

Humboldt-Gymnasium Radeberg

Verfahren zur Ermittlung des Leistungs-Drehzahl-Diagramms eines motorisierten Fahrzeuges

eingereicht von: Moritz Vondran

Kurs 11/3

eingereicht am: 06.11.2019

Betreuer: Herr Zöllner

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung | 3 |
| 2 | Physikalische Grundlagen | 4 |
| 2.1 | Arbeit | 4 |
| 2.2 | Leistung | 5 |
| 2.3 | Reibungskräfte | 5 |
| 3 | Leistungsprüfstand | 6 |
| 3.1 | Funktionsweise | 6 |
| 3.2 | Prinzip einer Messung | 7 |
| 4 | Eigene Experimente | 8 |
| 4.1 | Beschleunigungsexperiment | 9 |
| 4.2 | Ausrollexperiment | 9 |
| 5 | Berechnung der Leistung | 9 |
| 5.1 | Physikalisches Modell | 9 |
| 5.2 | Mathematische Hilfsmittel | 11 |
| 6 | Schlussbemerkung | 13 |
| 7 | Abbildungen | 14 |
| 8 | Quellenverzeichnis | 19 |
| 8.1 | Internetquellen | 19 |
| 8.2 | Literaturquellen | 20 |
| 8.3 | Bilder | 20 |
| 9 | Selbstständigkeitserklärung | 21 |

1 Einleitung

„Für alle Tage, für viele Jahre.“

Simson Suhl [1]

„Keine Wartungssorgen, einfach in der Bedienung, sicher und stets einsatzbereit, keine Schwierigkeiten bei der Unterbringung, für Wochenendfahrten und im Berufsverkehr, ein Fahrzeug für jedermann.“

Simson Suhl [2]

Diese Zitate stammen von dem weltbekannten Unternehmen Simson aus Suhl, welches während des Bestehens der DDR mit insgesamt knapp sechs Millionen hergestellten Krafträdern als der größte Zweiradhersteller Deutschlands galt [3] und diesen Titel auch bis heute nicht abgegeben hat. „Star“, „S 51“ oder „Schwalbe“ sind wohl heutzutage jedem ein Begriff, da sich Simson durch ausgezeichnete Qualität und den hohen Absatz, verbunden mit der positiven Resonanz der Gesellschaft, einen Namen gemacht hat. Auch gegenwärtig sind Simson-Zweiräder noch auf den Straßen zu sehen und von vielen als Kultfahrzeug wertgeschätzt, wozu ich mich selbst auch zähle. Meine Zuneigung und mein Interesse an der Thematik der Simson-Motorentechnik veranlassen mich, dieses Thema in meiner Fach- und Belegarbeit aufzugreifen.

Ich bin bereits in meiner frühen Jugend mit dieser Thematik in Berührung gekommen und beschäftige mich bis heute mit der Optimierung und Anpassung von Simson-Motoren. Das Basteln an Motoren und Fahrzeugen stellt jedoch nicht nur für mich ein beliebtes Hobby dar. Unabhängig von der Altersgruppe wird in allen Teilen der Welt an kleinen bis hin zu großen Fahrzeugen geschraubt, gebastelt und optimiert. Häufig wird dabei auf eine Leistungssteigerung abgezielt, welche anschließend mit Hilfe einer Leistungsmessung belegt werden kann. Diese konkrete Messung umfasst ein Diagramm, welches die mechanische Leistung des Motors und das mechanische Drehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl graphisch dargestellt. Zur exakten Überprüfung der Leistung dienen moderne elektronische Prüfstände. Da diese sich allerdings in der Anschaffung in einem immensen finanziellen Umfang bewegen [4], ist der Besitz einer solchen Prüfanlage häufig nur größeren Firmen oder renommierten Werkstätten vorbehalten. Für den einfachen „Hobby-Schrauber“ stellt die Anschaffung eines solchen Prüfstandes eher eine

utopische Vorstellung dar und macht die Durchführung einer solchen Messung demzufolge entweder unmöglich oder verbindet diese mit hohen Kosten.

Das Hauptziel dieser Facharbeit liegt darin, den Leser auf eine Verfahren aufmerksam zu machen, welche zur Erstellung eines Leistungs-Drehzahl-Diagramms für motorisierte Fahrzeuge geeignet sein soll und theoretisch von jedem umsetzbar wäre. Dabei möchte ich mit Hilfe meines eigenen Simson-Mopeds ein Versuchsmodell aufstellen, welches diese Methode ergänzt.

Zur Erstellung dieses Verfahrens baut sich die Arbeit wie folgt auf: In Abschnitt 2 werden die physikalischen Grundlagen zu den Größen Arbeit, Leistung und den Reibungskräften ausgeführt. Der 3. Abschnitt widmet sich der Erklärung der Funktionsweise eines Leistungsprüfstandes und des dahinterstehenden Prinzips einer Leistungsmessung. Im Anschluss daran gelten die Abschnitte 4 und 5 der Erläuterung meiner eigenen Versuchsreihe sowie der Aufstellung von Formeln für die Berechnung des physikalischen Modells, den damit verbundenen mathematischen Überlegungen und natürlich der graphischen Darstellung meiner Ergebnisse.

An dieser Stelle richte ich meinen Dank an Herrn Zöllner für die engagierte Betreuung meiner Arbeit und die Unterstützung bei der Ausarbeitung des Modells. Außerdem gilt mein Dank Anna-Maria Röthig, die mir bei der praktischen Durchführung meines Versuchs zur Seite stand.

2 Physikalische Grundlagen

Um ein Grundverständnis für die folgenden Berechnungen zu bekommen, gilt es vorab, einige grundlegende physikalische Größen zu erläutern, um ein Nachvollzug der folgenden Rechnungen garantieren zu können. Dabei beschränke ich mich auf die nähere Erläuterung der Kenngrößen Arbeit, Leistung und der Reibungskräfte.

2.1 Arbeit

Verschiebt eine Kraft F einen Körper entlang eines Weges s , so verrichtet sie mechanische Arbeit W [5]. Es gilt [9]:

$$W = \int F ds$$

Gegeben sei beispielsweise ein Fahrzeug der Masse 1000 kg, welches von 0 auf 100 km/h beschleunigt wird. Die geleistete Arbeit lässt sich wie folgt berechnen [6]:

$$W = \Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 500 \cdot \left(\frac{100000}{3600} \right)^2 \text{ kJ} = 386 \text{ kJ}$$

2.2 Leistung

Bei den meisten praktischen Tätigkeiten kommt es jedoch häufig nicht nur darauf an, welcher Betrag an Arbeit verrichtet wird, sondern auch darauf, in welchem temporären Abschnitt, also in welcher Zeit, diese Arbeit ausgeführt wird [7]. Der Quotient aus verrichteter Arbeit W (oder der dafür aufgewendeter Energie ΔE) und der dazu benötigten Zeit Δt entspricht der Leistung P .

Es gilt

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt}$$

da wir im Beispiel von einer gleichmäßigen Beschleunigung und der Gültigkeit des Energieerhaltungssatzes der Mechanik ausgehen. Hinzu kommt also, dass unser Auto nun diese Beschleunigung in 10 s durchführt. Die Leistung berechnet sich wie folgt [6]:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{386 \text{ kJ}}{10 \text{ s}} = 38.6 \text{ kW}$$

2.3 Reibungskräfte

Bei einer praktischen Betrachtung wird ebenfalls schnell klar, dass Reibungskräfte einen wichtigen hemmenden Faktor für die Bewegung darstellen und damit in die Leistungsbilanz einbezogen werden müssen. Diese Reibungskräfte kennzeichnen die Widerstandskraft,

die der Antriebskraft entgegensteht, und werden in meinem mathematischen Modell wie folgt angesetzt:

$$F_R = c_W \cdot v^\gamma$$

Also gilt für die Reibungsarbeit:

$$W_R = \int F_R ds = c_W \cdot \int v^\gamma ds$$

Dabei kennzeichnet c_W jedoch keinesfalls direkt den Widerstandsbeiwert, abhängig von der Form des umströmten Körpers [10]. In meinem Modell dient dieser Parameter zwar sowohl als charakterisierendes Maß der Windschlüpfrigkeit des Körpers als auch als Normierungskonstante. Der Parameter γ deskribiert parallel dazu die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibungskräfte.

3 Leistungsprüfstand

3.1 Funktionsweise

Ein Fahrzeug jeglicher Art – wir betrachten vorteilhafterweise ein zweirädriges – wird auf eine Art Plattform geschoben. In die erwähnte Plattform sind im Bereich des Hinterrades zwei frei drehende Rollen eingelassen. Das Zweirad wird anschließend mit Gurten fest verzurrt und eine Blockade vor das Vorderrad gespannt, damit es sich im darauffolgenden Prüfdurchlauf nicht von der Stelle bewegen kann. Bevor der Durchlauf gestartet wird, muss zusätzlich ein Drehzahlabnehmer am Zündkabel oder direkt am Zündgeber angebracht werden. Nachfolgend ist das Hochfahren der Software erforderlich. Nach sorgfältiger und vollständiger Vorbereitung kann der Prüfdurchlauf beginnen, wobei das Fahrzeug zunächst gestartet, anschließend in den höchsten Gang geschaltet und nach kurzem Kalibrieren im letzten Gang über das komplette Drehzahlband hinweg ausgefahren wird. Im Falle einer erfolgreichen Messung erscheint auf einem angeschlossenen Bildschirm das errechnete Leistungsdiagramm.

3.2 Prinzip einer Messung

Die frei beweglichen Rollen dienen der Erfassung der am Hinterrad anliegenden Leistung, von welcher später über eine mathematische Rechnung auf die Motorleistung geschlossen werden kann. Beim Ausfahren des größten Ganges misst das System, wie stark die vom Hinterrad angetriebene Rolle beschleunigt wird. Dazu erfasst es, in welchem Zeitabschnitt die Rolle welche Geschwindigkeit aufbaut, was über die Geschwindigkeitsdifferenz der einzelnen Messungen und deren Zeitdifferenz bestimmt werden kann. Die Beschleunigung der Rolle a errechnet sich also wie folgt:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Die Beschleunigung repräsentiert allerdings nicht die Leistung. Eine zweite wichtige Kenngröße zur Berechnung ist das Massenträgheitsmoment J der Prüfstandsrolle. Im Prinzip drückt diese Entität das Ausmaß aus, in welchem sich ein starrer Körper wehrt, in Rotation versetzt oder aus einer solchen gebremst zu werden. Das Massenträgheitsmoment errechnet sich aus der gegebenen Masse m der Rolle und deren Radius r . Dabei gilt folgende Formel [11]:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$

Angenommen, eine 750 kg schwere Rolle besitzt einen Durchmesser von 50 cm, so ergibt sich dementsprechend das Massenträgheitsmoment:

$$J = \frac{1}{2} \cdot 750 \text{ kg} \cdot (0.25 \text{ m})^2 = 23.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Um nun auf die Leistung schließen zu können, betrachten wir zunächst die Rotationsenergie der Rolle [11]:

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

Demzufolge:

$$\begin{aligned} P &= \frac{\Delta E}{\Delta t} \\ &= \frac{J \cdot \omega^2}{2t} \\ P &= \frac{1}{2} \cdot J \cdot \alpha \cdot \omega \end{aligned}$$

da $\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$. Der Umstand, dass die Leistung eines Fahrzeugs jedoch meistens in PS angegeben wird, veranlasst uns, P in kW noch in die richtige Einheit umzuwandeln. Es gilt: 1 kW = 1.36 PS. Mit Hilfe dieser Formel lässt sich die Leistung am Hinterrad berechnen. Da dieser hingegen eine eher bescheidenere Bedeutung zugewiesen ist und die meisten Messungen die Leistung des Motors unmittelbar an der Kurbelwelle angeben sollen, erfordert es noch die Ermittlung der fahrzeugabhängigen Reibleistung durch den Prüfstand. Diese entsteht zwischen Kurbelwelle und dem Hinterrad, also zunächst an der Kupplung, am Getriebe und natürlich an Ritzel, Kette, Kettenrad und Reifen. Die Verlustleistung errechnet der Prüfstand selbstständig, sobald man das ausgekuppelte Fahrzeug nach Erreichen der Höchstdrehzahl eine festgelegte Zeit ausrollen lässt. Dieser Wert wird anschließend zur Hinterradleistung addiert, woraus sich die unmittelbare Leistung an der Kupplung ergibt. Um abschließend auf die Kurbelwellenleistung zu schließen, addiert man pauschal 2% der Hinterradleistung auf diese drauf.

4 Eigene Experimente

Zur Berechnung der Leistung erfordert es neben einem physikalischen Modell unter Verwendung von mathematischen Hilfsmitteln auch ein praktisches Experiment, welches zur Erfassung der notwendigen Daten dient. Die Möglichkeiten einer solchen Messung beschränken sich auf die Aufnahme der Geschwindigkeits- und Drehzahlwerte in Abhängigkeit der Zeit, woraus sich später die Beschleunigung ableiten lässt. Da es sich jedoch um kein reibungsfreies Experiment handelt, müssen zusätzliche Konstanten der Reibungskraft, in meinem Modell c_W und γ , beachtet und erfasst werden. Dazu wird ein weiteres Experiment durchgeführt, bei welchem die Ausrollzeit des Fahrzeugs in Abhängigkeit der Startgeschwindigkeit Auskunft über diese Konstanten gibt.

4.1 Beschleunigungsexperiment

Das Beschleunigungsexperiment erfolgte auf einer exakt waagerechten Fahrbahn, welche keinerlei Unebenheiten aufwies. Die Windgeschwindigkeit betrug dabei 0 m/s. Das eigentliche Experiment kennzeichnet sich in der Beschleunigung des Mopeds von einer Anfangsdrehzahl $n = 2000$ über den gesamten letzten Gang hinweg zur Höchstdrehzahl $n = 7100$. Die Gesamtmasse des Fahrzeugs betrug dabei $m = 223$ kg. Während des Beschleunigungsvorganges wurden die Geschwindigkeit und die dazu anliegende Drehzahl des Motors in Abhängigkeit der Zeit erfasst. Daraus ergab sich das $v(t)$ -Diagramm: *Abbildung 1*.

4.2 Ausrollexperiment

Bei dem Ausrollexperiment galten die gleichen Bedingungen. Dabei wurde das Moped auf eine gewisse Anfangsgeschwindigkeit v_0 beschleunigt und anschließend im Leerlauf vollständig ausgerollt. Gleichzeitig wurde die dafür benötigte Ausrollzeit t_A erfasst. Daraus ergab sich das $t_A(v_0)$ -Diagramm: *Abbildung 2*.

5 Berechnung der Leistung

In Anlehnung an die im Experiment erfassten Daten sollen nun anhand mathematischer Hilfsmittel das physikalische Modell in die Realität übertragen und die Ergebnisse mittels Diagrammen präsentiert werden. Dazu bietet es sich an, zunächst auf die allgemeine Form eines Leistungsdiagramms einzugehen. In einem solchen wird die Motorleistung des Fahrzeuges in kW oder PS auf der Ordinatenachse in Abhängigkeit der Drehzahl auf der Abszissenachse dargesellt: *Abbildung 3*.

5.1 Physikalisches Modell

Die Herleitung der folgenden Formeln erfolgte unter Betreuung von Herrn Zöllner.

Wie bereits festgestellt, leistet das Moped zunächst Reibungsarbeit:

$$W_R = \int F_R ds = c_W \cdot \int v^\gamma ds$$

Die daraus resultierende Energiebilanz sieht also wie folgt aus:

$$\begin{aligned} E &= E_{\text{kin}} + W_R \\ &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + c_W \cdot \int v^\gamma ds \end{aligned}$$

Die Leistung berechnet sich aus:

$$\begin{aligned} P &= \frac{dE}{dt} \\ &= m \cdot v \cdot a + c_W \frac{d}{dt} \int v^\gamma ds \\ &= m \cdot v \cdot a + c_W \frac{d}{dt} \int v^\gamma \frac{ds}{dt} dt \\ &= m \cdot v \cdot a + c_W \frac{d}{dt} \int v^\gamma v dt \\ P &= m \cdot v \cdot a + c_W v^{\gamma+1} \end{aligned}$$

Des Weiteren gilt $F = -F_R$ und damit:

$$\begin{aligned} m \cdot a &= -c_W v^\gamma \\ v^{-\gamma} dv &= -\frac{c_W}{m} dt \\ \frac{v^{1-\gamma}}{1-\gamma} &= -\frac{c_W}{m} t + c_0 \end{aligned}$$

Die Konstante folgt aus der Bedingung, dass $v(t=0) = v_0$, so gilt:

$$\begin{aligned} \frac{v_0^{1-\gamma}}{1-\gamma} &= c_0 \\ \frac{v^{1-\gamma}}{1-\gamma} &= -\frac{c_W}{m} t + \frac{v_0^{1-\gamma}}{1-\gamma} \\ v^{1-\gamma} &= -\frac{c_W}{m} (1-\gamma) t + v_0^{1-\gamma} \end{aligned}$$

$$v = \left(v_0^{1-\gamma} - \frac{c_W}{m}(1-\gamma)t \right)^{\frac{1}{1-\gamma}}$$

Die Formel für die Geschwindigkeit während des Ausrollens lautet demnach:

$$v = \left(\frac{c_W}{m}(\gamma-1)t + v_0^{1-\gamma} \right)^{\frac{1}{1-\gamma}}$$

falls $\gamma \neq 1$.

Die Ausrollzeit ergibt sich durch:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{c_W}{m}(\gamma-1)t_A + v_0^{1-\gamma} \\ (1-\gamma)\frac{c_W}{m}t_A &= v_0^{1-\gamma} \end{aligned}$$

Womit abschließend die Formel für das Ausrollexperiment, also t_A , hergeleitet wurde:

$$t_A = \frac{m}{c_W(1-\gamma)}v_0^{1-\gamma}$$

5.2 Mathematische Hilfsmittel

Zur Auswertung der Daten empfand ich es zunächst naheliegend, eine statistische Betrachtung durchzuführen. Da die Theorie, wie bereits in Abschnitt 5.1 erwähnt, zeigt, dass die Form der Ausrollgleichung eine Potenzfunktion ist, zielte ich speziell auf das Analyseverfahren der Regression ab, um die statistische Abweichung systematisch herauszumitteln. Nach anfänglichen Versuchen, die Testergebnisse des Beschleunigungsexperimentes ebenfalls durch Regression auszuwerten und dadurch einen realistischen Kurvenverlauf zu erlangen, wurde schnell klar, dass dies nicht die erwünschten Ergebnisse lieferte.

Um genaue Verläufe darstellen zu können, eignet sich das Interpolationsverfahren, wobei die Polynominterpolation jedoch für meine Messwerte ungeeignet ist, da bei diesem Verfahren bereits „bei einem Polynom 8. Grades, also einer Interpolationsfunktion für 9 vorgegebene Wertepaare, starke Oszillationen im Funktionsverlauf auftreten können“ [12]. Ein Beispiel für das Versagen einer Polynominterpolation für meine Anforderungen findet sich in *Abbildung 4*.

Anstelle Polynome höheren Grades bewährt sich die Spline-Interpolation, da sich diese durch glatte Kurvenverläufe auszeichnet. „Mit der Verfahrensweise der Spline-Interpolation versucht man, gegebene Stützstellen der Funktion, auch Knoten genannt, mit Hilfe stückweiser Polynome niedrigen Grades zu interpolieren“ [8], also für diese Daten eine differenzierbare Funktion zu finden. Man legt also zwischen zwei benachbarte Punkte jeweils eine Funktion dritten Grades der Gestalt $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$. Mit der Forderung des exakten Verlaufes der Funktion durch diese beiden Punkte fixiert man zwei der vier Unbekannten. Die verbleibenden dienen der Glättung der Funktion, da die zusätzliche Forderung dieser Methode darin besteht, dass auch die erste und zweite Ableitung der benachbarten Funktionen an der Grenze, also den jeweiligen Messpunkten, exakt übereinstimmen. Die Spline-Interpolation liefert insgesamt einen glatten und somit brauchbaren Kurvenverlauf, welcher im konkreten Fall aus 61 Einzelfunktionen besteht. Damit ergeben sich die Diagramme $v(t)$: *Abbildung 5*, $a(t)$: *Abbildung 6* und $n(t)$: *Abbildung 7*.

Mit Hilfe der hergeleiteten Formel zur Berechnung der Leistung

$$P = m \cdot v \cdot a + c_W v^{\gamma+1}$$

kann nun, wie in Leistungsdiagrammen üblich, ein $P(n)$ -Diagramm erstellt werden: *Abbildung 8*.

Da dieses trotzdem noch Schwankungen aufweist, kam ich abschließend zu der Überlegung, ein Polynom durch die jeweiligen lokalen Extrempunkte zu legen: *Abbildung 9*.

Dabei handelt es sich natürlich lediglich um eine Idealkurve, welche zwar nicht die exakten Werte wiedergibt, dafür jedoch einen glatten, brauchbaren Verlauf liefert: *Abbildung 10*.

6 Schlussbemerkung

Mit dem finalen Ergebnis eines brauchbaren Kurvenverlaufes schließt sich diese Arbeit mit der Bestätigung, dass sich das von mir vorgestellte Verfahren als technisch realisierbar herausgestellt hat.

Natürlich bin ich mir bewusst, dass es sich dabei lediglich um eine Idealkurve handelt, welche die genaue Leistung des Fahrzeuges noch nicht exakt repräsentiert. Die unerwartet deutlichen Schwankungen des Verlaufes haben ihren Ursprung in der ungenauen Bestimmung von c_W und γ , womit sich das Ausrollexperiment als Hauptfehler meines Verfahrens abzeichnet. Allerdings bin ich davon überzeugt, diesen Fehler durch das zeitabhängige Dokumentieren der Geschwindigkeitsverminderung des Fahrzeuges im Endeffekt deutlich eingrenzen zu können. Dazu verweise ich auf die bereits aufgestellte Formel

$$v = \left(\frac{c_W}{m}(\gamma - 1)t + v_0^{1-\gamma} \right)^{\frac{1}{1-\gamma}}$$

mit deren Hilfe eine Umsetzung dieser Idee möglich wäre. Jenes Vorhaben wäre demzufolge ein weiterer Schritt hin zur Perfektion des Verfahrens, welches somit an die qualitative Hochwertigkeit von Simson anknüpfen würde.

7 Abbildungen

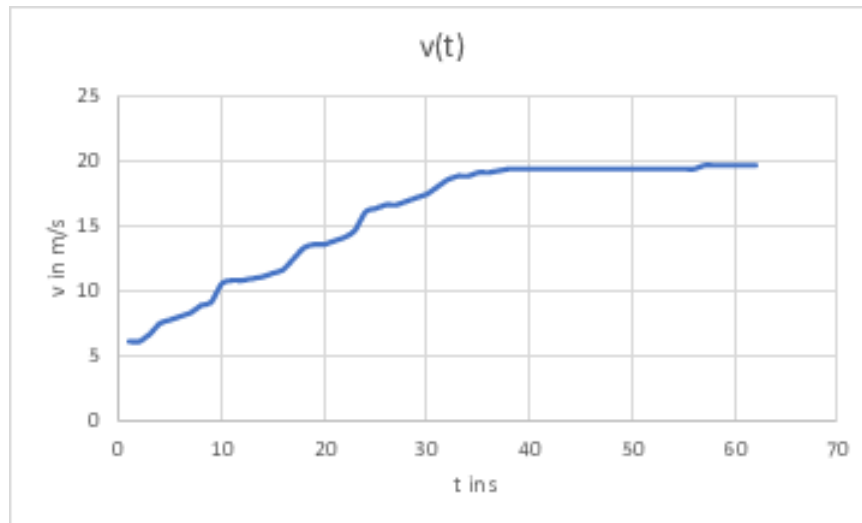


Abbildung 1: Messwerte der Geschwindigkeit v in Abhängigkeit der Fahrzeit t als Ergebnis meines Beschleunigungsexperiments (61 Messwertpaare).

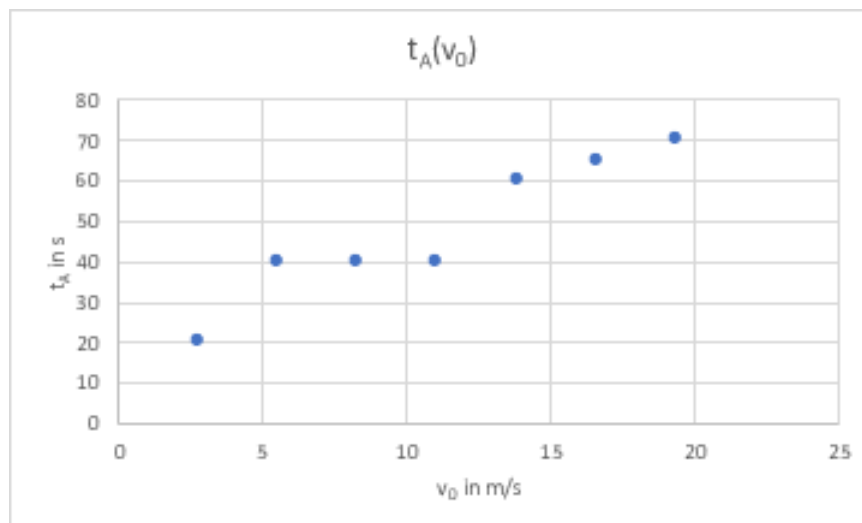


Abbildung 2: Messwerte der Ausrollzeit t_A in Abhängigkeit der Startgeschwindigkeit v_0 als Ergebnis meines Ausrollexperiments mit einer Masse $m = 223$ kg, woraus durch Regression $c_W = 47.9 \text{ N} \cdot \frac{\text{s}^\gamma}{\text{m}^\gamma}$ und $\gamma = 0.4$ gewonnen wurden.

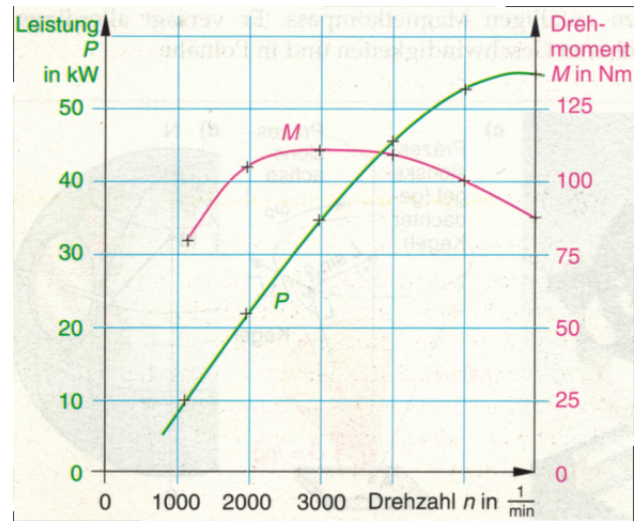


Abbildung 3: Typisches Leistungs-Drehzahl-Diagramm eines PKWs mit Leistungskurve (grün) und zusätzlicher Drehmomentkurve (rosa); üblicherweise zeigen beide Kurven ein Maximum bei unterschiedlicher Drehzahl [13].

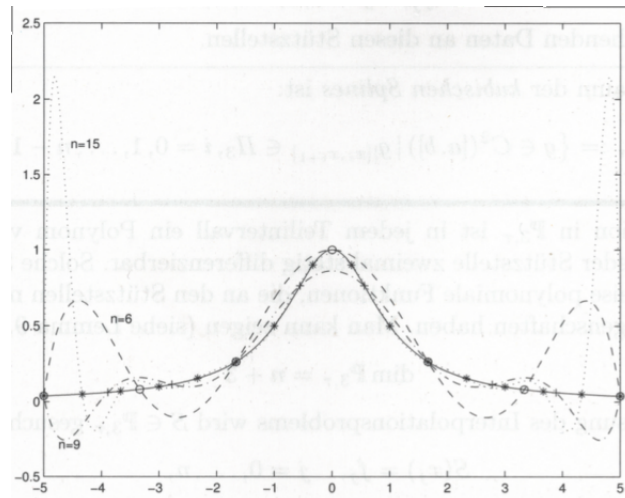


Abbildung 4: Beispiel für das Versagen einer Polynominterpolation an der Funktion $f(x) = \frac{1}{1+x^2}$ (schwarze durchgezogene Kurve); zu sehen sind die Interpolationspolynome 5. Grades (gestrichelte Kurve), 8. Grades (gestrichelt-gepunktete Kurve) und 14. Grades (gepunktete Kurve) mit starken Oszillationen an den Intervallenden bei steigendem Polynomgrad [14].

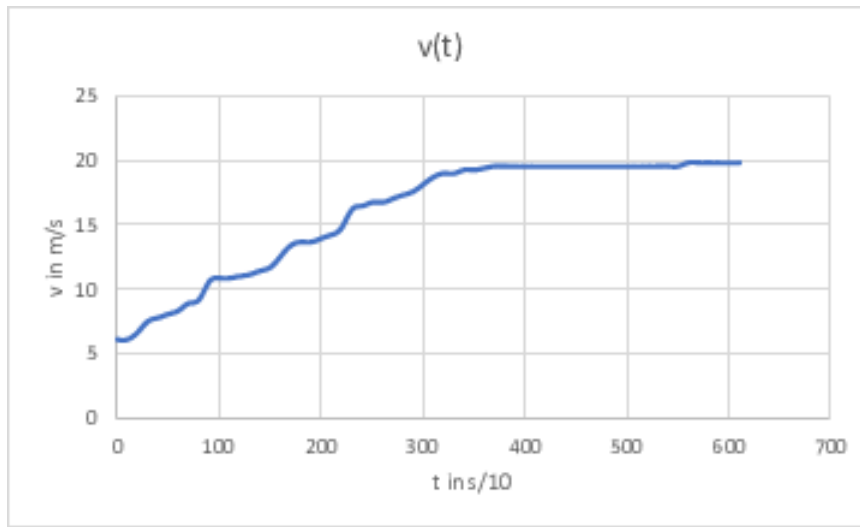


Abbildung 5: Messwerte der Geschwindigkeit v in Abhängigkeit der Fahrzeit t als Ergebnis meines Beschleunigungsexperiments nach der Spline-Interpolation; die exakte Nachbildung des Kurvenverlaufes aus *Abbildung 1* verdeutlicht die hohe Approximationsgüte der Spline-Interpolation.

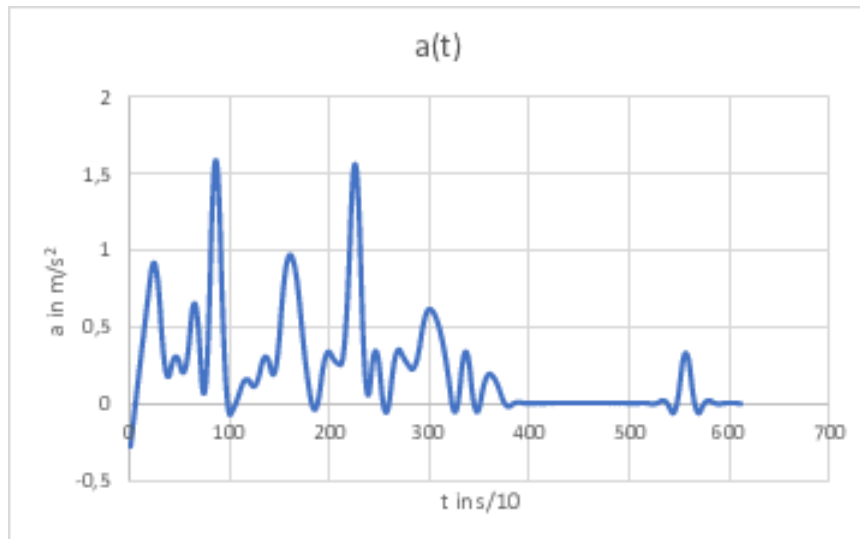


Abbildung 6: Aus den interpolierten Messwerten (*Abbildung 5*) durch Differenziation errechnete Beschleunigung a in Abhängigkeit der Fahrzeit t .

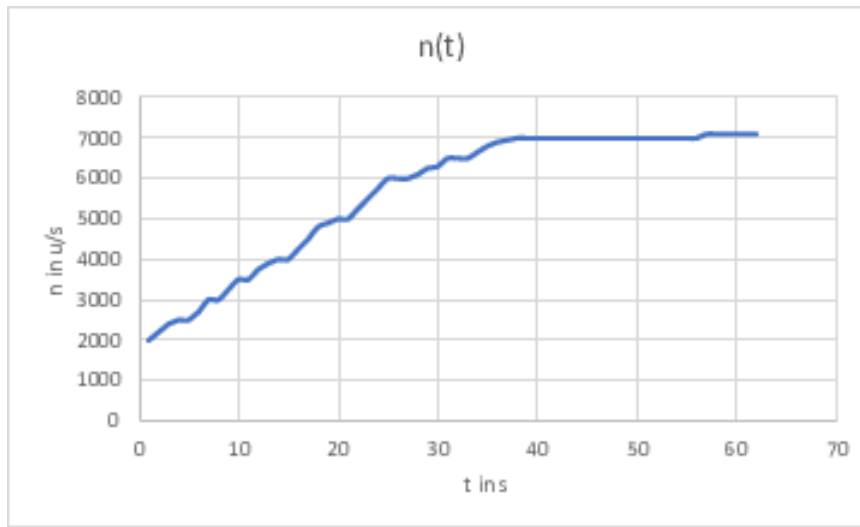


Abbildung 7: Messwerte der Drehzahl n in Abhängigkeit der Fahrzeit t als Ergebnis meines Beschleunigungsexperiments nach der Spline-Interpolation.

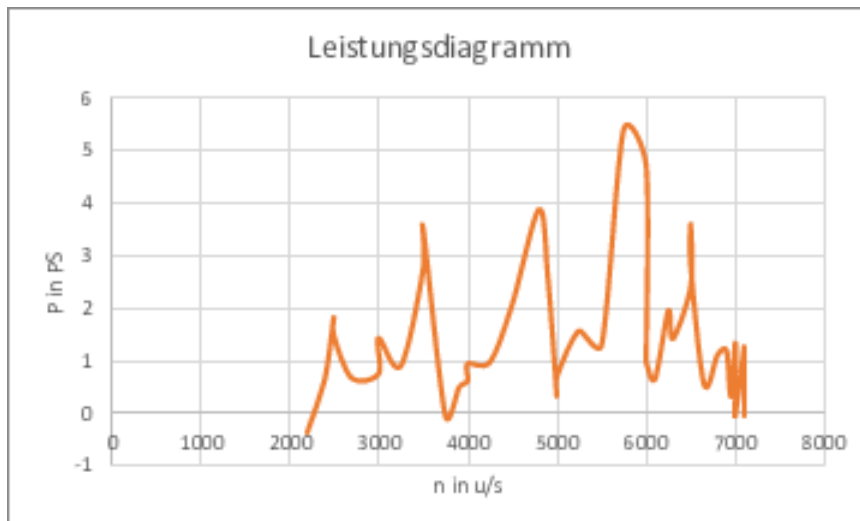


Abbildung 8: Unter Zuhilfenahme der aufgestellten Formel zur Berechnung der endgültigen Leistung mit den angegebenen Parameter (siehe *Abbildung 2*) erstelltes, reales Leistungs-Drehzahl-Diagramm mit Leistung P in PS in Abhängigkeit der Drehzahl n ; die Aufzeichnung des Drehmoments hätte den Rahmen der Fach- und Belegarbeit gesprengt.

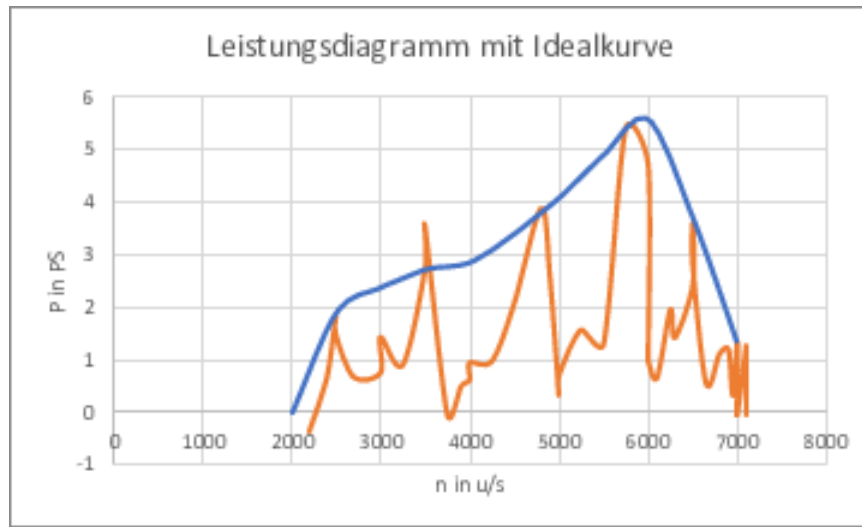


Abbildung 9: Um die starken Schwankungen der Realkurve (Abbildung 8) zu kompensieren, ergab sich eine Idealkurve mit Hilfe einer Polynomregression 4. Grades durch sieben signifikante Maxima der Realkurve.

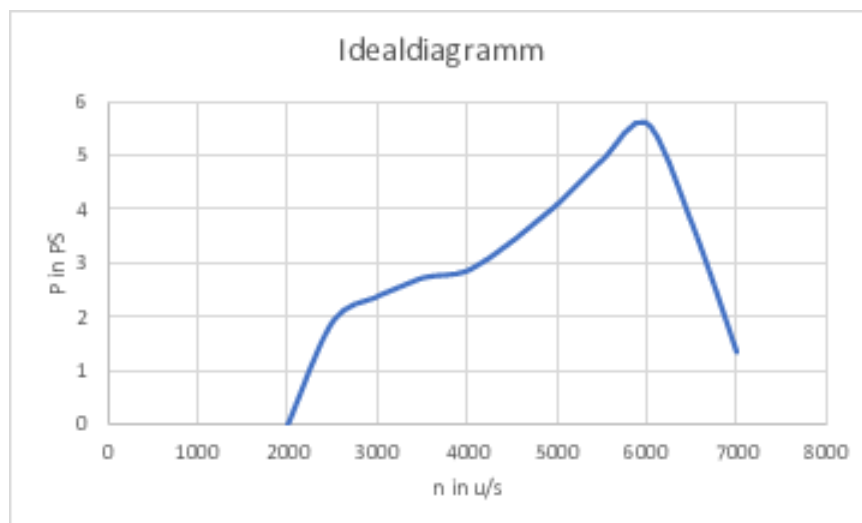


Abbildung 10: Finalisierte Idealkurve im Leistungs-Drehzahl-Diagramm mit Leistung P in PS in Abhängigkeit der Drehzahl n ; die Ähnlichkeit zu *Abbildung 3* erachte ich als ausschlaggebenden Beweis der Integrität meines Verfahrens.

8 Quellenverzeichnis

8.1 Internetquellen

- [1] <https://www.youtube.com/watch?v=5e707wVAiEY>
(Stand: 23.10.2019)
- [2] <http://www.simson-roller.de/sprueche.html>
(Stand: 23.10.2019)
- [3] [https://de.wikipedia.org/wiki/Simson_\(Unternehmen\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Simson_(Unternehmen))
(Stand: 05.11.2019)
- [4] <https://wulf-kfz.de/Produkte/Bremsentechnik/Bremsenpruefstand/>
(Stand: 05.11.2019)
- [5] <https://pawm.physik.uni-wuerzburg.de/videos/Vorlesung1/Kapitel3/energ.htm>
(Stand: 05.11.2019)
- [6] https://www.physik.uni-muenchen.de/lehre/vorlesungen/wise_08_09/EP/uebungen_loesungen/loesung10.pdf
(Stand: 23.10.2019)
- [7] <https://www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/grundwissen/leistung>
(Stand: 23.10.2019)
- [8] <https://de.wikipedia.org/wiki/Spline-Interpolation>
(Stand: 23.10.2019)

8.2 Literaturquellen

- [9] *Meyer, Lothar; Schmidt, Gerd-Dietrich (Hrsg.):* Physik Gymnasiale Oberstufe. DUDEN·PAETEC Schulbuchverlag, 1. Auflage.
- [10] *Kuchling, Horst:* Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag Leipzig, 18. Auflage.
- [11] *DUDEN-PAETEC:* Formelsammlung. DUDEN-PAETEC Schulbuchverlag, 2. Auflage.
- [12] *Bärwolff, Günter:* Höhere Mathematik für Naturwissenschaftler und Ingenieure. Spektrum Verlag, 2. Auflage.

8.3 Bilder

- [13] *Grehn, Joachim; Krause, Joachim (Hrsg.):* Physik. Metzler Verlag, 3. Auflage.
- [14] *Dahmen, Wolfgang; Reusken, Arnold:* Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer Verlag, 2., korrigierte Auflage.

9 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Fach- und Belegarbeit zum Thema

Verfahren zur Ermittlung des Leistungs-Drehzahl-Diagramms eines motorisierten
Fahrzeuges

unter Betreuung von

Herrn Zöllner

selbständig erarbeitet, verfasst und Zitate als solche kenntlich gemacht habe. Andere als die angegebenen Hilfsmittel wurden von mir nicht verwendet.

Lomnitz, den 06.11.2019

Moritz Vondran