu erreichen, muss zu jedem Zeitpunkt das Raddrehmoment so hoch sein wie möglich. Das bedeutet, dass immer bei der Motordrehzahl geschaltet werden muss, bei der im nächsten Gang das gleiche Raddrehmoment vorliegt wie im aktuellen Gang.

$$\begin{aligned}
 M_{\text{Rad-ig}} &= M_{\text{Rad-ng}} \\
 \left( \frac{-M_{\text{max}}}{n_{\text{max}}^2} \cdot (n - n_{\text{max}})^2 + M_{\text{max}} \right) \cdot i_{\text{g}} \cdot i_{\text{diff}} &= \left( \frac{-M_{\text{max}}}{n_{\text{max}}^2} \cdot \left( \frac{n \cdot i_{\text{g}}}{i_{\text{g}}} - n_{\text{max}} \right)^2 + M_{\text{max}} \right) \cdot i_{\text{g}} \cdot i_{\text{diff}} \\
 \text{; } i_{\text{diff}} \text{ weglassen, } M_{\text{max}} \text{ ausklammern, : } M_{\text{max}} &\Leftrightarrow \frac{-1}{n_{\text{max}}^2} \cdot (n - n_{\text{max}})^2 \cdot i_{\text{g}} + i_{\text{g}} = \frac{-1}{n_{\text{max}}^2} \cdot \left( \frac{n \cdot i_{\text{g}}}{i_{\text{g}}} - n_{\text{max}} \right)^2 \cdot i_{\text{g}} + i_{\text{g}} \\
 \text{; } i_{\text{g}} \text{ weglassen, Bin. Formel, Multiplizieren} &\Leftrightarrow -\frac{n^2}{n_{\text{max}}^2} + \frac{2n}{n_{\text{max}}} = \left( -\left( \frac{n \cdot i_{\text{g}}}{i_{\text{g}} \cdot n_{\text{max}}} \right)^2 + \frac{2 \cdot n \cdot i_{\text{g}}}{i_{\text{g}} \cdot n_{\text{max}}} - 1 \right) \cdot \frac{i_{\text{g}}}{i_{\text{g}}} + \frac{i_{\text{g}}}{i_{\text{g}}} \\
 \text{; } i_{\text{g}} \text{ einklammern} &\Leftrightarrow -\frac{n^2}{n_{\text{max}}^2} + \frac{2n}{n_{\text{max}}} = -\frac{n^2 \cdot i_{\text{g}}^3}{i_{\text{g}}^3 \cdot n_{\text{max}}^2} + \frac{2n \cdot i_{\text{g}}^2}{i_{\text{g}}^2 \cdot n_{\text{max}}} \\
 \text{; } 2n \cdot \frac{1}{n_{\text{max}}^2} &\Leftrightarrow -\frac{n^2}{2n} = -\frac{n^2 \cdot i_{\text{g}}^3}{i_{\text{g}}^3 \cdot 2n} + \frac{i_{\text{g}}^2}{i_{\text{g}}^2} \cdot n_{\text{max}} - n_{\text{max}} \\
 + \frac{n^2 \cdot i_{\text{g}}^3}{i_{\text{g}}^3 \cdot 2n} &\Leftrightarrow \frac{2n(i_{\text{g}}^3 - i_{\text{g}}^3)}{i_{\text{g}}^3 \cdot 4} = \frac{i_{\text{g}}^2}{i_{\text{g}}^2} \cdot n_{\text{max}} - n_{\text{max}} \\
 n_{\text{max}} \text{ ausklammern, : } i_{\text{g}}^3 \cdot 4 &\Leftrightarrow 2n(i_{\text{g}}^3 - i_{\text{g}}^3) = n_{\text{max}} \cdot i_{\text{g}}^3 \cdot 4 \left( \frac{i_{\text{g}}^2}{i_{\text{g}}^2} - 1 \right) \\
 \text{: } 2(i_{\text{g}}^3 - i_{\text{g}}^3) &\Leftrightarrow n = \frac{4 \cdot n_{\text{max}} \cdot i_{\text{g}}^3 \cdot \left( \frac{i_{\text{g}}^2}{i_{\text{g}}^2} - 1 \right)}{2(i_{\text{g}}^3 - i_{\text{g}}^3)} \\
 \text{: } i_{\text{g}}^2 \text{ einklammern} &n = 2 \cdot i_{\text{g}} \cdot n_{\text{max}} \cdot \frac{(i_{\text{g}}^2 - i_{\text{g}}^2)}{(i_{\text{g}}^3 - i_{\text{g}}^3)}
 \end{aligned}$$

## 6.3 Quellcode

### 6.3.1 Hauptfunktion

```
114 //main function; execution each frame
115 function main() {
116     //get inputs
117     car.data.throttle = parseInt(document.getElementById("throttle_input").value) / 100;
118     car.data.brake = parseInt(document.getElementById("brake_input").value) / 100;
119     angle = parseInt(document.getElementById("angle_input").value);
120     air_resistance = document.getElementById("air_resistance_input").checked;
121     rolling_resistance = document.getElementById("rolling_resistance_input").checked;
122
123
124     //adjust shift progress
125     if (car.data.shift_progress < 1) {
126         car.data.shift_progress += (frame_rate / 1000) / car.properties.shift_time;
127     }
128
129     if (car.data.shift_progress > 1) {
130         car.data.shift_progress = 1;
131     }
132
133
134     //increase throttle if the engine is below idle_rpm
135     if (car.data.rpm <= car.properties.idle_rpm && car.data.throttle <= car.properties.idle_throttle) {
136         car.data.throttle = car.properties.idle_throttle;
137     }
138
139
140     //set speed and engine rpm
141     car.data.speed = car.data.speed + calculator.acceleration(car) * (frame_rate / 1000);
142
143     if (car.data.speed < 0) {
144         car.data.speed = 0;
145     }
146
147     car.data.rpm = calculator.rpm_from_speed(car, car.data.speed);
148
149     if (car.data.rpm > car.properties.rpm_limiter) {
150         car.data.rpm = car.properties.rpm_limiter;
151         car.data.speed = calculator.speed_from_rpm(car, car.properties.rpm_limiter);
152     }
153
154
155     //automatic shifting
156     var strategy_input_value = document.getElementById("strategy_select").value;
157
158     switch (strategy_input_value) {
159         case "r1":
160             autoshift_strategy_5_1();
161             break;
162         case "r2":
163             autoshift_strategy_5_2();
164             break;
165         case "r3":
166             autoshift_strategy_5_3();
167             break;
168         case "g1":
169             autoshift_strategy_4();
170             break;
171         case "a1":
172             autoshift_strategy_3();
173             break;
174     }
175
176
177     //sound
178     if (sound === true) {
179         car.sound.update_sound();
180     }
181
182
183     //visualize
184     var street = document.getElementById("street");
185     street_position_relative = parseFloat(street.style.left);
```



```

186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
var scale = parseFloat(getComputedStyle(document.documentElement).getPropertyValue('--scale'));
street.style.left = (street_position_relative - car.data.speed * frame_rate / 1000 * scale) % (10 * scale) + "vw";
document.getElementById("simulation_container").style.transform = `rotate(${angle}deg)`;

//calculate frame rate
if (frame_number >= 50) {
    let current_date = Date.now();
    current_frame_rate = 1000 / ((current_date - first_frame_date) / 50);
    first_frame_date = Date.now();
    frame_number = 0;
}

frame_number += 1;

//print information
document.getElementById("velocity_label").innerText = `${(car.data.speed * 3.6).toFixed(2)} km/h`;
document.getElementById("engine_speed_label").innerText = `${car.data.rpm.toFixed(2)} U/min`;
document.getElementById("gear_label").innerText = `${car.data.gear}`;
document.getElementById("previous_gear_label").innerText = `${car.data.previous_gear}`;
document.getElementById("shift_progress_label").innerText = `${parseInt(car.data.shift_progress * 100) + "%}`;
document.getElementById("acceleration_label").innerText = `${(calculator.acceleration(car)).toFixed(2)} m/s²`;
document.getElementById("engine_torque_label").innerText = `${car.engine_torque().toFixed(2)} Nm`;
document.getElementById("wheel_torque_label").innerText = `${calculator.wheel_torque(car).toFixed(2)} Nm`;
document.getElementById("load_label").innerText = `${(car.data.throttle * 100).toFixed(0) + "%}`;
document.getElementById("brake_label").innerText = `${(car.data.brake * 100).toFixed(0) + "%}`;
document.getElementById("slope_label").innerText = `${angle + "°"; ${(Math.tan(angle * (2 * Math.PI) / 360) * 100).toFixed(2) + "%}`;
document.getElementById("frame_rate_label").innerText = `${current_frame_rate.toFixed(0)} FPS`;

gauges.update();

```

## 6.3.2 Grundlage der drehzahlbasierten Schaltstrategie

```

4 //gear selection based on engine speed
5 function autoshift_strategy_5_1() {
6     if (car.data.shift_progress == 1) {
7         var gear_found = false;
8
9         while (gear_found === false) {
10             gear_found = true;
11
12
13             var target_rpm = (1 - car.data.throttle ** 3) * (car.properties.idle_rpm)
14                 + (car.data.throttle ** 3) * car.properties.rpm_limiter;
15
16
17             //find the gear in which the engine speed is as close as possible to the target
18             let temp_car = JSON.parse(JSON.stringify(car));
19             temp_car.data.shift_progress = 1;
20             temp_car.data.rpm = calculator.rpm_from_speed(temp_car, temp_car.data.speed);
21
22             var best_gear = car.data.gear;
23             var smallest_difference = Math.abs(target_rpm - temp_car.data.rpm);
24             var gear_hunt_threshold = (car.properties.rpm_limiter - car.properties.idle_rpm) / 6;
25
26             if (smallest_difference > gear_hunt_threshold) {
27                 //this section is skipped if the current gear is good enough -> reduction of gear hunting
28                 for (let i = 0; i < car.properties.gear_ratios.length; i++) {
29                     let temp_rpm = temp_car.data.rpm * (car.properties.gear_ratios[i]
30                         / car.properties.gear_ratios[temp_car.data.gear - 1]);
31                     let temp_diff = Math.abs(target_rpm - temp_rpm);
32
33                     if (temp_diff < smallest_difference) {
34                         best_gear = i + 1;
35                         smallest_difference = temp_diff;
36                     }
37                 }
38             }
39
40
41             //shift into the gear which is next to the current gear and closer to the best gear
42             if (car.data.gear < best_gear) {
43                 temp_car.data.gear = car.data.gear + 1;
44                 temp_car.data.rpm = calculator.rpm_from_speed(temp_car, temp_car.data.speed);
45
46                 if (temp_car.data.rpm > car.properties.idle_rpm) {
47                     car.shift_up();
48                     gear_found = false;
49                 }
50             }
51         }
52     }
53 }

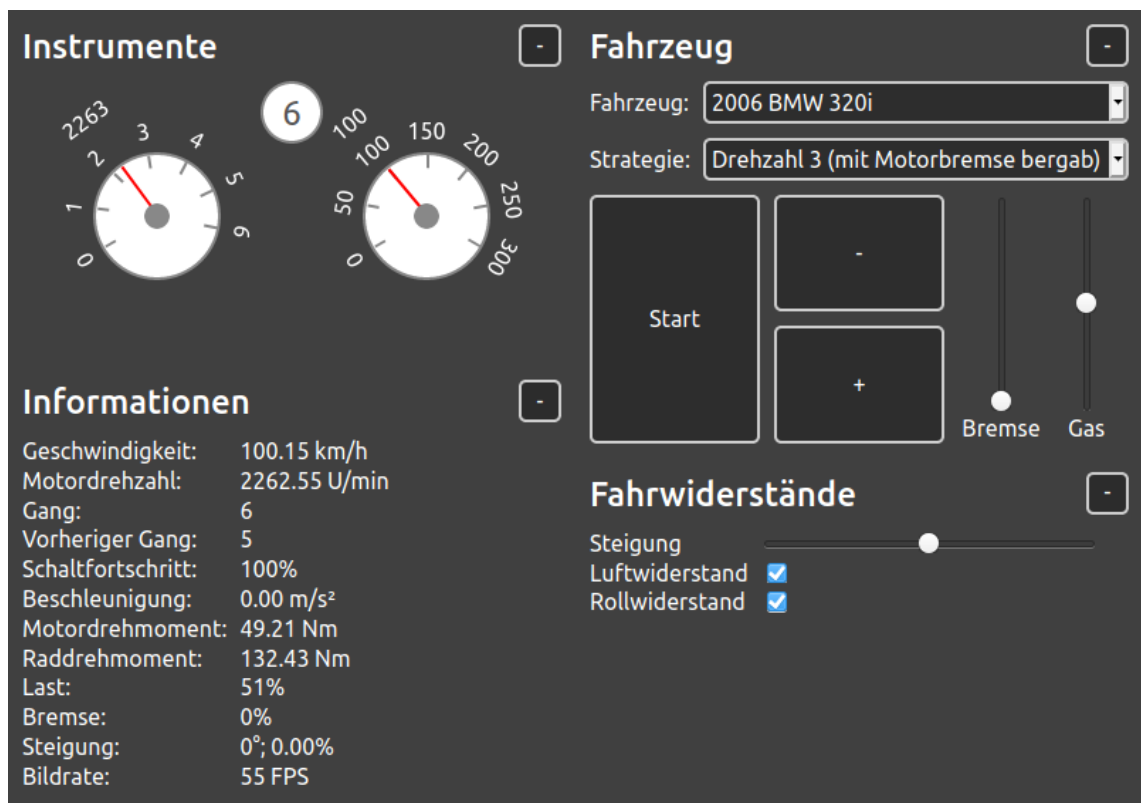
```

```

51     else if (car.data.gear > best_gear) {
52         temp_car.data.gear = car.data.gear - 1;
53         temp_car.data.rpm = calculator.rpm_from_speed(temp_car, temp_car.data.speed);
54
55         if (temp_car.data.rpm <= car.properties.rpm_limiter) {
56             car.shift_down();
57             gear_found = false;
58         }
59     }
60
61
62     //shift up or down to prevent the engine from exceeding its operating speeds
63     if (car.data.rpm >= car.properties.rpm_limiter - 1) {
64         car.shift_up();
65     }
66     else if (car.data.rpm < car.properties.idle_rpm) {
67         car.shift_down();
68     }
69 }
70 }
71 }

```

## 6.4 Benutzeroberfläche des Simulators



## 7. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und alle verwendeten Hilfsmittel angegeben worden sind.

\_\_\_\_\_ (Ort, Datum)      \_\_\_\_\_ (Unterschrift)