



E-Dumper Projekt

Dokumentation Arbeitspaket C1: Energieflussmodellierung

Autoren: Christian Follin / Andreas Meier

Datum: April 2017

Version: 4.0

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
Abkürzungsverzeichnis	iv
Verantwortliche Personen	v
Versionskontrolle	v
1 Einleitung	1
1.1 Detailziele des Arbeitspakets C1: Energieflussmodellierung	1
1.2 Informationen zum Fahrzeug (Komatsu HD605)	2
2 Messkonzept	3
2.1 Messstellen und Sensoren	4
3 Messungen	5
3.1 Testmessung vom 22. Dezember 2016	5
3.2 Haupt-Messungen vom 31.01.2017 bis 01.02.2017	5
3.3 GPS Empfang und abgefahrene Route	6
4 Auswertung	7
4.1 Antrieb	8
4.2 Energiespeicher	15
5 Verhalten des Brems- und ABS-System	28
5.1 Verhalten bei einem Anfahrvorgang	28
5.2 Verhalten bei einer Vollbremsung auf festem Untergrund (leer)	29
5.3 Verhalten bei einer Vollbremsung auf nass-/schlammigem Untergrund (leer)	30
6 Schlussfolgerungen	31
Anhang	32
Auftrag	32
Positions-Marker Definitionen	33
Orientierung des Fahrzeugs im dreidimensionalen Raum	38

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem. ABS wirkt beim Bremsen einem möglichen Blockieren der Räder durch Verminderung des Bremsdrucks entgegen.
GPS	Global Positioning System (deutsch Globales Positionsbestimmungssystem), ist ein globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung.
NMEA 0183	NMEA 0183 ist ein Standard, welcher für die Kommunikation zwischen GPS-Empfänger und PCs sowie mobilen Endgeräten genutzt wird.
SPS	Standard Positioning Service

Verantwortliche Personen

Verantwortlicher: Professor Peter Affolter
Berner Fachhochschule
Route Principale 127
CH-2537 Vauffelin

Tel. +41 (0)32 321 66 49
E-Mail: peter.affolter@bfh.ch

Messingenieur: Andreas Simon Meier
Berner Fachhochschule
Route Principale 127
CH-2537 Vauffelin

Tel. +41 (0) 32 321 66 60
E-Mail: andreas.meier@bfh.ch

Messingenieur: Christian Follin
Berner Fachhochschule
Route Principale 127
CH-2537 Vauffelin

E-Mail: christian.follin@bfh.ch

Versionskontrolle

Version	Datum	Beschreibung	Autor / Kürzel
1.0	22.02.2017	Erste Version	Andreas Meier / mia4
2.0	28.02.2017	Zweite Version	Christian Follin / flc1
3.0	29.02.2017	Dritte Version	Christian Follin / flc1
4.0	03.04.2017	Vierte Version	Christian Follin / flc1

1 Einleitung

Ziel des Arbeitspakets C1 ist die Definition der relevanten Kenngrößen und die Ermittlung der Lastprofile (Drehmoment, Leistung sowie Drehzahl über der Zeit) während dem Betrieb des Komatsu HD605. Das Kernstück bildet dabei die Drehmomentmessung, welche direkt auf der Kardanwelle angebracht wurde (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Kardanwelle vor dem Anbringen der Drehmomentmessung (links) und während der Kalibrierung

1.1 Detailziele des Arbeitspakets C1: Energieflussmodellierung

In diesem Kapitel sind die detaillierten Ziele der Messungen definiert. Die Priorität nimmt mit ansteigender Zahl ab.

- (1) Dynamische Messung der Drehzahl (n), des Drehmoments (M) und der Leistung (P) an der Kardanwelle. Im Abbau und beim Abfahren der Förderrouen.
- (2) Die Position sowie die Geschwindigkeit des Fahrzeugs mittels GPS-Empfänger (SPS-Mode) ermitteln und zeitlich darstellen.
- (3) Aus den Leistungs- und Geschwindigkeitsdaten den Energiebedarf für eine Route (füllen – fahren – entladen und zurück fahren) berechnen.
- (4) Erstellen eines Lastkollektives aus den Drehzahl- und Drehmoment-Daten für eine Route (füllen – fahren – entladen und zurück fahren).
- (5) Aufzeichnung des ABS-Druckes zwecks Beschreibung der Funktionsweise des Fahrzeugs-ABS in verschiedenen Bremssituationen (z.B. Vollbremsung).

1.2 Informationen zum Fahrzeug (Komatsu HD605)

Alle Messungen wurden auf dem Komatsu HD605 durchgeführt. Während allen Messungen waren Schneeketten auf den Hinterrädern montiert. Die wichtigsten Informationen über das Fahrzeug sind der **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** zu entnehmen:

Motorleistung	533 kW	Mit 2000 rpm
Retarder absorbing capacity	785 kW	Continuous descent
Maximale Geschwindigkeit	70 km/h	
Reifen	24.00 R35	
Getriebe	automatische 7 Gänge	
Differentialverhältnis	3.538	
Planetenverhältnis	4.737	
Leergewicht	46'200 kg	
Maximalgewicht	110'180 kg	
Sicherheitsausrüstung	ABS, ASR	Optional
Batterien 24V Netz	2 x 12V/200Ah	

Tabelle 1: Komatsu HD605 Fahrzeuginformationen



Abb. 2: Komatsu HD605-7 unterhalb der Entladestation / Steinbrecher mit angehobener Mulde (links), sowie die auf den Hinterrädern montierten Schneeketten.

2 Messkonzept

Diese Kapitel beschreibt das grundlegende Messkonzept inkl. den einzelnen Messstellen und den zugehörigen Sensoren.

Abb. 3 gibt einen groben Überblick über das verwendete Messsystem. Das Grundgerüst bilden dabei die beiden wichtigsten Sensorstellen *Drehmoment* und *Drehzahl* an der Kardanwelle. Daneben werden fünf weitere Signale von fahrzeugeigenen Sensoren aufgezeichnet, namentlich der *Nickwinkel* des Fahrzeuges, die *Drehzahlen der Räder* hinten links und rechts sowie zwei *Drucksensoren* des ABS Systems der beiden Hinterräder. Allen Daten werden mittels dem LM7000 Datenlogger von Delphin aufgezeichnet und können mittels des angehängten GPS-Empfängers einer Position zugewiesen werden.

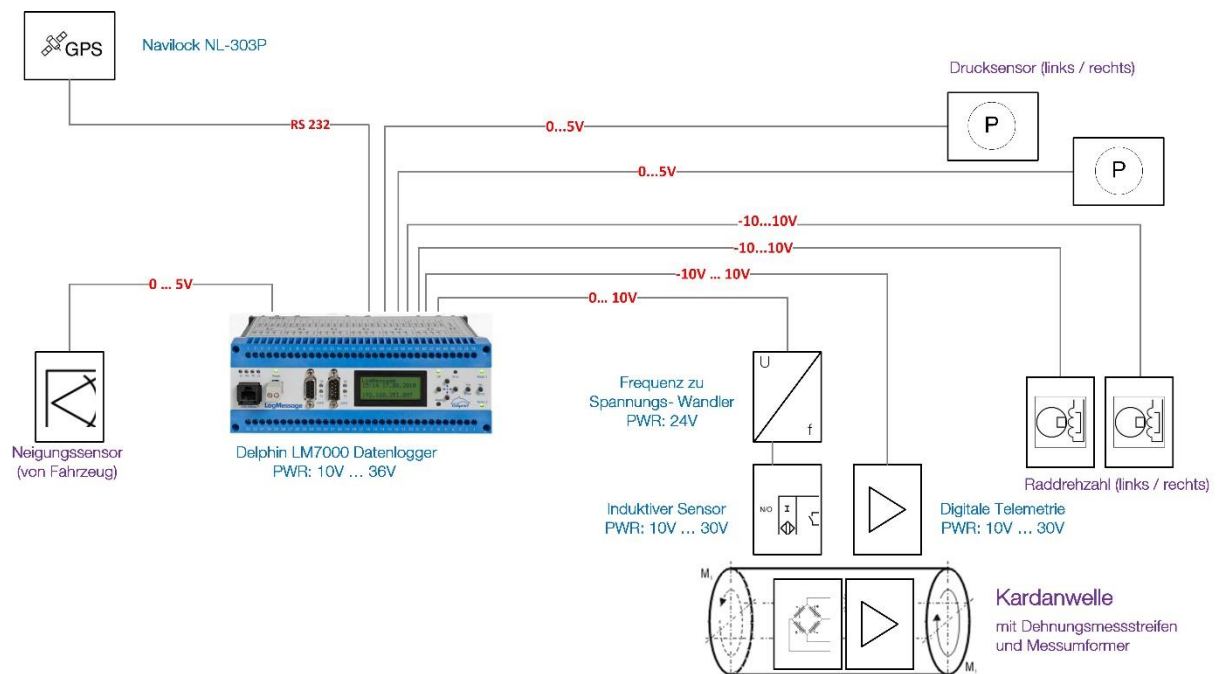


Abb. 3: Grobübersicht über alle Messstellen inkl. den Pegeln der Spannungsversorgung

2.1 Messstellen und Sensoren

Insgesamt wurden neun Messstellen genutzt. Nachfolgende Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die einzelnen Messstellen, die Abtastraten, den Messbereich sowie deren Messgenauigkeit.

Nummer	Messstelle	Signalpegel / Messfrequenz	Kanal auf dem Datenlogger	Messbereich Sensor	Messgenauigkeit
1	Drehmoment	± 10 V / 200 Hz	CH 01 / CH 16	-33...33 kNm	± 13 Nm
2	Drehzahl Kardanwelle	0...10 V / 100 Hz	CH 02	0...6'000 / min	± 90 / min
3	Drehzahl Hinterrad links	± 5 V / 100 Hz	CH 03	0...1 km/h	-
4	Drehzahl Hinterrad rechts	± 5 V / 100 Hz	CH 04	0...1 km/h	-
5	Nickwinkel	0...5V / 100 Hz	CH 05	$\pm 15^\circ$	$\pm 2,6^\circ$
6	ABS Druck Hinterrad links	0...5V / 100 Hz	CH 06	0...510 kg/cm ²	-
7	ABS Druck Hinterrad rechts	0...5V / 100 Hz	CH 07	0...510 kg/cm ²	-
8	Beschleunigung	0...5V / 100 Hz	CH 08	± 1.7 g	± 0.02 g
9	GPS NMEA Daten	RS232 / 1 Hz	COM 1	weltweit	± 10 m

Tabelle 2: Zusammenfassung aller Messstellen

3 Messungen

Alle Messungen fanden im Steinbruch Tascharner der Firma Vigier Holding AG nahe Péry statt.

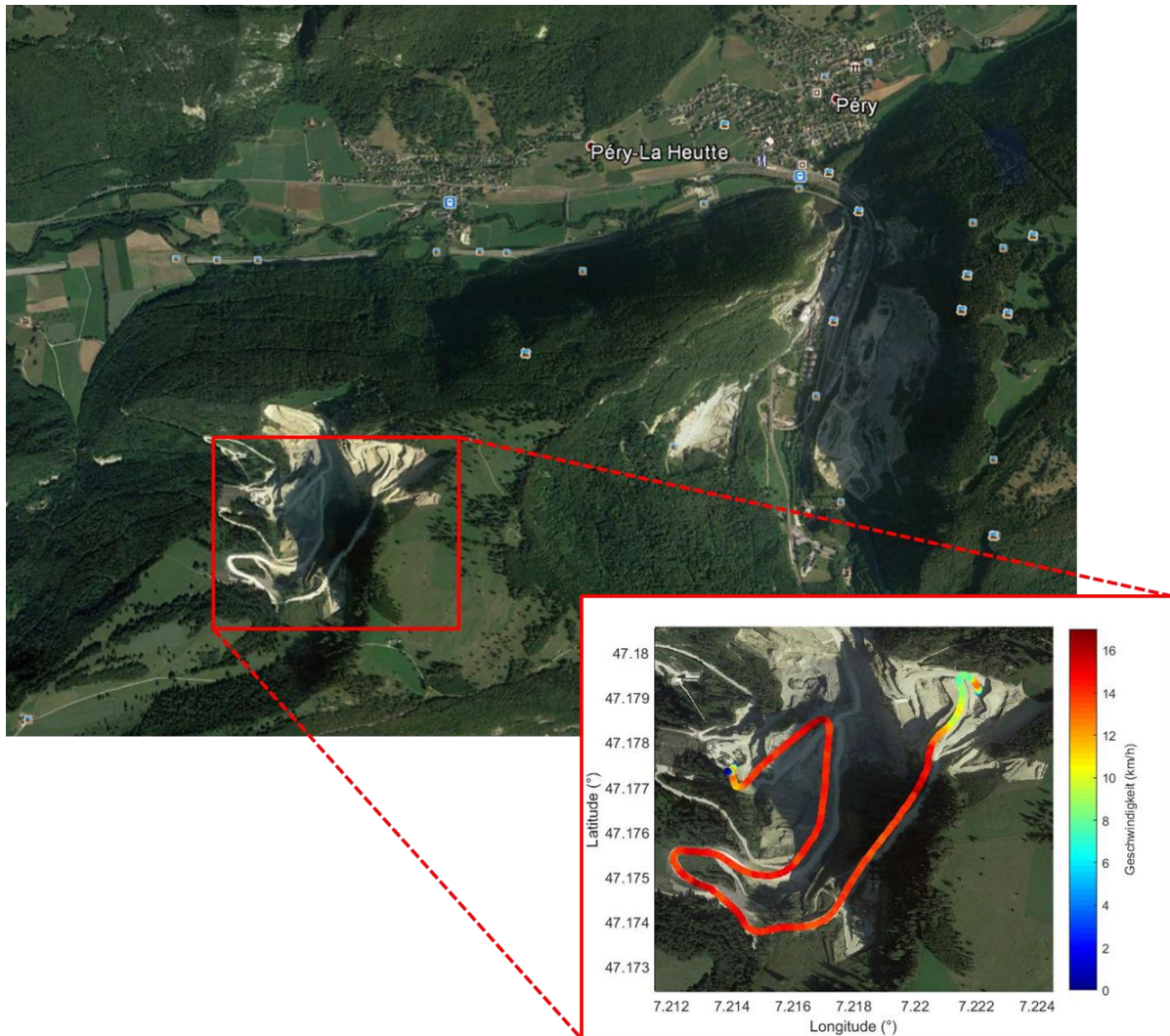


Abb. 4: Position des Steinbruchs und hineingezoomter Google Earth Kartenausschnitt überlagert mit Messdaten

3.1 Testmessung vom 22. Dezember 2016

Erste Test-Messung mit reduzierter Sensorik.

Datum / Uhrzeit: 22.12.2016 / 12h30 bis 13h30
 Ort: Raum Péry, Vigier Beton AG
 Messobjekt: Komatsu HD605, ohne Zuladung
 Wetter: blauer Himmel, gefrorene Strasse, Temperatur -5°C

3.2 Haupt-Messungen vom 31.01.2017 bis 01.02.2017

Hauptmessungen mit vollständig ausgerüstetem Fahrzeug.

Datum / Uhrzeit: 31.01.2017 bis 01.02.2017
 Ort: Raum Péry, Vigier Beton AG
 Messobjekt: Komatsu HD605, mit und ohne Zuladung
 Wetter: bewölkt/regen, nass-sumpfigen / teilweise vereiste Strasse, Temperatur 12°C

3.3 GPS Empfang und abgefahrene Route

Die Anzahl der Satelliten ist für die exakte Positions- und Uhrzeitbestimmung unerlässlich. Abb. 5 zeigt die Anzahl der vom Datenlogger System genutzten Satelliten in Abhängigkeit zur abgefahrenen Route. Idealerweise werden für die Positionsbestimmung 7 oder mehr Satelliten genutzt. Weniger Satelliten bedeuten eine Verschlechterung der Positionsmessung wobei mindestens 4 Satelliten benötigt werden.

Die Route führte von **Punkt A** im unteren Teil des Steinbruchs über eine unbefestigte Strasse zum **Punkt F**, dem oberen Teil. Aufgrund der geringeren Horizont Verschattung steigt die Anzahl der nutzbaren Satelliten im oberen Bereich an.

Für weitere Informationen zu den Positions-Definitionen, siehe auch Kapitel <Positions-Marker Definitionen> im Anhang.

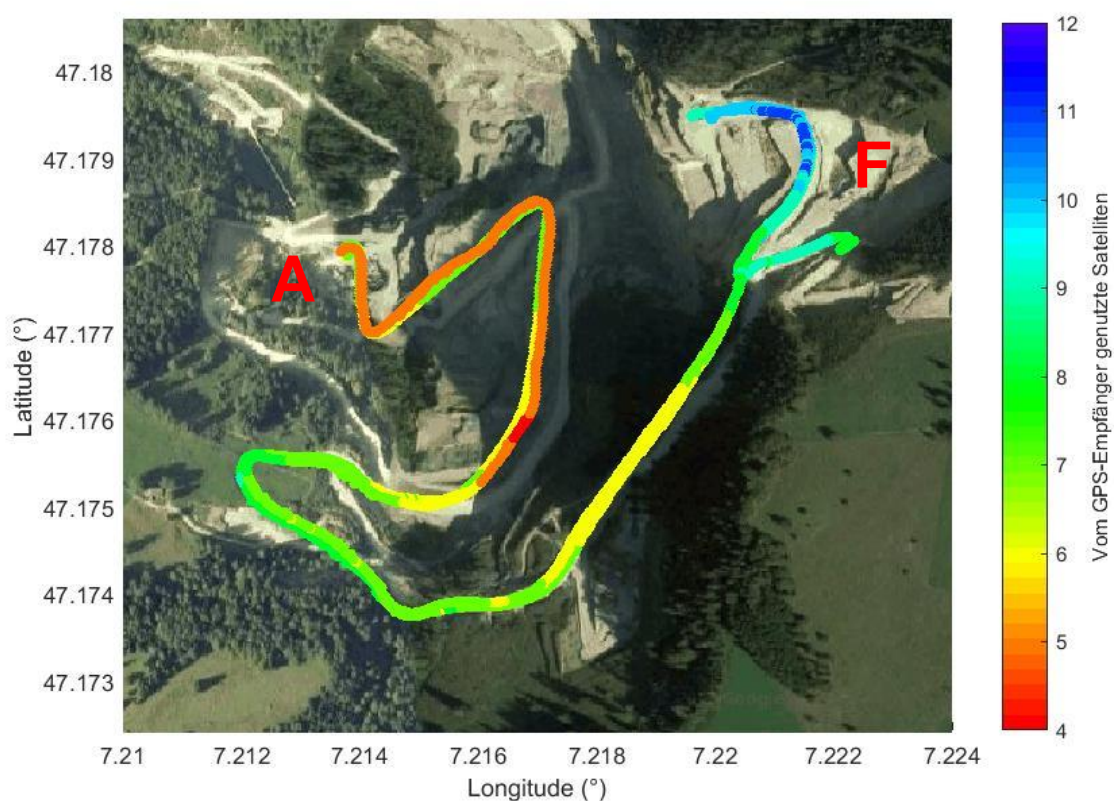
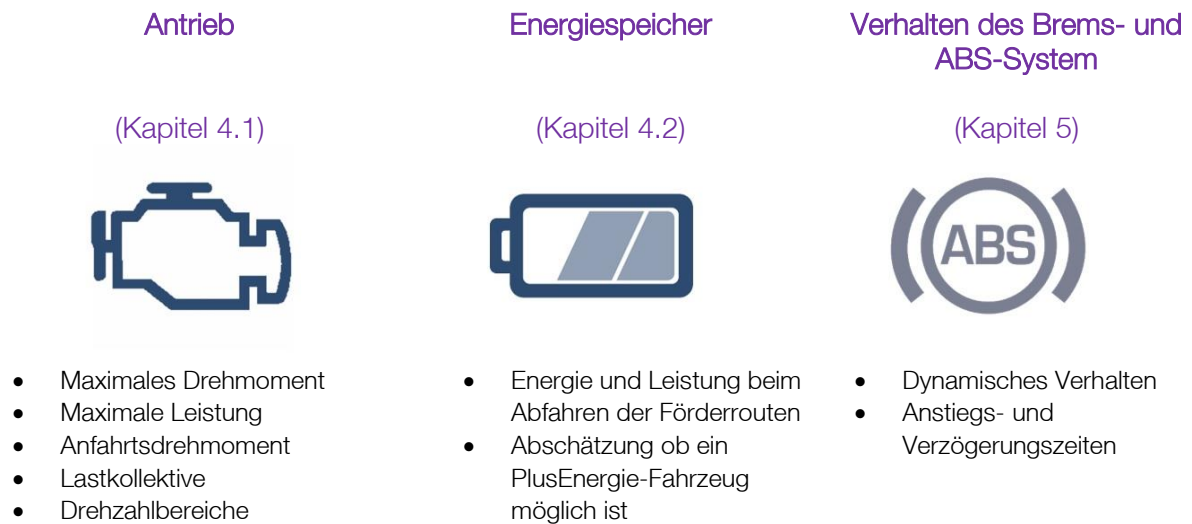


Abb. 5: Google Earth Plot mit der Anzahl vom Datenlogger genutzten Satelliten

4 Auswertung

Die Datenauswertung ist in folgenden 3 Bereiche gegliedert:



Wichtige Anmerkung:

Falls nicht anders vermerkt, so ist die Leistung und Energie jeweils als mechanische Leistung und daraus die Summe als mechanische Energie angegeben (siehe Abb. 6).

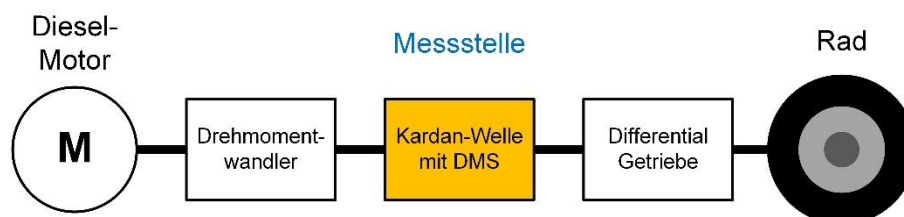


Abb. 6: Vereinfachter Antriebsstrang sowie die Position der Messstelle darin

4.1 Antrieb

4.1.1 Drehmomentverlauf während dem Anfahren am Hang und vollbeladenem Fahrzeug

Abb. 7 zeigt einen Anfahrvorgang am Berg mit 11° Steigung und vollbeladenem Fahrzeug. Diese Messung stellt aufgrund der Steigung und Beladung ein Extremereignis dar.

Vor dem Anfahr-Ereignis (Drehen der Räder) liegt eine Kraft von 5 kNm an der Kardan-Welle an. Während dem Anfahren steigt das Drehmoment mit 4.5 kNm/s , bis nach $4.1 \text{ s} (\pm 0.1 \text{ s})$ das maximale Drehmoment von 17.1 kNm erreicht ist.

$3.8 \text{ s} (+0, -0.5 \text{ s})$ nach dem Anfahr-Ereignis wird die Grenze von 120 Umdrehungen pro Minute bei einem Drehmoment von 16.5 kNm überschritten. Oberhalb dieser Drehzahl liefert der vorgesehene Elektromotor gemäss Hersteller dauerhaft sein Nenndrehmoment. Die Drehzahländerung liegt dabei bei $1.36 \frac{1}{\text{s}^2}$ pro Sekunde, was einer Beschleunigung des Fahrzeuges von 0.56 m/s^2 entspricht.

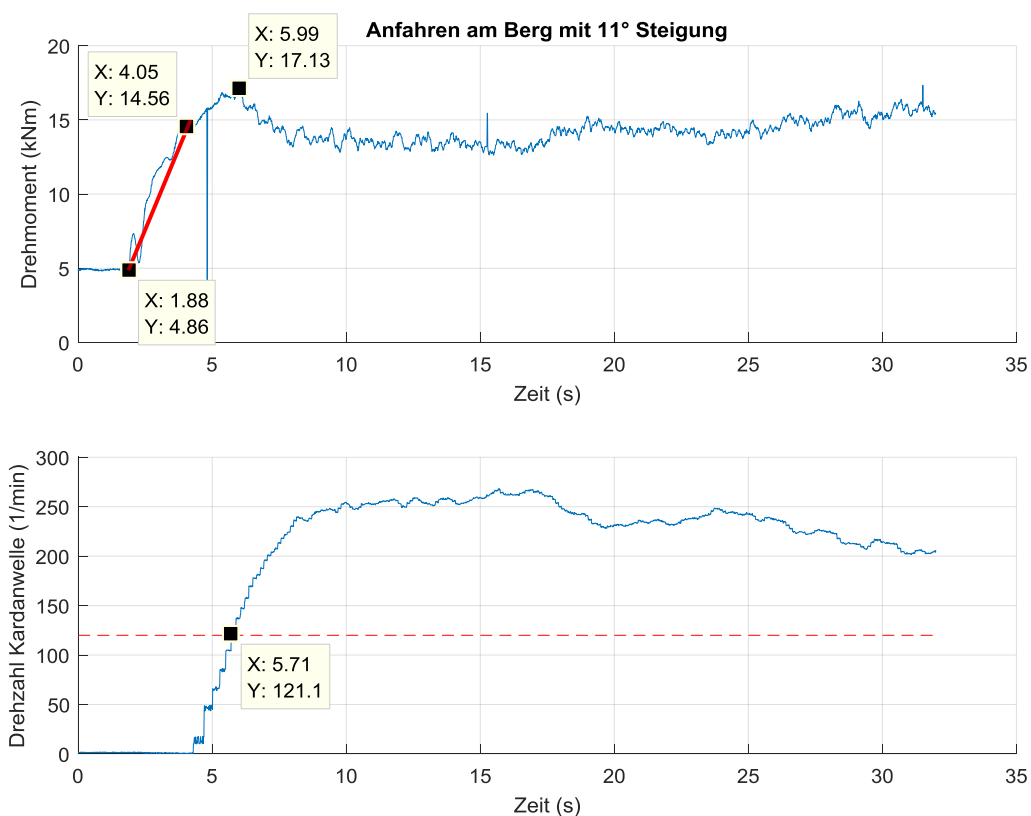


Abb. 7: Anfahrvorgang am Berg mit vollbeladenem Fahrzeug - Drehmoment (oben) und Drehzahl der Kardanwelle¹

¹ Der Messfehler der Drehmomentmessung ist kleiner $\pm 1\%$

Abb. 8 zeigt das gleiche Anfahr-Ereignis in höherer Auflösung:

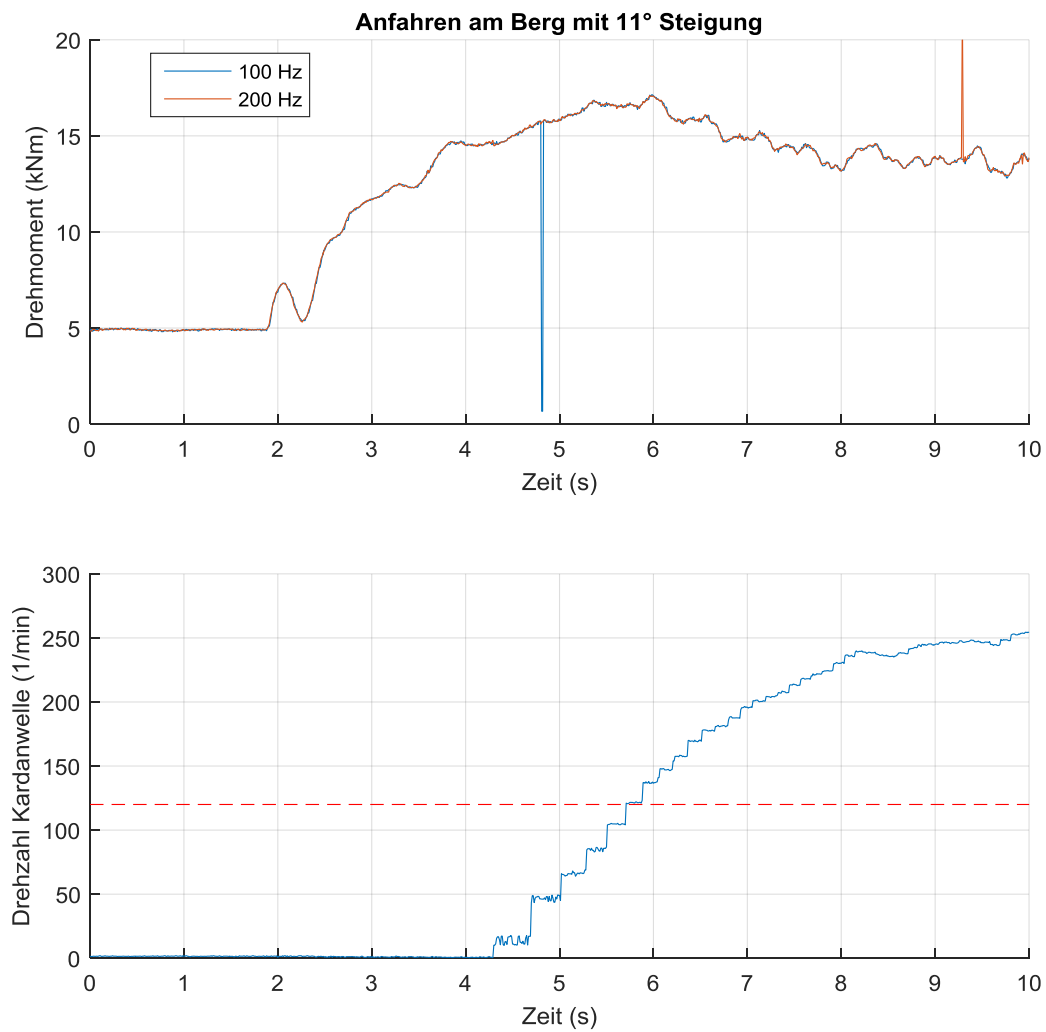


Abb. 8: Drehmoment- und Drehzahlverlauf ($f_s = 100$ Hz und 200 Hz) in höherer Auflösung beim Anfahrvorgang am Berg sowie vollbeladenem Fahrzeug

Beim Einbruch des Drehmoments vor $t = 5$ s handelt es sich um einen Ausreisser in der Messung.

Untenstehende Abb. 9 zeigt verschiedene Anfahrvorgänge am Berg mit vollbeladenem Fahrzeug und unterschiedlichen Steigungen (8° bis 11°).

Bei den Ausreißern in der Drehmoment- und Drehzahl-Messungen handelt es sich mit grosser Wahrscheinlichkeit um Messfehler aufgrund der starken Vibrationen auf dem Fahrzeug während dem Anfahrvorgang und daraus resultierender Beeinträchtigung des Messequipments.

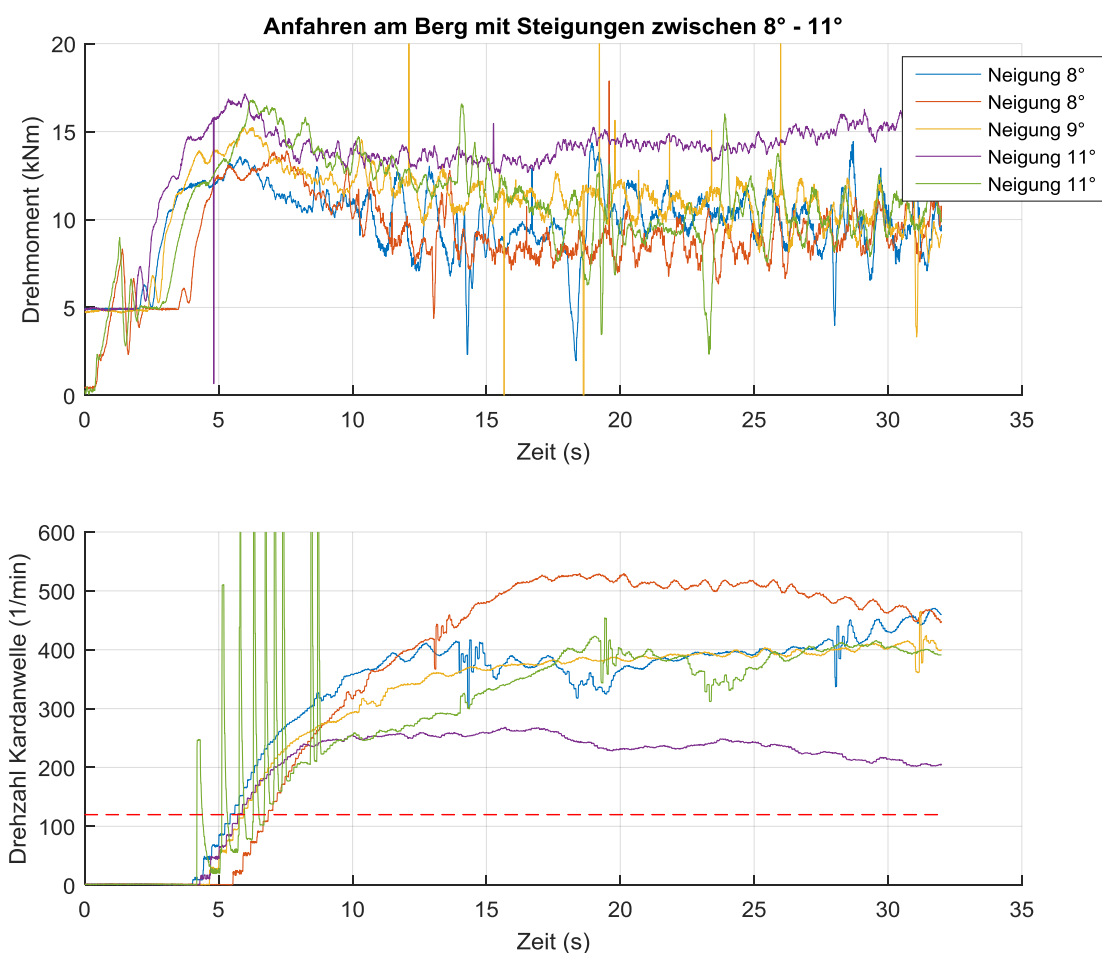


Abb. 9: Verschiedene Anfahrvorgänge am Berg mit vollbeladenem Fahrzeug und unterschiedlichen Steigungen - Drehmoment (oben) sowie Drehzahl der Kardanwelle²

² Der Messfehler der Drehmomentmessung ist kleiner $\pm 1\%$

Vereinfacht kann das Anfahren am Berg wie in Abb. 10 dargestellt werden:

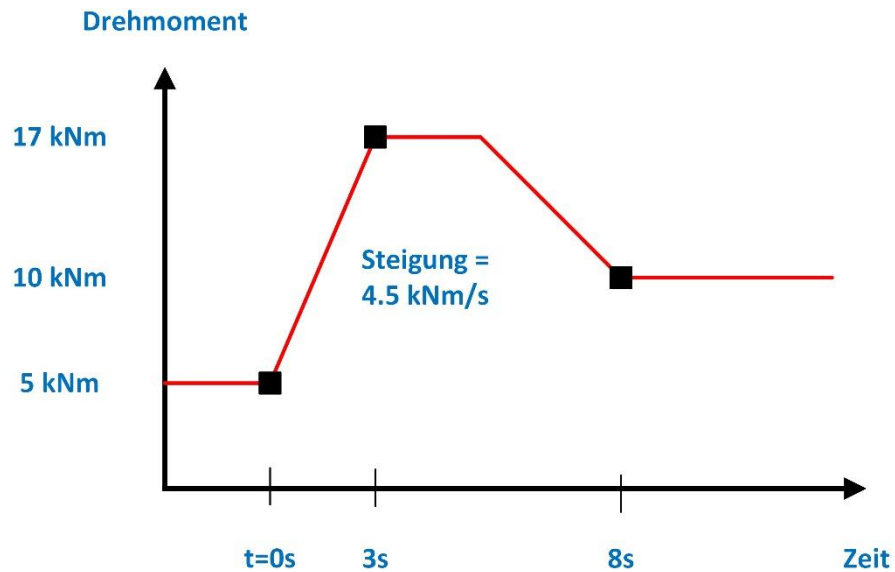


Abb. 10: Anfahrverhalten einprägsam aufgezeichnet

4.1.2 Steigung vs. maximales Drehmoment beim Anfahren am Hang und vollbeladenem Fahrzeug

In Abb. 11 zeigt die maximalen Drehmomente (kNm) bei den Anfahr-Vorgängen gegenüber der Steigung ($^{\circ}$). Das Fahrzeug ist bei einem maximalen Drehmoment von 17 kNm und einer Steigung von 11° noch in der Lage, mit rund 0.5 m/s^2 zu beschleunigen.

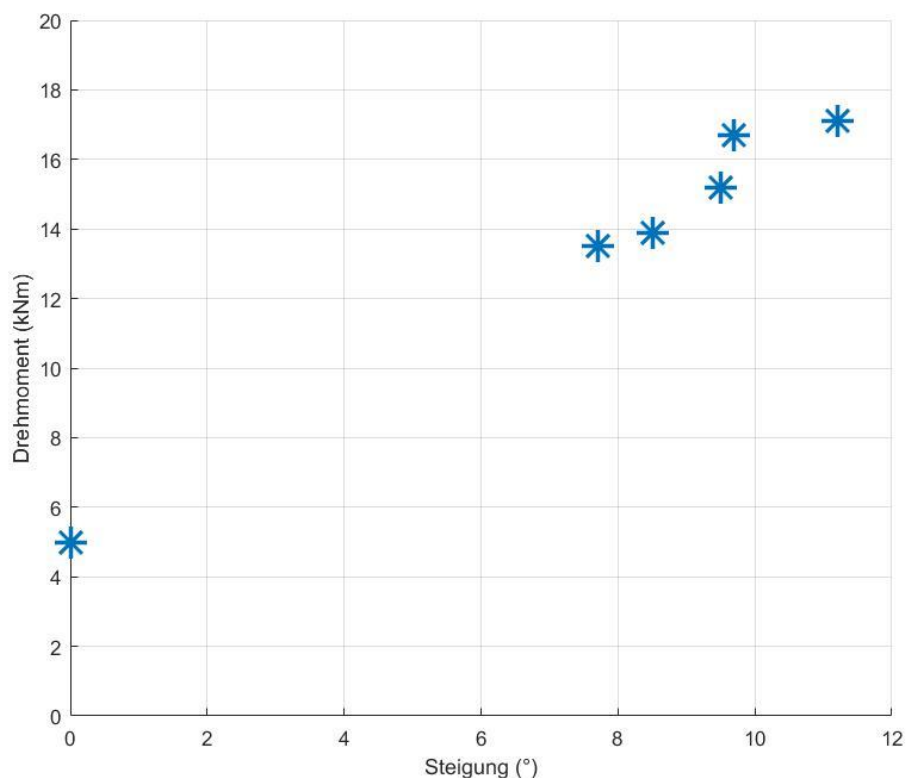


Abb. 11: Steigung ($^{\circ}$) vs. dem maximalen Drehmoment (kNm) beim Anfahren am Hang und vollbeladenem Fahrzeug

4.1.3 Maximale Leistung ermittelt durch Bergauffahren am Limit

Die Geschwindigkeit wird durch die Leistung des Dieselmotors (533 kW) begrenzt, wobei die nutzbare Leistung an der Kardanwelle bei maximal 500 kW liegt. Die Limite befindet sich bei einer Bergfahrt und leerem Fahrzeug zwischen 20 km/h bis 30 km/h. Abb. 12 zeigt diese Begrenzung in den Bereichen 80s bis 160s, 190s bis 270s sowie 330s bis 350s.

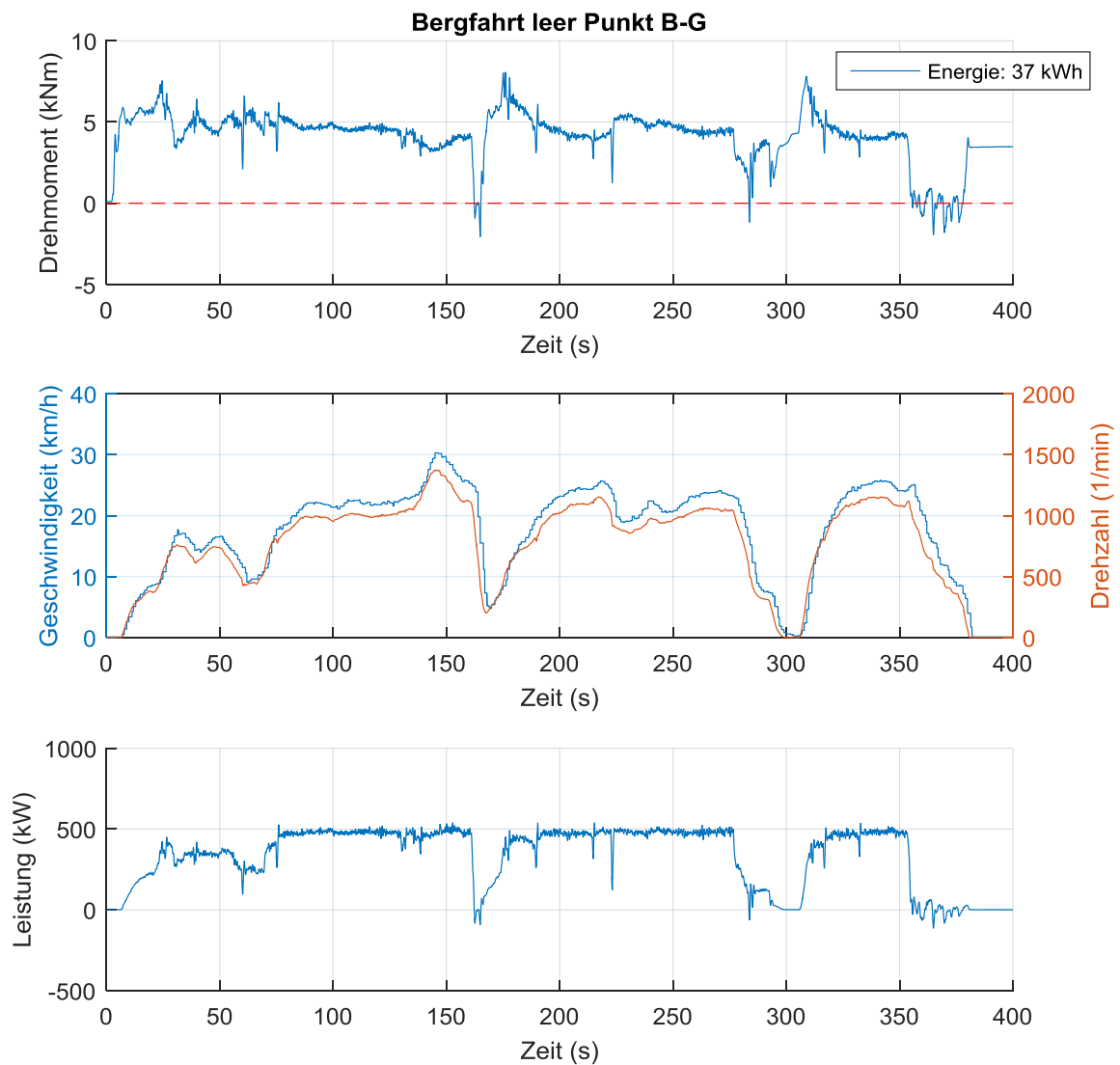


Abb. 12: Bergfahrt mit leerem Fahrzeug – die Leistung des Dieselmotors von 533 kW begrenzt die Geschwindigkeit auf 20 km/h bis 30 km/h

4.1.4 Lastdiagramm – Bergfahrt leer

Abb. 13 zeigt das Lastdiagramm exemplarisch einer Bergfahrt mit leerer Mulde von Punkt A (Steinbrecher) hinauf zum Punkt F (Ort wo das Fahrzeug befüllt wird). Das Drehmoment befindet sich dabei im Bereich ± 5 kNm, wobei die Mehrheit der Datenpunkte zwischen 4-6 kNm liegt.

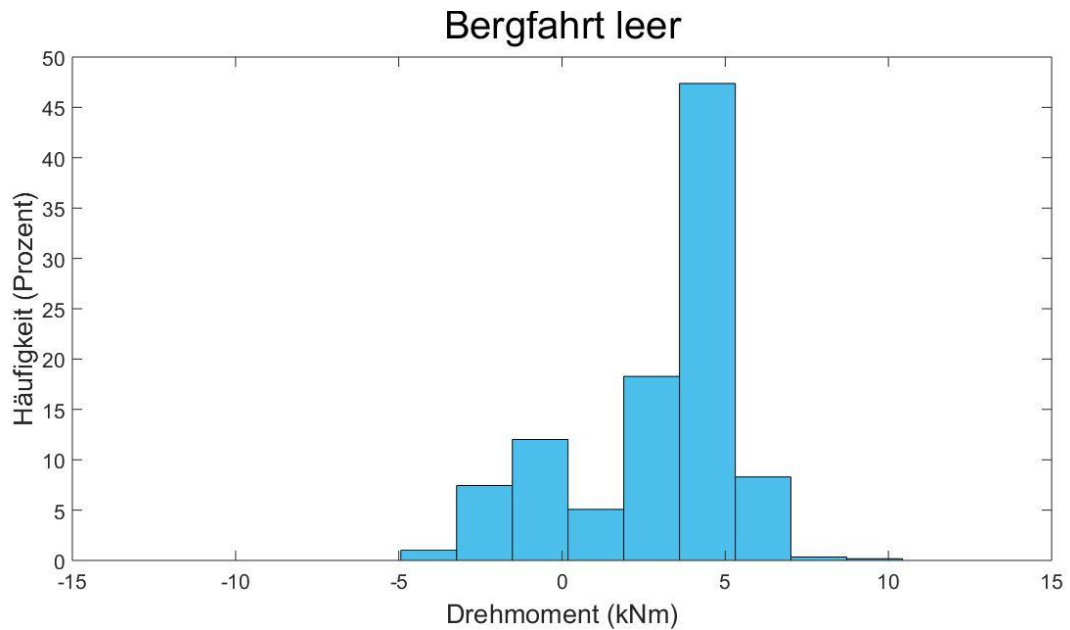


Abb. 13: Lastdiagramm einer Bergfahrt (A-F) mit leerer Mulde

4.1.5 Lastdiagramm – Talfahrt voll

Abb. 14 zeigt das Lastdiagramm einer Talfahrt mit voller Mulde von Punkt F (Ort wo das Fahrzeug befüllt wird) hinab zum Punkt A (Ort wo das Fahrzeug entladen wird). Das Drehmoment befindet sich dabei im Bereich -12 kNm bis 15 kNm, wobei die Mehrheit der Datenpunkte zwischen -6 und 2 kNm liegt. Ein weiteres lokales Maximum ist zwischen 8-12 kNm zu erkennen, dies Aufgrund des Geländeprofils beim Abfahren einer „normalen“ Route (siehe auch Abb. 22).

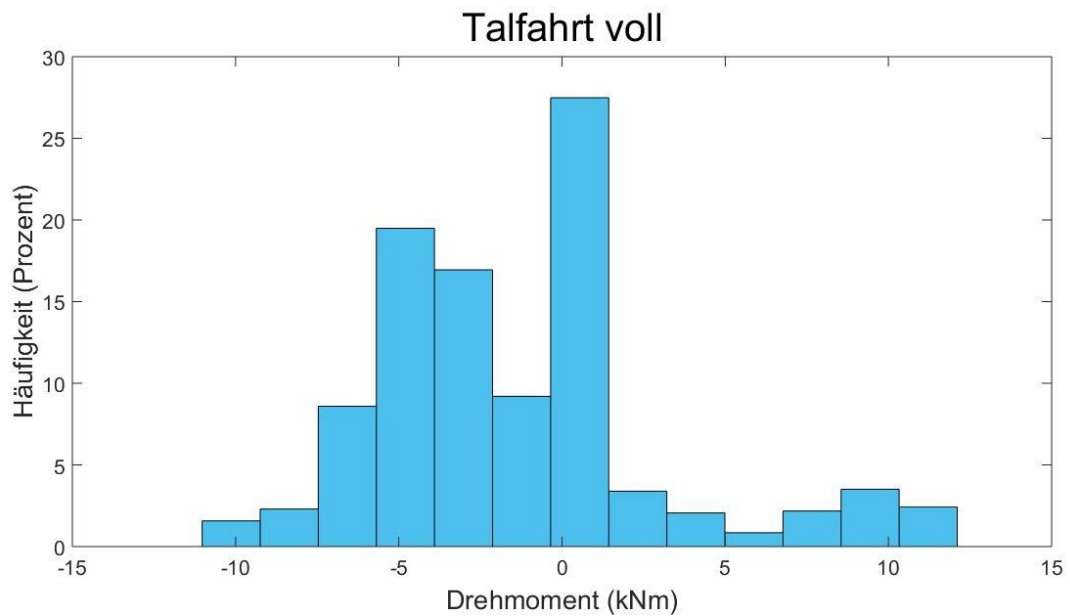


Abb. 14: Lastdiagramm einer Talfahrt (F-A) mit voller Mulde

4.2 Energiespeicher

In einem ersten Schritt werden die Leistung sowie der Energiebedarf bei Berg- und Talfahrten („Normale Tagesroute“) analysiert. In einem zweiten Schritt wird eine Bilanz gezogen.

4.2.1 Bergfahrt mit leerer Mulde

Abb. 15 zeigt exemplarisch das Drehmoment, die Fahrzeuggeschwindigkeit gemäss GPS-Empfänger sowie die berechnete Leistung aus Drehmoment und Kardanwellendrehzahl, einer Fahrt am 1.02.2017 von 09h55 bis 10h06 Uhr.

Die Geschwindigkeit des unbeladenen Fahrzeuges während der Bergfahrt liegt bei 15 km/h bis 20 km/h. Der Energiebedarf für eine Route von der Entladestation/Steinbrecher (Punkt A) bis zu der Stelle (Punkt F) wo das Fahrzeug beladen wird, beträgt $36.4 \text{ kWh} \pm 0.8 \text{ kWh}$.

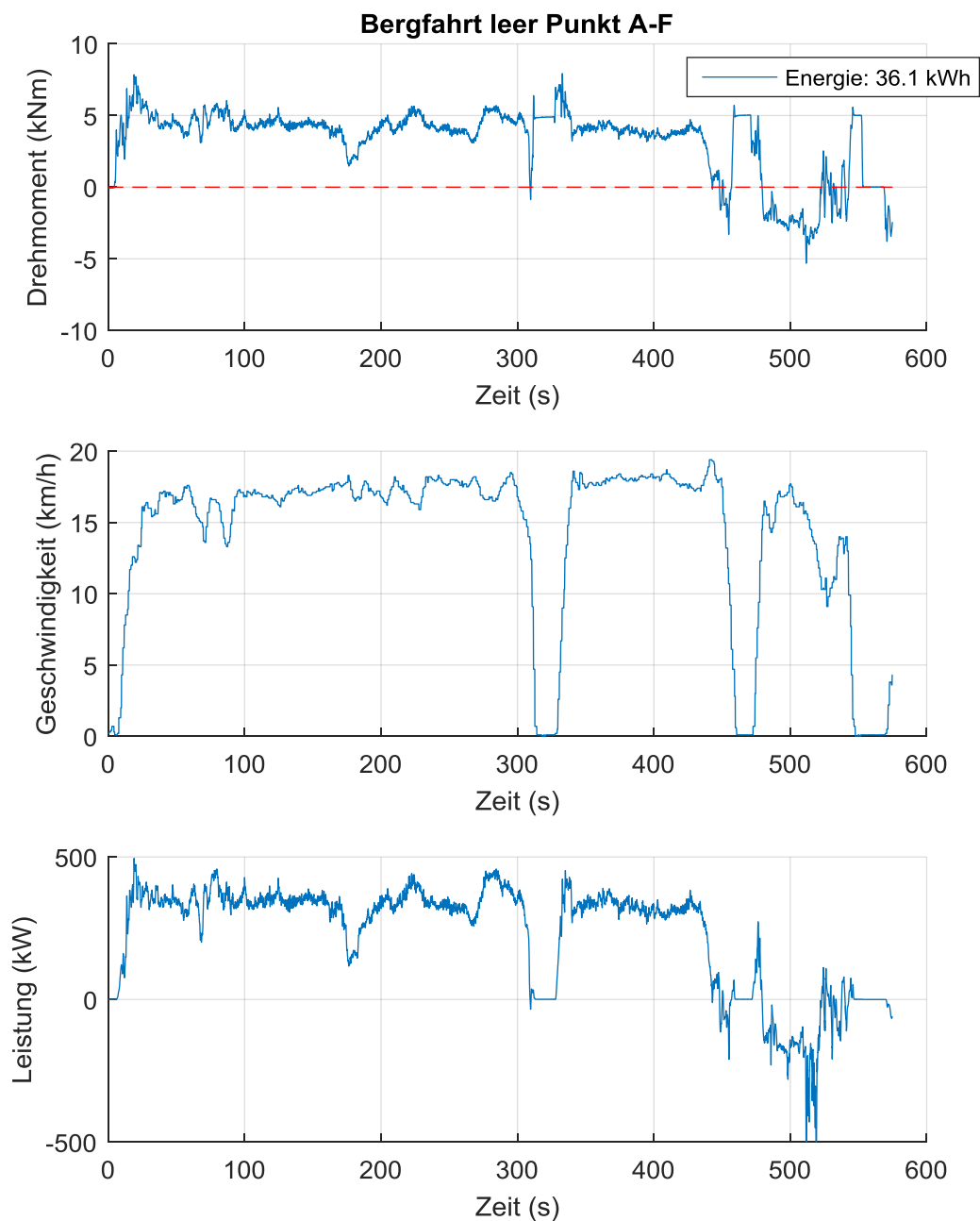


Abb. 15: Drehmoment (oben), Fahrzeug Geschwindigkeit (mittig) und Antriebs-Leistung einer Bergfahrt

Untenstehende Abb. 16 zeigt die Fahrzeuggeschwindigkeit verknüpft mit den Positionsdaten auf dem Kartenmaterial von Google Earth. Die blauen Punkte repräsentieren dabei einen Halt, die roten Punkte das Fahren mit 15 km/h bis 20 km/h.

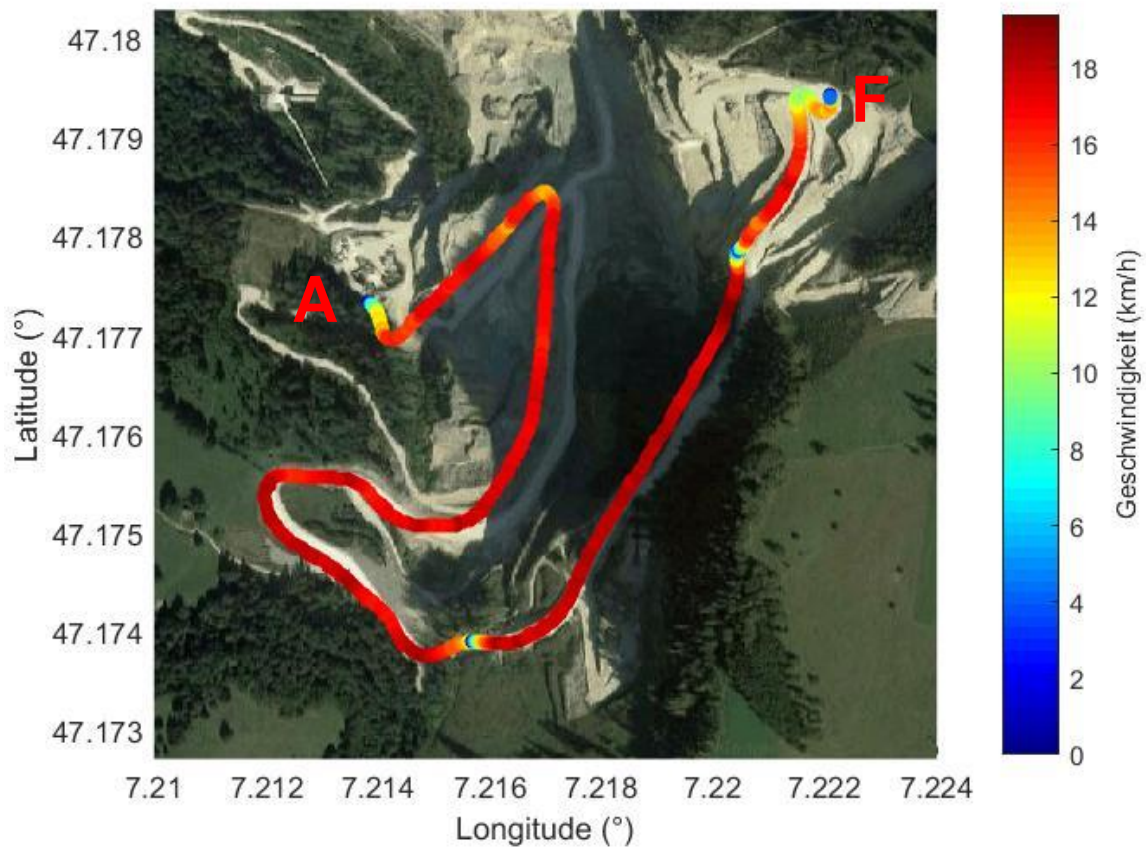


Abb. 16: Google Earth Plot mit der Fahrzeuggeschwindigkeit (vom GPS) einer Bergfahrt (Fahrer von Vigier)

Tabelle 3 zeigt den Energiebedarf einzelner Bergfahrten am 1.02.2017:

Energie Bergfahrt (kWh)	Uhrzeiten (HH:MM:SS)
36.1	09:55:55 bis 10:05:30
37.3	10:23:40 bis 10:33:30
35.8	10:47:20 bis 10:59:00

Tabelle 3: Energiebedarf für einzelne Bergfahrten einer „Normalen Tagesroute“ – Mittelwert = 36.4 kWh, Standardabweichung = 0.8 kWh

4.2.2 Talfahrt mit voller Mulde

Abb. 17 zeigt das Drehmoment, die Fahrzeuggeschwindigkeit gemäss GPS-Empfänger sowie die berechnete Leistung aus Drehmoment und Kardanwellen Drehzahl einer Talfahrt im vollbeladenen Zustand (67t gemäss dem Fahrer von Vigier) am 1.02.2017 von 10h09 bis 10h23 Uhr. Energiebedarf für eine Talfahrt (vom Punkt wo das Fahrzeug beladen wird bis hin zur Entladestation) beträgt im Mittel -21.2 kWh bei einer Standardabweichung von ± 2.4 kWh. Dieser Wert enthält nur die Energie, welche über das System Kardanwelle => Motorbremse umgewandelt wird. Im Mittel wurde dabei bei aktiver Motorbremse mit $-188 \text{ kW} \pm 75 \text{ kW}$ gebremst (Ausschnitt 143 s bis 690 s in der untenstehenden Abbildung).

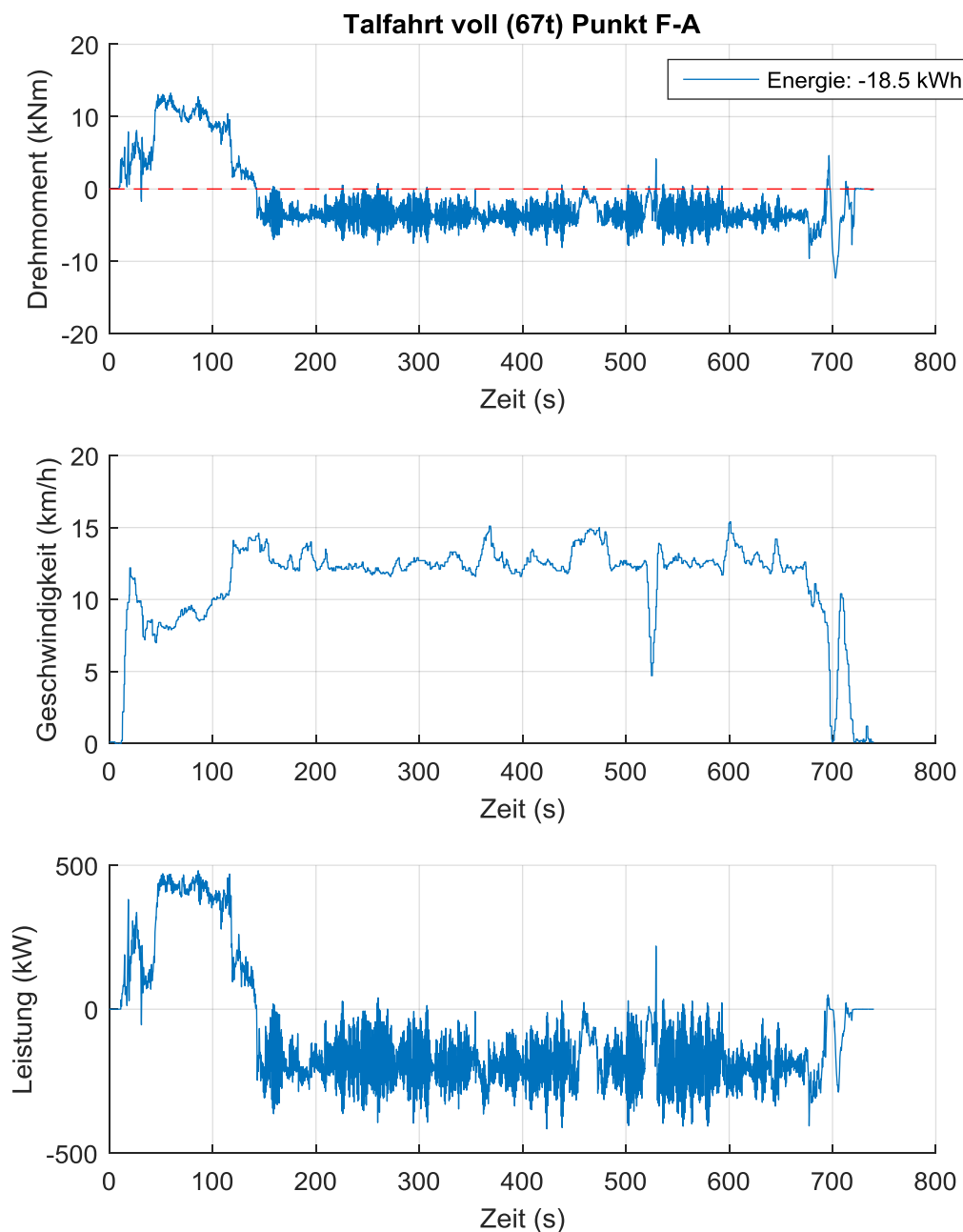


Abb. 17: Drehmoment (oben), Fahrzeug Geschwindigkeit (mittig) und Antriebs-Leistung einer Talfahrt

Die Geschwindigkeit bei der Talfahrt ist mit 12 km/h bis 15 km/h gegenüber der Bergfahrt etwas langsamer (siehe Abb. 16 und Abb. 18 sowie Abb. 15 und Abb. 17).

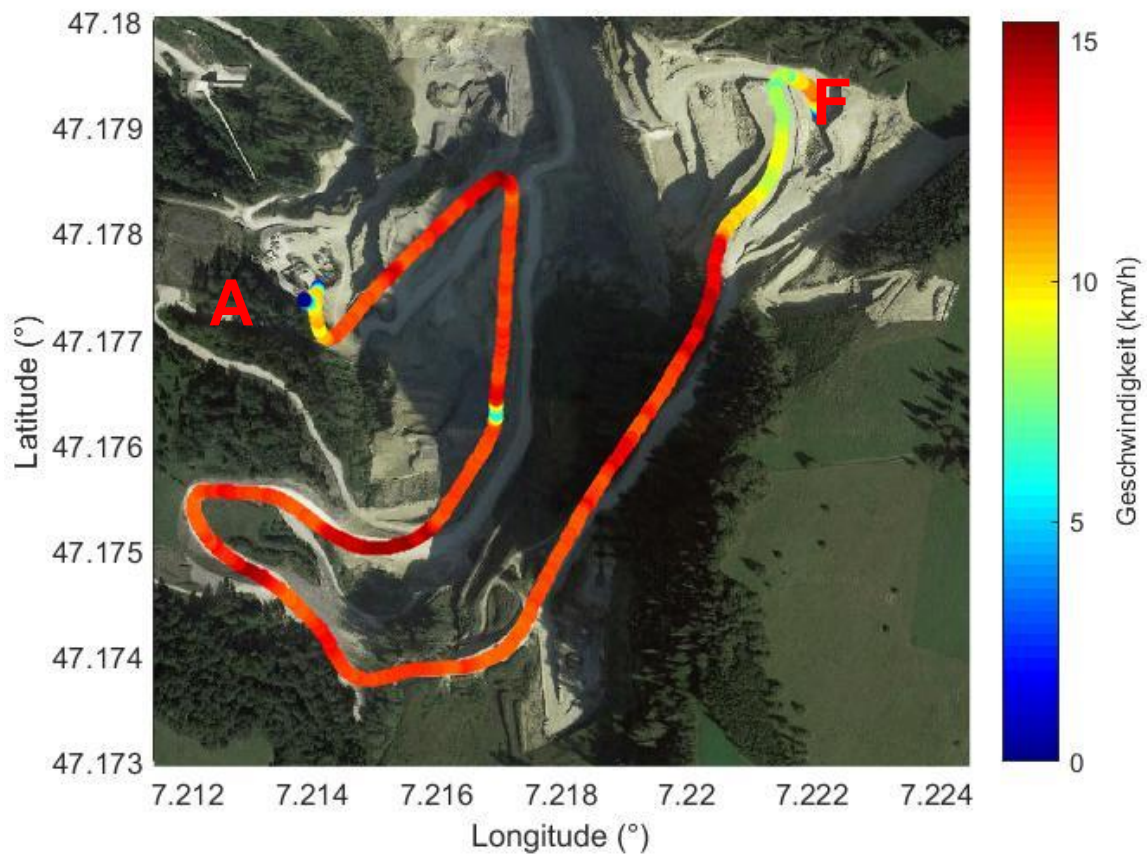


Abb. 18: Google Earth Plot mit der Fahrzeuggeschwindigkeit (vom GPS) einer Talfahrt (Fahrer von Vigier)

Tabelle 4 zeigt den Energiebedarf einzelner Talfahrten am 1.02.2017:

Energie Talfahrt (kWh)	Uhrzeiten (HH:MM:SS)
-18.5	10:09:00 bis 10:21:20
-22.3	10:33:40 bis 10:47:25
-22.8	11:02:00 bis 11:13:10

Tabelle 4: Energiebedarf für einzelne Talfahrten einer „Normalen Tagesroute“ – Mittelwert = 21.2 kWh, Standardabweichung = 2.4 kWh

4.2.3 Energiebedarf bei Berg- und Talfahrten („Normale Tagesroute“)

Abb. 19 zeigt zwei Bergfahrten (leer und voll) sowie eine Talfahrt mit gefüllter Mulde exemplarisch gegenübergestellt. Die Leistung (kW) auf der Y-Achse ist dabei jeweils auf -500 bis 1'000 kNm skaliert. Der Zeitvektor (s) auf der X-Achse ist aufgrund unterschiedlicher Fahrzeiten nicht einheitlich skaliert.

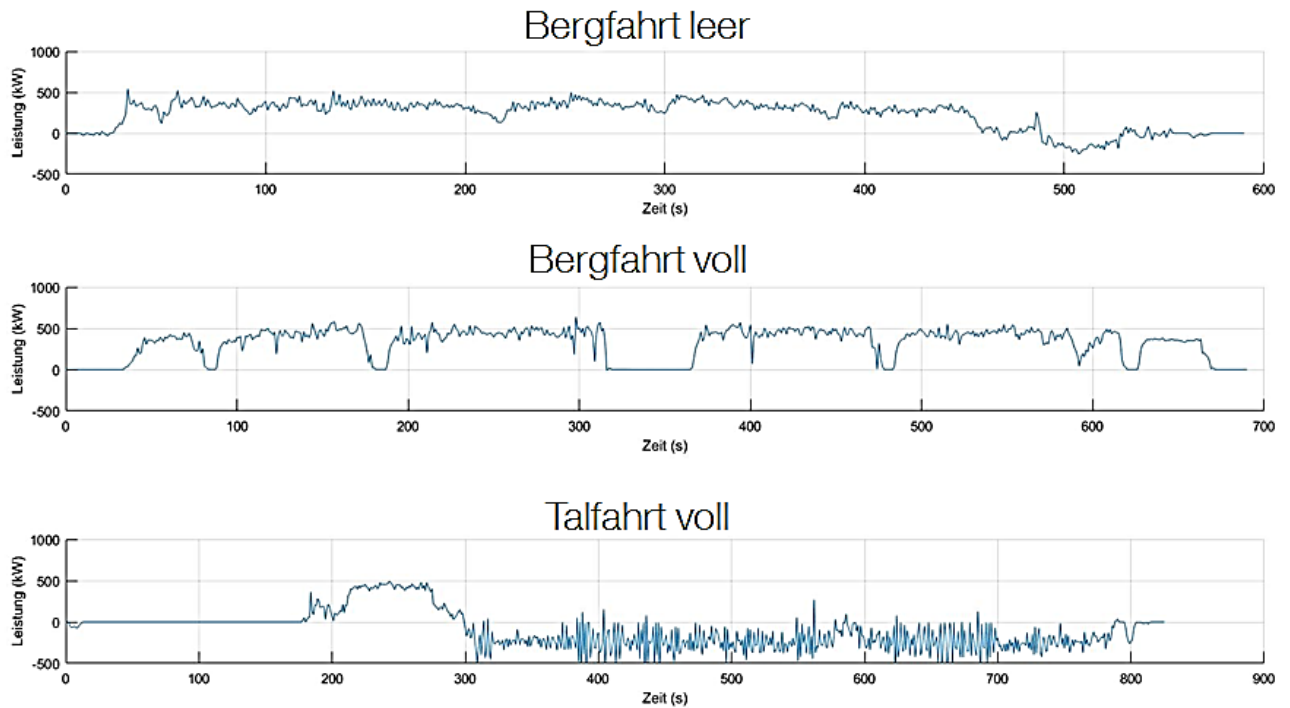


Abb. 19: Leistung (kW) über der Zeit (s) für Berg- und Talfahrten

In Tabelle 5 sind die mechanischen Energien (berechnet aus der mechanischen Leistung über der Zeit) für unterschiedliche Berg- und Talfahrten und sowohl leerer und beladener Mulde dargestellt. Der Mittelwert wird dabei μ , und die Standardabweichung σ genannt.

E_{Mech}	Bergfahrt	Talfahrt
Leer	36.9 kWh 39.7 kWh 36.1 kWh 37.3 kWh 35.8 kWh $\mu = 37.2 \text{ kWh}$ $\sigma = 1.5 \text{ kWh}$	-
Beladen	61.8 kWh	-16.9 kWh -18.5 kWh -22.3 kWh -22.8 kWh $\mu = -20.1 \text{ kWh}$ $\sigma = 2.9 \text{ kWh}$

Tabelle 5: Energiebedarf (kWh) für einzelne Berg- und Talfahrten inkl. Mittelwert μ und Standardabweichung σ

Die grosse Standardabweichung bei der Talfahrt im beladenen Zustand ist durch das „Schwingen“ bei der Motorbremse zu erklären (siehe auch Abb. 19).

Da ein Teil der Bremsenergie durch den an der Hinterachse montierten Retarder abgeführt wird (Abb. 20), und diese Bremskraft von der Mess-Welle nicht berücksichtigt wird, muss die zusätzliche Bremsenergie für die Energie-Bilanz miteinbezogen werden.

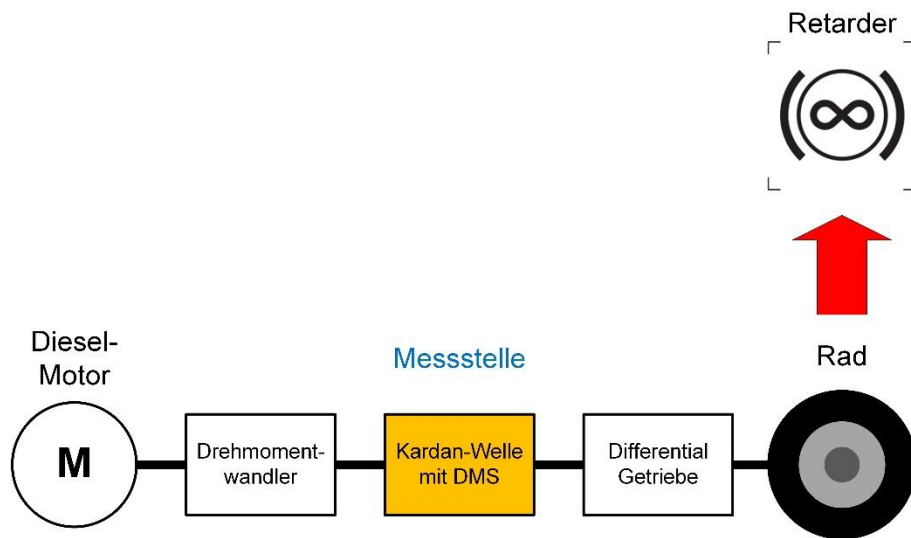


Abb. 20: Bremsenergie des Retarders (an Hinterachse montiert) wird von der Messstelle nicht erkannt

Diese Bremsenergie wurde durch zwei verschiedene Varianten abgeschätzt:

- (1) Aus der Differenz zwischen der Bergfahrt beladen und unbeladen. Dies ergibt einen Wert von **24.6 kWh** (61.8 kWh – 37.2 kWh), welcher die oberste Grenze darstellt. Hierbei wird angenommen, dass die gesamte zusätzliche mechanische Energie (aus der Differenz der Zuladung) bei der Talfahrt zurückgewonnen werden kann.
- (2) Von der Firma Kuhn AG wurde eine Abschätzung der mittleren Bremsleistung aufgrund der Differenz in der Ötemperaturen des Retarders ermittelt. Diese beläuft sich auf rund 75 kW, was eine abgeführte Energie von rund **10 kWh** ergibt. Verluste durch Abstrahlung und Wärmeableitung an der Bremse selbst, sind darin nicht berücksichtigt. Deshalb stellt dieser Schätzwert die untere Grenze dar.

Aufgrund dessen, dass der Retarder auch in Zukunft eingebaut bleibt und niemals 100% über den Elektromotor gebremst werden kann, wird für die weitere Betrachtung folgende Abschätzung benutzt:

E_{Retarder}	Bergfahrt	Talfahrt
Beladen	-	- 15 kWh \pm 5 kWh

Tabelle 6: Bremsenergie des Retarders bei einer Talfahrt. Mittelwert und Standardabweichung

Für die weitere Betrachtung wird nun der Wirkungsgrad der gesamten Kette (von der Batterie bis zum Rad) des zukünftigen Antriebsstrangs berücksichtigt. Der Gesamtwirkungsgrad ist dabei das Produkt der Wirkungsgrade von den einzelnen Komponenten. Mit dieser Methode kann nun die Energie, welche bei der Bergfahrt aus der Batterie bezogen und bei der Talfahrt zurückgespeist wird, berechnet werden.

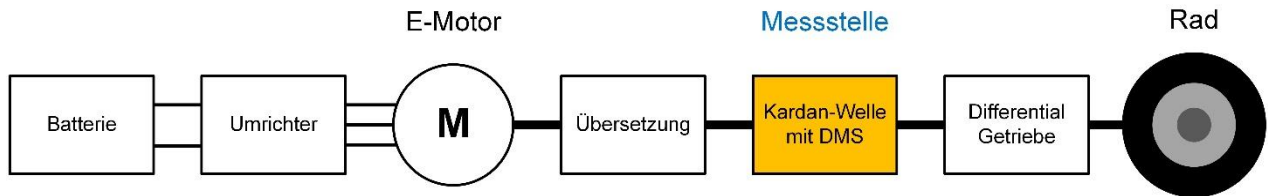


Abb. 21: Zukünftige Antriebskette und Position der Messstelle darin

Der durchschnittliche Wirkungsgrad des Antriebs η setzt sich wie folgt zusammen³:

$$\eta = \eta_{\text{Batterie}} \cdot \eta_{\text{Umrichter}} \cdot \eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Leitungen}} \cdot \eta_{\text{Übersetzung}}$$

$$\eta = 0.95 \cdot 0.96 \cdot 0.96 \cdot 0.98 \cdot 0.98 = 0.84 \rightarrow \mathbf{84\%}$$

Daraus folgt die Energiebilanz gemäss Tabelle 7:

$E_{\text{EI_tot}}$	Bergfahrt (leer)	Talfahrt (beladen)
E_{Mech}	37.2 kWh	-20.1 kWh - 15 kWh \pm 5 kWh <u>nicht</u> berücksichtigt, da von Retarder abgeführt
E_{EI} ($E_{\text{EI}} + E_{\text{Retarder}}$) (Wirkungsgrad = 84%)	44.3 kWh	-16.9 kWh (-29.5 kWh \pm 4.2 kWh)
+ Neben- verbraucher (24 kWh/h über 10 min)	+ 4 kWh	+ 4 kWh
$E_{\text{EI_tot}}$	48.3 kWh	-25.5 kWh \pm 4.2 kWh (min. 21.3 kWh) (max. 29.7 kWh)

Tabelle 7: Energiebilanz = Totale elektrische Energie (kWh) für eine Berg- leer und Talfahrt beladen

³ Annahmen in Absprache mit Marius Bachofen, Lithium Storage GmbH, 21.02.2017

Wie aus der Energiebilanz in Tabelle 7 zu entnehmen ist, wird für eine Bergfahrt im leeren Zustand mehr Energie benötigt, als bei der Talfahrt mit Zuladung durch elektrisches Bremsen wieder zurückgewonnen werden kann. Diese Diskrepanz von rund 20 kWh bis 30 kWh pro Zyklus kann zum Teil durch das Höhenprofil der Strecke erklärt werden. In Abb. 22 ist das Höhenprofil sowie die Strecke ersichtlich.

Bei der Bergfahrt fällt das Gelände kurz vor dem Punkt, wo das Fahrzeug beladen wird, wieder ab. Diese Höhendifferenz muss das Fahrzeug nach dem Beladen für die Talfahrt wiederum überwinden, was energieintensiv ist (siehe dazu auch den Leistungsbedarf der Talfahrt im beladenen Zustand aus Abb. 19).

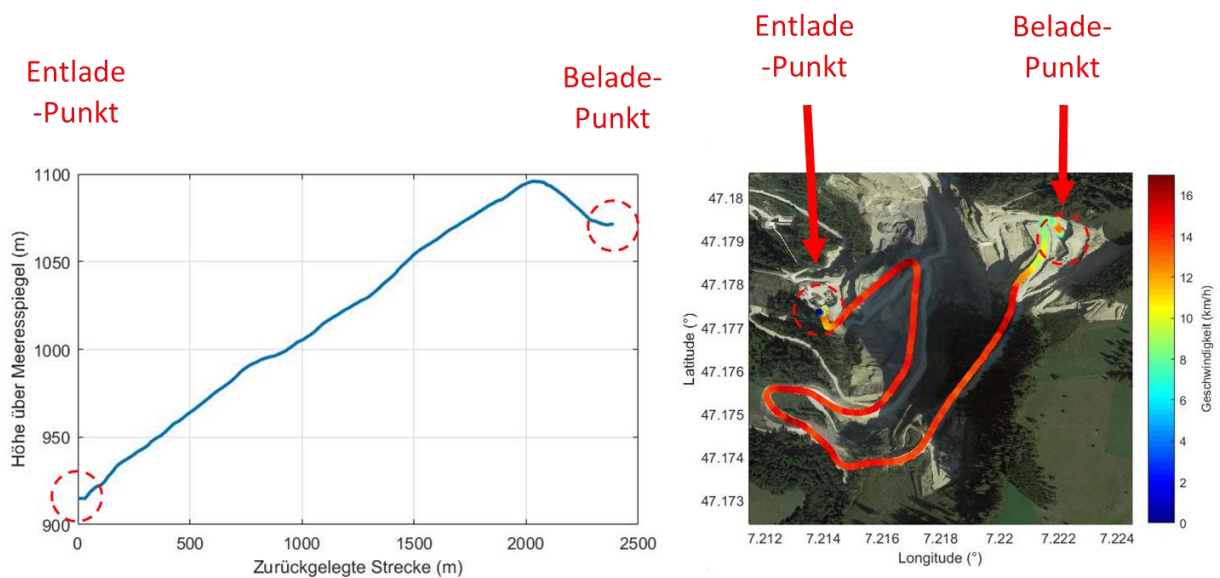


Abb. 22: Höhenprofil beim Abfahren einer „normalen“ Route (Höhenangaben aus GPS-Daten)

Dieser oben genannte Effekt wird nochmals verstärkt, wenn der «untere» Beladepunkt angefahren wird (Abb. 23). Dann ist die Höhendifferenz, welche zu Beginn im vollbeladenen Zustand überwunden werden muss, nochmals grösser. Daraus folgt eine weitere Minderung der nutzbaren Bremsenergie über den ganzen Zyklus betrachtet (Fahren von Punkt F bis A).

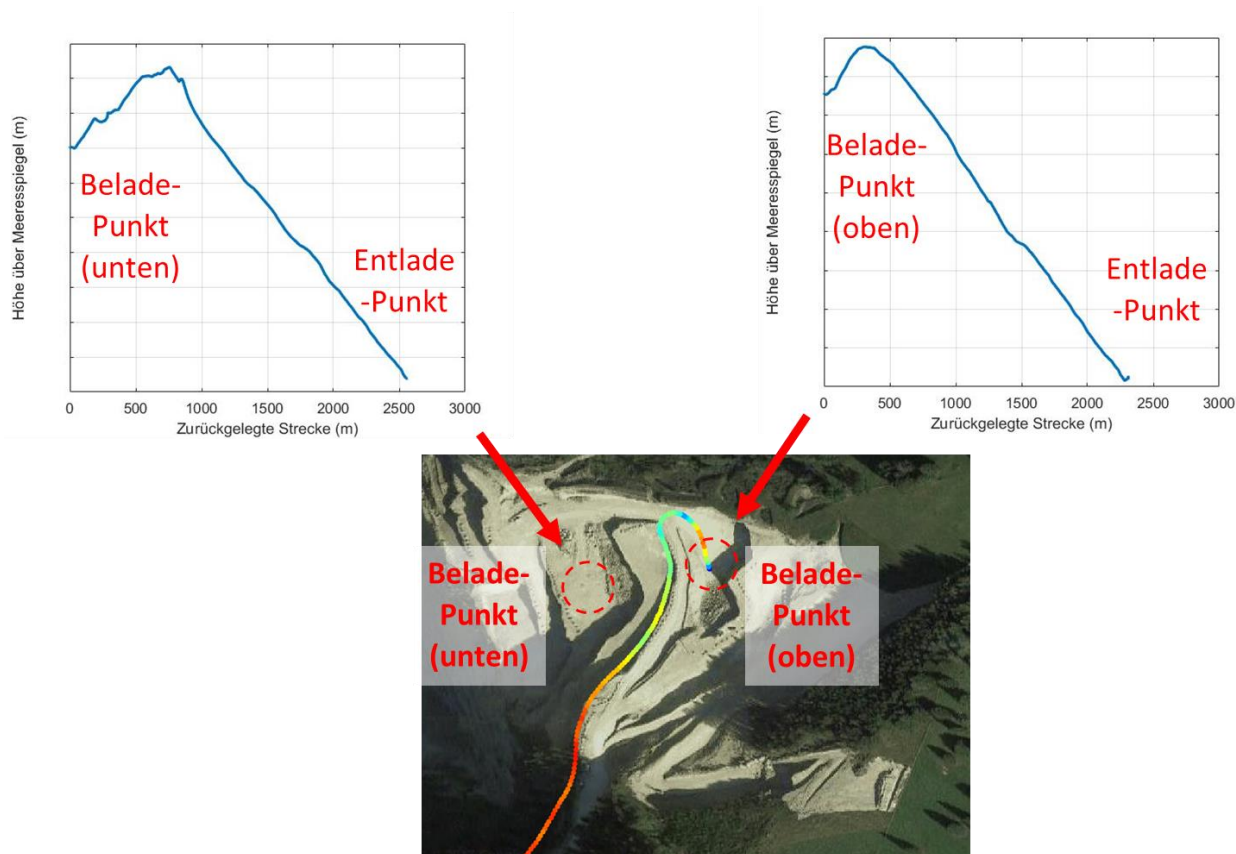


Abb. 23: Höhenprofil beim Abfahren einer „normalen“ Route vom unteren Beladepunkt (links, oben) und oberer Beladepunkt (rechts, oben). Google Earth Karte mit der Fahrstrecke und den beiden Beladepunkten (mittig, unten).

Schlussendlich tragen auch die Nebenverbraucher (Hydraulikpumpen, Klimaanlage) ihren Beitrag zu der Differenz in der Energiebilanz bei (siehe Tabelle 7). Eine Reduzierung dieser Energie durch höhere Effizienz, verbesserte Regler Einstellungen oder geschicktere Auslegung ist zu empfehlen, falls diese Massnahmen wirtschaftlich umgesetzt werden können.

4.2.4 Analyse der Energiebilanz bei einer Idealroute (Bergfahrt nur steigend / Talfahrt nur abfallend)

Um das Potential eines Energieüberschusses bei einer idealen Strecke zu prüfen wurde der ausschließlich steigende Abschnitt der Versuchsstrecke isoliert und anschließend analysiert. Der Idealfall basiert auf der Tatsache, dass das Fahrzeug leer den Berg hochfährt (A→B) und beladen zurück ins Tal fährt (B→A).

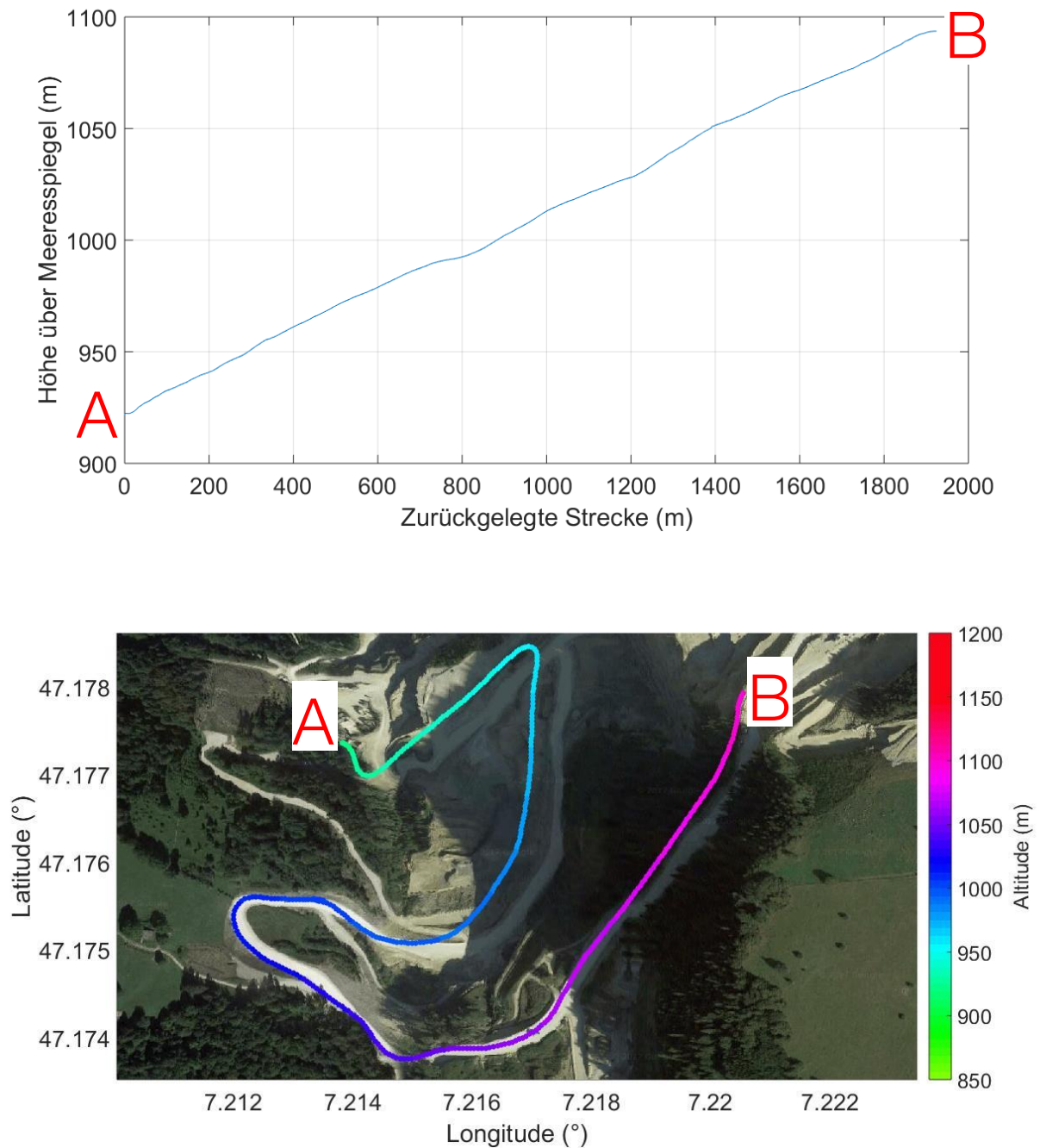


Abb. 24: Google Earth Plot mit entsprechendem Höhenprofil

Für die Energiebilanzanalyse wurden die Daten aus 4 Messfahrten verwendet.

E_{Mech}	Bergfahrt	Talfahrt
Leer	38.3 kWh 39.3 kWh 37.7 kWh 39.6 kWh $\mu = 38.7 \text{ kWh}$ $\sigma = 1 \text{ kWh}$	-
Beladen		-27.9 kWh -31.3 kWh -32.2 kWh -31.4 kWh $\mu = -30.7 \text{ kWh}$ $\sigma = 1.7 \text{ kWh}$

Tabelle 8: Energiebedarf (kWh) für einzelne Berg- und Talfahrten inkl. Mittelwert [μ] und Standardabweichung [σ] der idealen Fahrt

Von der Firma Kuhn AG wurde eine Abschätzung der mittleren Bremsleistung aufgrund der Differenz der Ötemperaturen des Retarders ermittelt. Diese beläuft sich auf eine mittlere Bremsleistung von rund 75 kW, was einer abgeführten Energie von rund 10 kWh ergibt. Verluste durch Abstrahlung und Wärmeableitung an der Bremse selbst, sind dabei nicht berücksichtigt. Deshalb stellt dieser Schätzwert die untere Grenze dar.

E_{Retarder}	Bergfahrt	Talfahrt
Beladen	-	- 10.5 kWh

Tabelle 9: Mittelwert der Bremsenergie des Retarders bei Talfahrt

Ohne die Berücksichtigung der Wirkungsgrade und Nebenverbraucher, erhalten wir somit folgende Abschätzung der Energiebilanz:

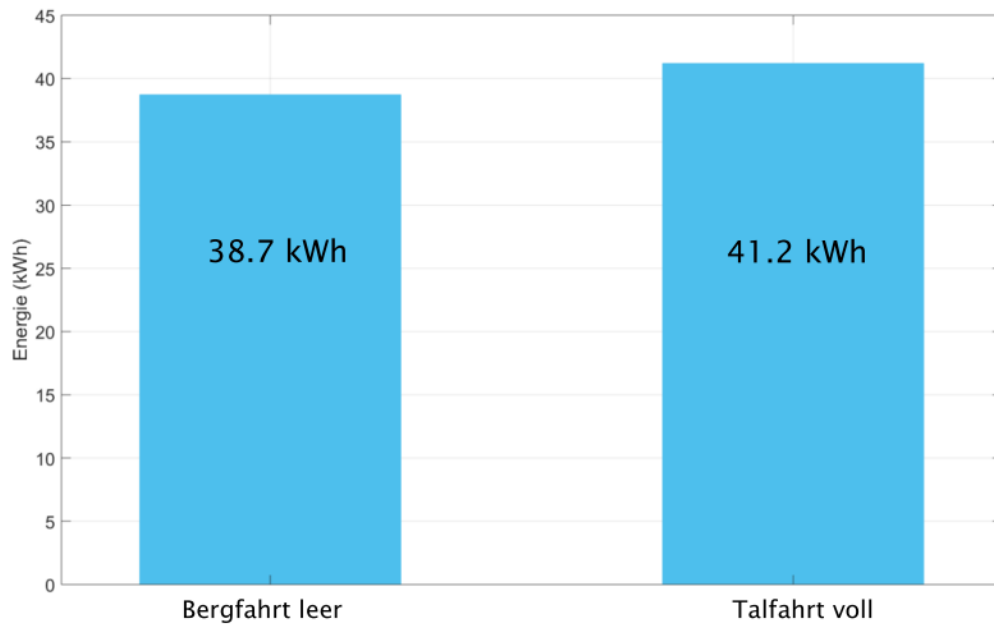


Abb. 25: Vergleich der Energie von Berg- und Talfahrt

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade sowie den Nebenverbrauchern, erhalten wir bei einer idealen Fahrt folgende Energiebilanz eines Berg- Talfahrtzyklus.

	Bergfahrt (leer)	Talfahrt (beladen)
E_{El_tot}	50.1 kWh	-30.6 kWh

Tabelle 10: totale elektrische Energie bei der Tal- und Bergfahrt

Somit wird das Fahrzeug auch unter idealen Bedingungen keinen Energieüberschuss generieren. Ein „Plusenergiefahrzeug“ wird somit aus heutiger Sicht, auch unter idealen Bedingungen nicht realisierbar sein.

5 Verhalten des Brems- und ABS-System

Zwecks besserem Verständnis über das ABS-System des Komatsu HD605, wurden unter anderem der Bremsdruck sowie das Raddrehzahl-Signal mit aufgezeichnet.

5.1 Verhalten bei einem Anfahrvorgang

Das Verhalten des ABS während einem Anfahrvorgangs ist in Abb. 7 dargestellt. Diese Abbildung zeigt die Beschleunigung (ungefiltert, skaliert, vom Beschleunigungssensor), die Geschwindigkeit (ungefiltert, skaliert, errechnet aus der Kardanwellen Drehzahl) sowie der Bremsdruck (ungefiltert, skaliert, fahrzeugeigener Sensor). Der Motor wurde um 12h57:10 gestartet, was aus der Zunahme der Vibrationen in den Beschleunigungsdaten ersichtlich ist (Abb. 7). Um 12h58.20 wurde das Fahrzeug in Bewegung gesetzt. Dieses Ereignis ist in den Geschwindigkeitsdaten gut ersichtlich. Der Bremsdruck scheint einen Wert von 60...70 kg/cm² nie zu unterschreiten und beträgt maximal 310...320 kg/cm² bei einer Vollbremsung.

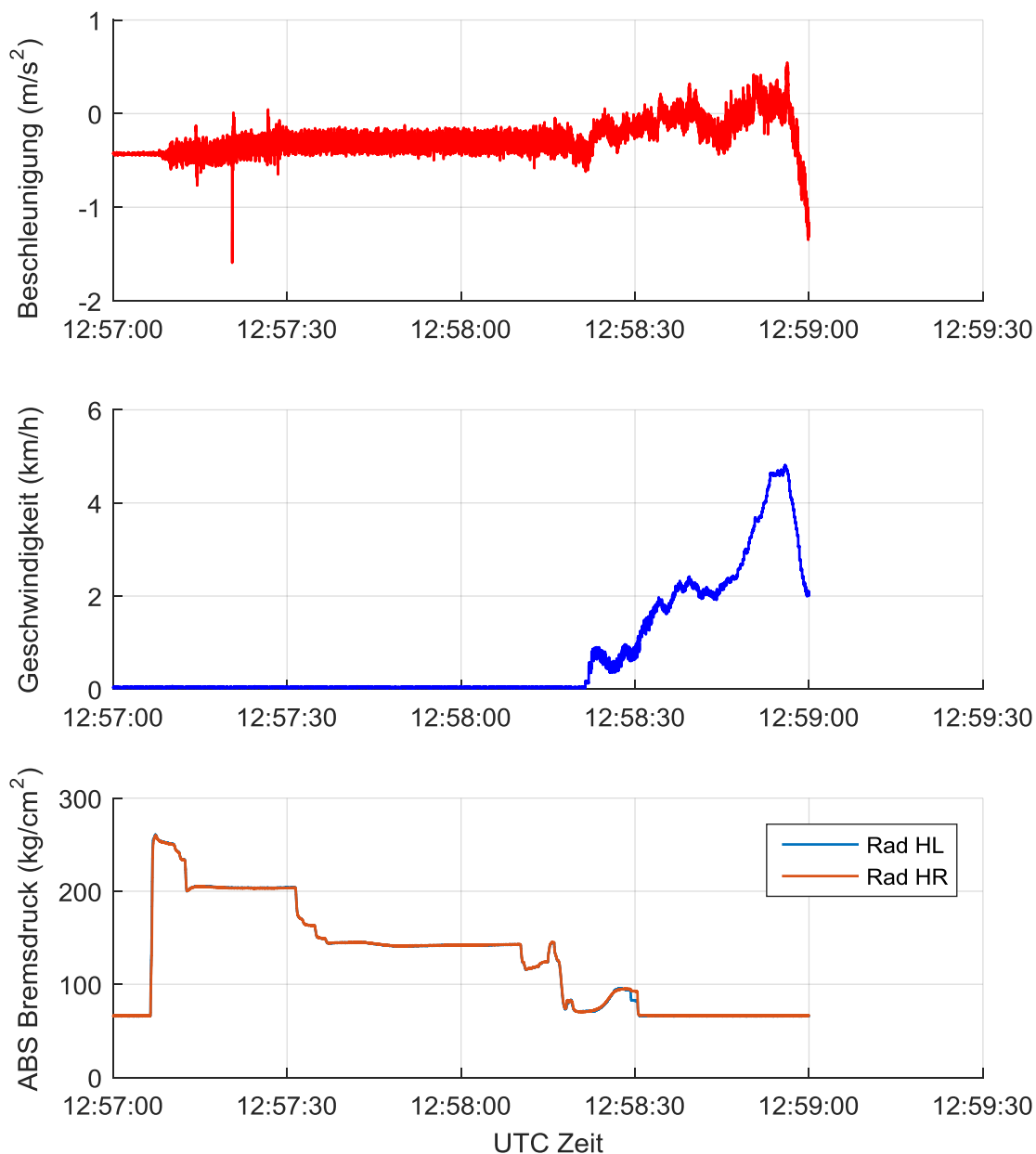


Abb. 26: Anfahrvorgang - Beschleunigung (oben), Geschwindigkeit (mittig) und Bremsdruck

5.2 Verhalten bei einer Vollbremsung auf festem Untergrund (leer)

In der Abb. ist das Verhalten bei einer Vollbremsung zu erkennen. Dieser Versuch wurde während der Talfahrt Richtung Ausgangspunkt A durchgeführt (Abb. 5). Dabei wurde eine maximale Verzögerung angestrebt wobei rund 5 m/s^2 erreicht wurde⁴. Wie es scheint, hat das ABS den Bremsdruck während der Vollbremsung auf dem Hinterrad rechts kurzzeitig reduziert (zwischen 13h30:24 und 13h30:25 ersichtlich).

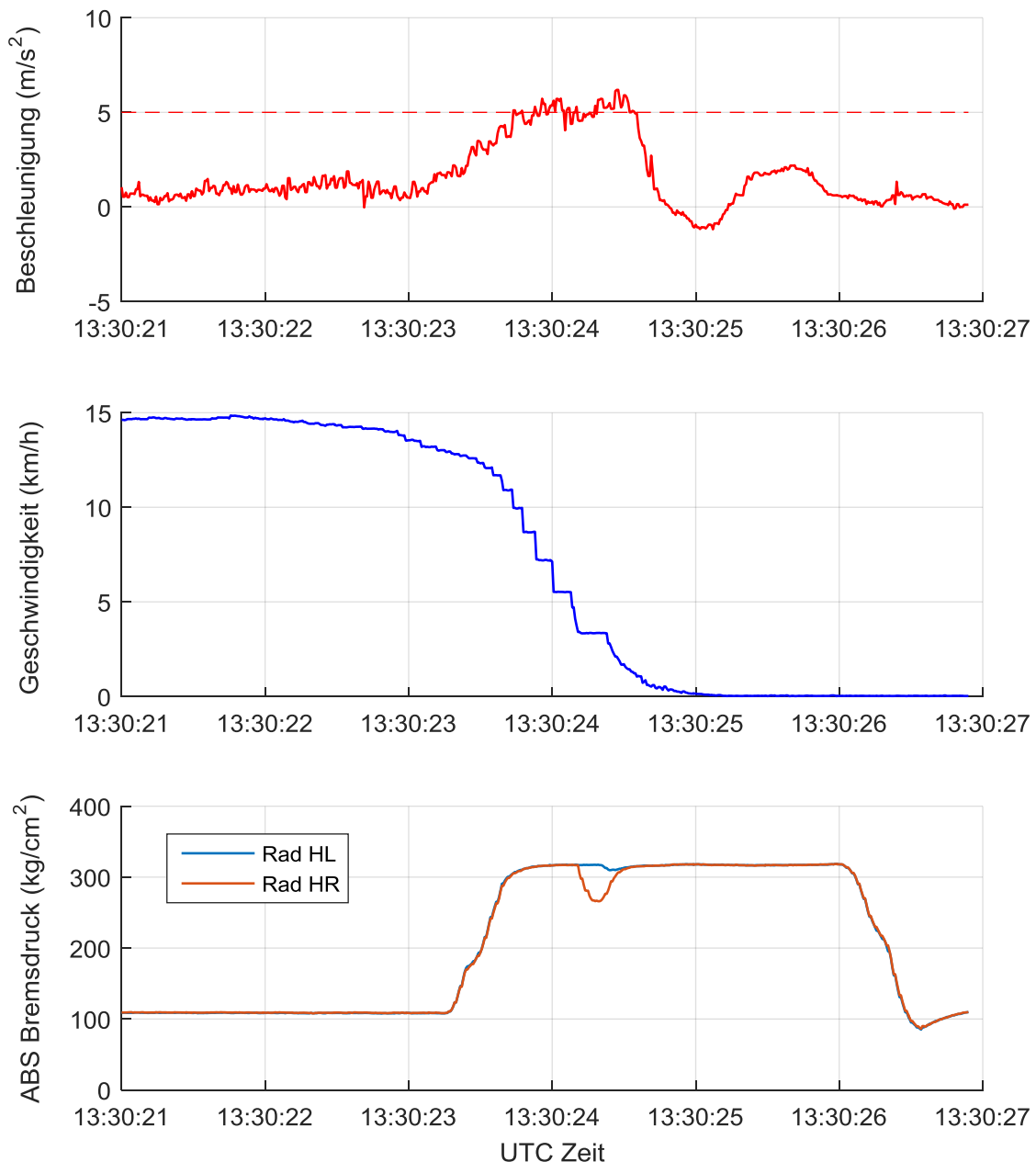


Abb. 27: Vollbremsung auf festem Untergrund:
Beschleunigung (oben), Geschwindigkeit (mittig) und Bremsdruck

⁴ Scheint gemäss VTS (Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge) Art. 65 und ECE (Economic Commission for Europe) R13, 71/320/EWG in Ordnung zu sein.

5.3 Verhalten bei einer Vollbremsung auf nass-/schlammigem Untergrund (leer)

Zwischen den Punkten A und B in Abbildung beginnt der Druckaufbau innerhalb 0.5 s. Nach Punkt B wird der Druck wieder reduziert wobei Rad HL einen schlechteren Reibungswert hatte. Ab Punkt C steht das Fahrzeug. Es wurde eine Verzögerung von rund 3 m/s^2 erreicht, was gegenüber der Vollbremsung auf trockener Fahrbahn einer Minderung um 2 m/s^2 entspricht.

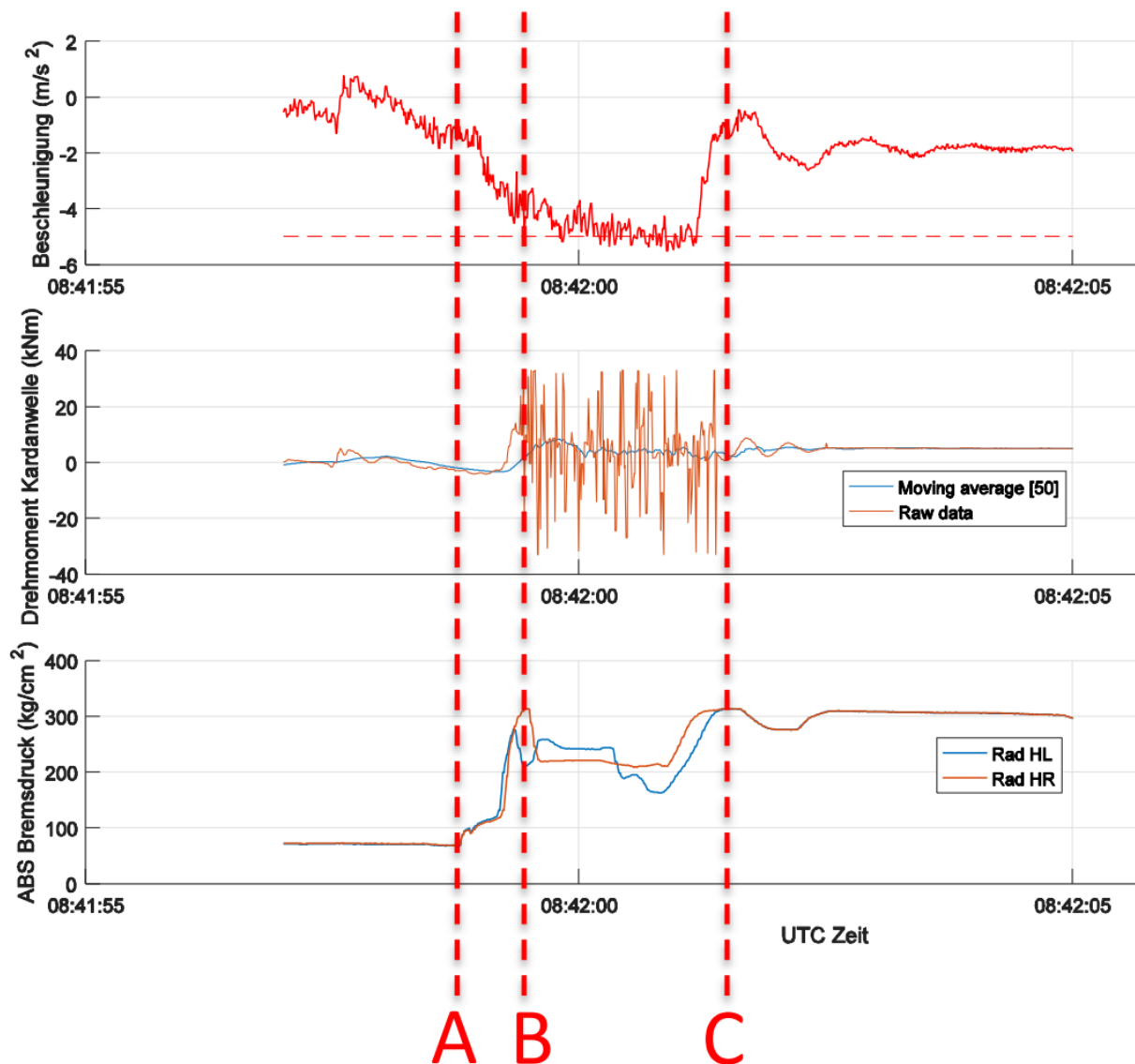


Abbildung 28: Vollbremsung auf nass-/schlammigem Untergrund: Beschleunigung (oben), Geschwindigkeit (mittig) und Bremsdruck

6 Schlussfolgerungen

- [1] Beim Anfahren am Hang sowie vollbeladenem Fahrzeug lagen die maximalen Drehmomente zwischen 14 kNm bis 17 kNm bei einer Hangneigung von jeweils 8° bis 11°.
- [2] Beim Bergauffahren (leerem Fahrzeug) lässt die Motorleistung von 533 kW eine Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h bis 30 km/h zu (abhängig von der aktuellen Steigung und dem eingelegten Gang).
- [3] Der mechanische Energiebedarf für eine Route von der Entladestation/Steinbrecher bis zu der Stelle wo das Fahrzeug beladen wird (Bergfahrt), beträgt 37.2 kWh \pm 1.5 kWh. Daraus Resultiert ein geschätzter elektrischer Energiebedarf von 48.3 kWh \pm 1.8 kWh.
- [4] Der mechanische Energiebedarf für eine Talfahrt (vom Punkt wo das Fahrzeug beladen wird bis hin zur Entladestation) beträgt im Mittel -20.1 kWh bei einer Standardabweichung von \pm 1.9 kWh. Dieser Wert enthält nur die Energie, welche über das System Kardanwelle => Motorbremse umgewandelt wird. Im Mittel wird bei der Betätigung der Motorbremse mit -188 kW \pm 75 kW abgebremst.

Zurückgerechnet kann der Batterie eine Bremsenergie von -25.5 kWh \pm 4.2 kWh zugeführt werden.

- [5] Eine Bergfahrt benötigte in jedem Fall rund 20 kWh bis 30 kWh mehr Energie pro Zyklus, als durch die Talfahrt wieder zurückgewonnen werden kann. Die Idee des PlusEnergie-Fahrzeugs konnte nicht bestätigt werden.

Anhang

Auftrag

Auftrag gemäss Arbeitspakete und Zeitplan E-Dumper Projekt vom 17.11.2016

Beschreibung:

Dynamische Messung Drehzahl und Drehmoment an Kardanwelle zw. Getriebe und Differenzial im Abbau, Abfahren der Förderrouen.

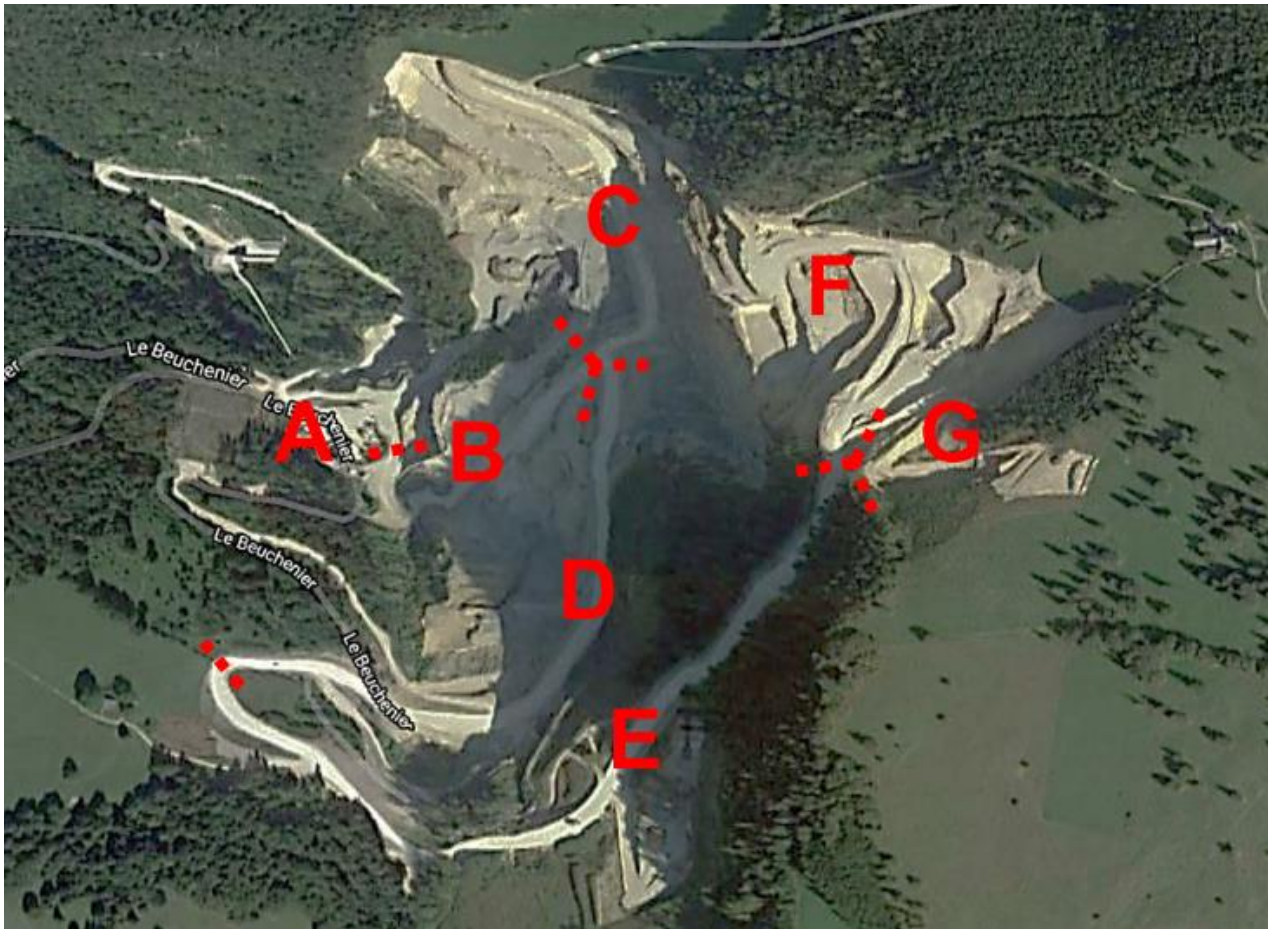
Aktivitäten:

- 1) Datenerfassung mit geeignetem Messsystem
- 2) Aufbau Messsysteme und Testphase
- 3) Auswertung der Messergebnisse

Ziele:

- 1) Definition relevanter Kenngrössen
- 2) Ermittlung der Lastprofile (Drehmoment, Leistung, Drehzahl über Zeit, Maximalwerte)
- 3) [Dynamisches Modell für Simulation weiterer Use-Cases \(nicht im Auftrag enthalten\)](#)

Positions-Marker Definitionen



Beispiel 1:

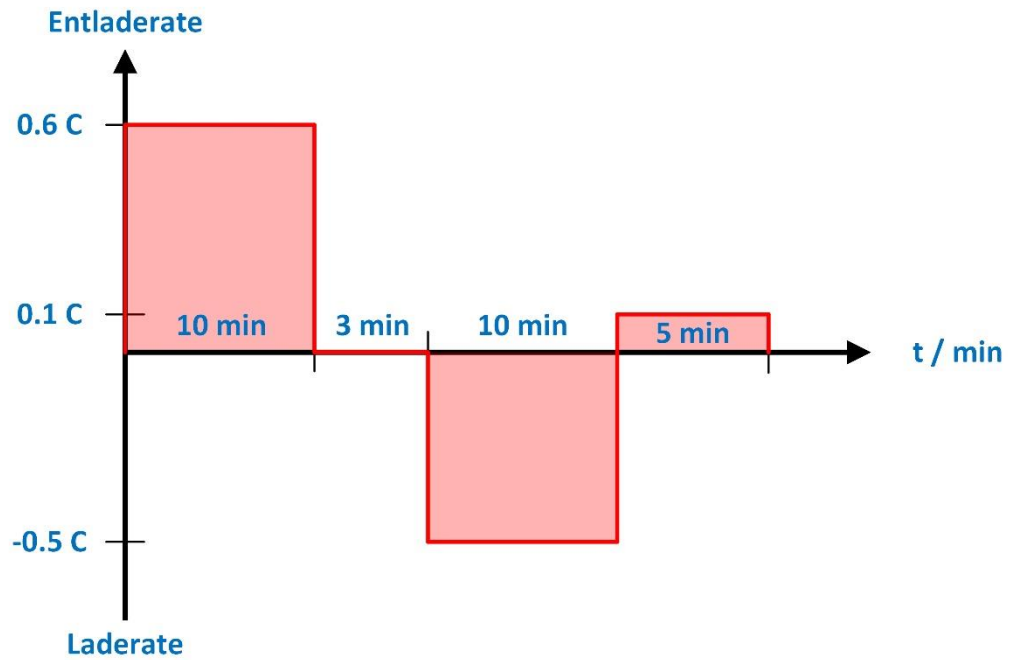
Eine Fahrt vom Punkt F, von wo das Fahrzeug beladen wird, hinunter zum Ort A, wo das Fahrzeug beim Steinbrecher entladen wird, wird als Talfahrt F-A bezeichnet.

Beispiel 2:

Die Messungen zur Bestimmung des Drehmoments beim Anfahren am Hang, wurden vorwiegend auf der Nebenpiste bei Punkt E durchgeführt.

Vereinfachtes Fahrprofil (Lade- Entladekurve für das Thermalmanagement der Fahrzeug-Batterie)

Annahme: 800 kWh Fahrzeug-Batterie



Kalibrierung der Messwelle bei der Firma OSWALD

Bevor die Messungen auf dem Fahrzeug durchgeführt werden können, muss eine dynamische Kalibrierung erfolgen, damit die Beziehung zwischen der Spannung und dem Drehmoment an der Kardanwelle bekannt sind. Dies erfordert einen leistungsfähigen Motor und eine ebenso grosse Bremse. Dies führte dazu, dass die Kalibrierung bei dem Unternehmen Oswald (DE) erfolgte. In der folgenden Abbildung ist die Kardanwelle zu erkennen, wie sie zwischen einem elektrischen Motor (der liefert die Leistung) und einem elektrischen Generator (der bremst die Umdrehung) angeordnet ist. Damit das exakte Drehmoment bekannt ist, wird ein Messflansch auf dem Prüfstand montiert.

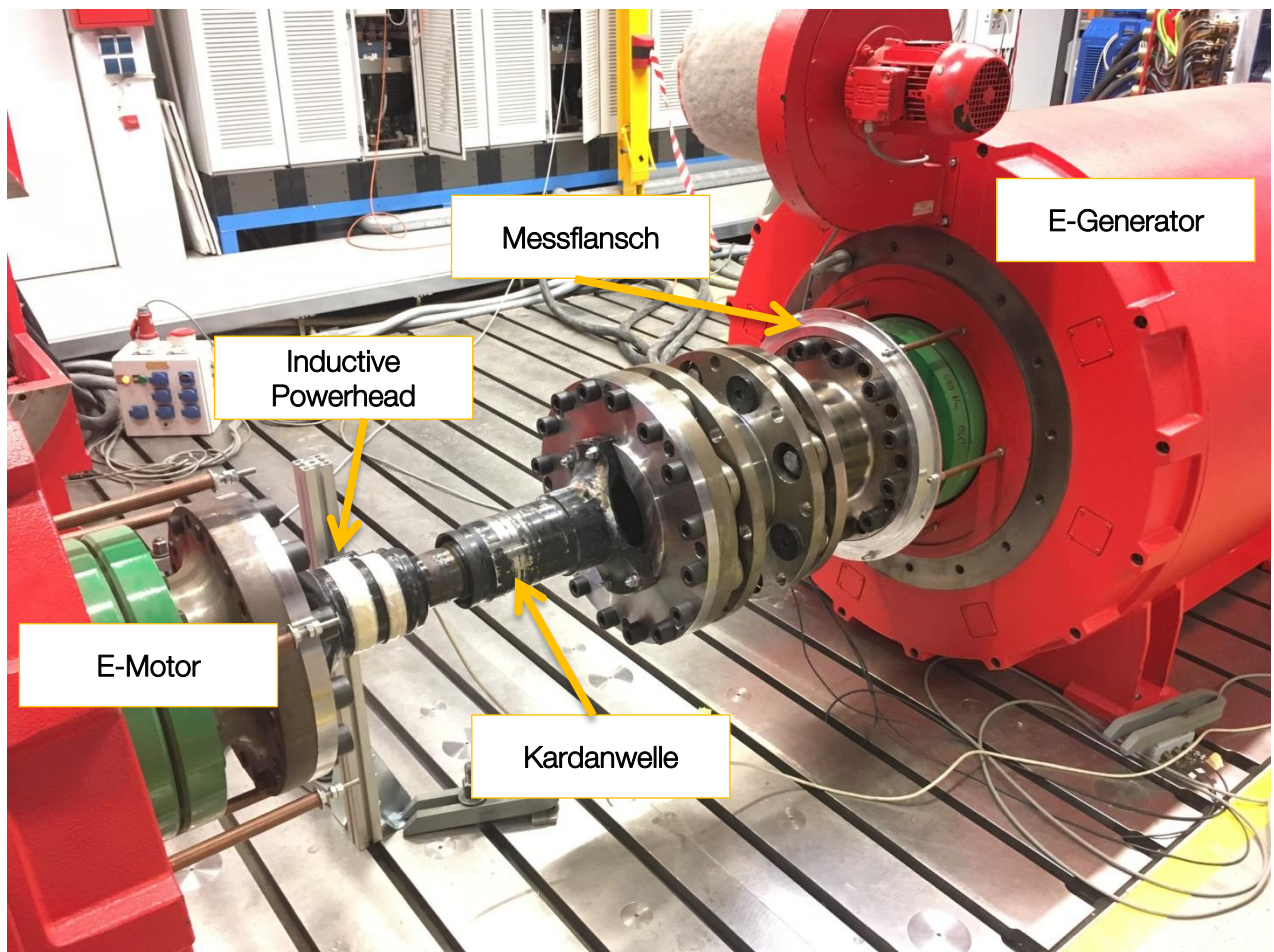


Abb. 29: Kalibrierung auf dem Prüfstand

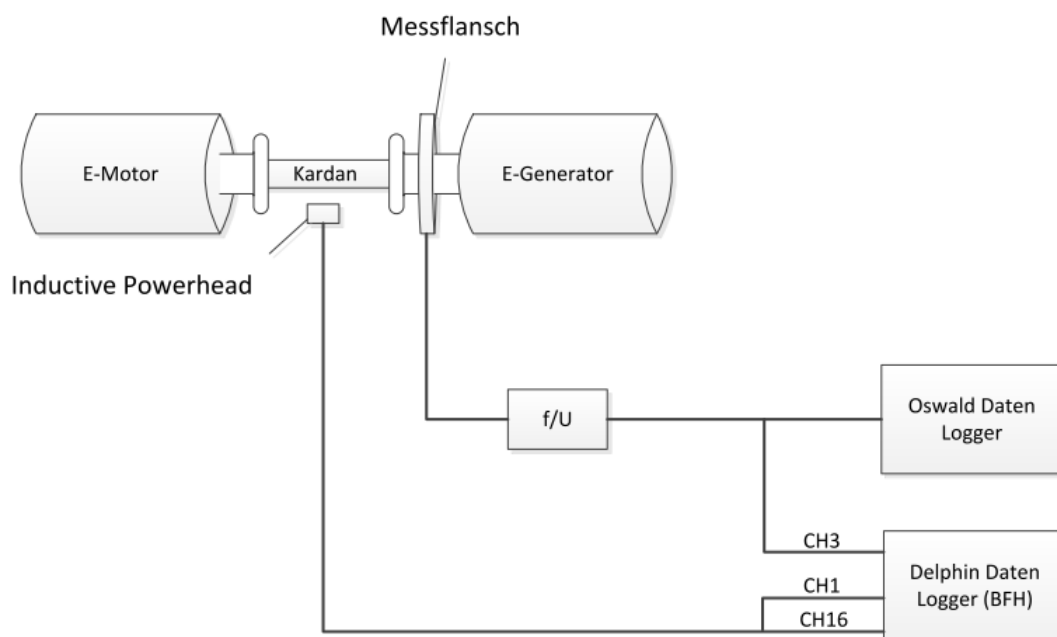


Abb.30: Kalibrierkonzept

Um das Messsystem zu kalibrieren, wurde eine Geschwindigkeit von 50 rpm benutzt. Im Verlauf vom Test wird all 30 Sekunden, das Drehmoment schrittweise erhöht. (1 bis 20 kNm)

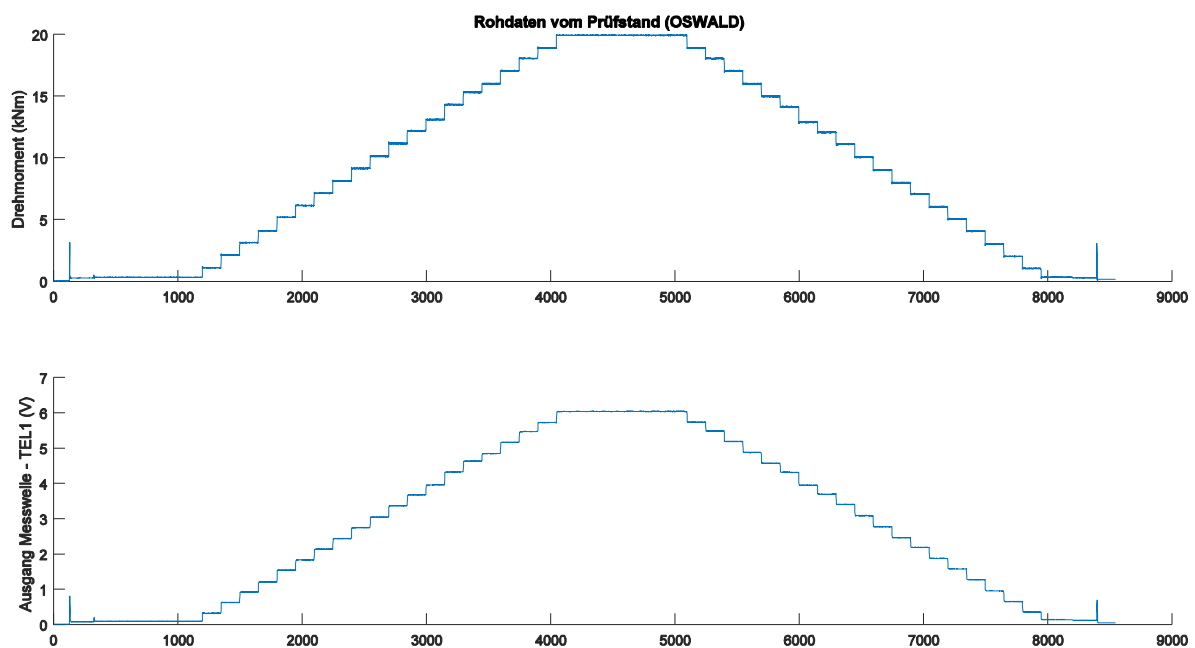


Abb.31: Kalibriervorgang des Drehmoments

Dadurch kann eine Funktion abgeleitet werden, welche in der Abbildung dargestellt ist und mit folgender Formel beschrieben wird:

$$f(x) = 0.3023 \cdot x + 0.009$$

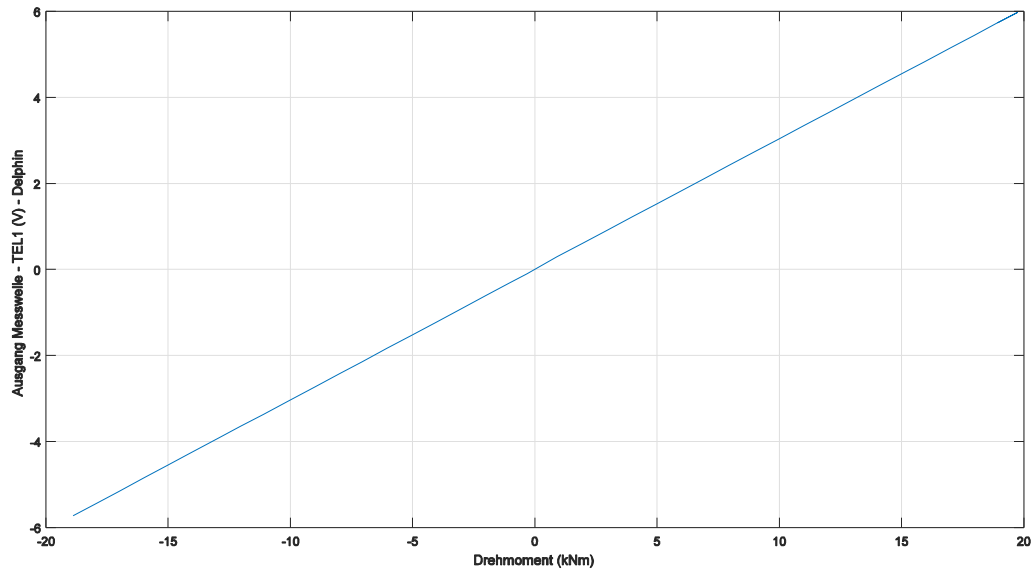


Abb.32: Beziehung Spannung - Drehmoment

Ein Vergleich zwischen den Messwerten dem Messsystem von Oswald und dem Messsystem der BFH (Delphin) erlaubt es Messfehler zu erkennen. Der maximale absolute Fehler entspricht 12.93 mV und ergibt ein Fehler von 13 Nm.

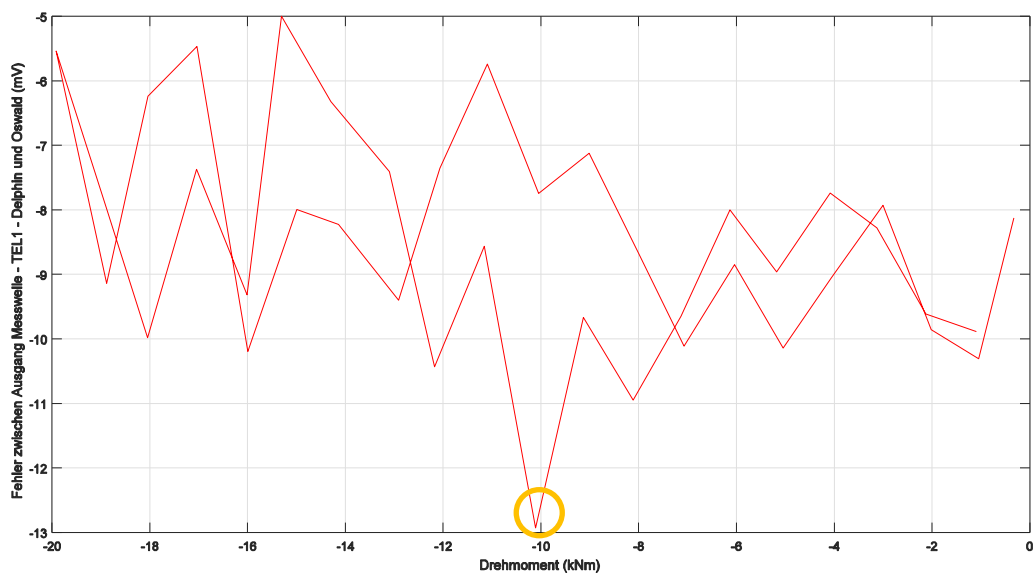


Abb.33: Messfehler

Die erzielten Ergebnisse und der maximale Fehler sind befriedigend. Die Messungen auf dem Fahrzeug wurden auf der Grundlage dieser Ergebnisse durchgeführt.

Orientierung des Fahrzeugs im dreidimensionalen Raum

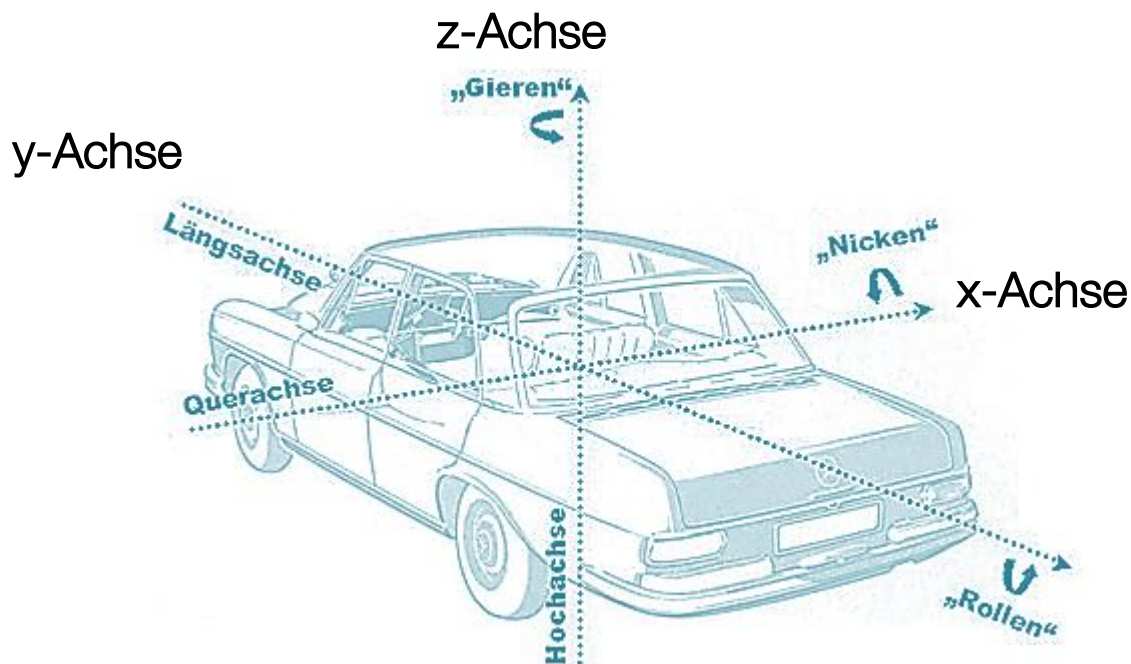


Abb.34: Die Orientierung des Fahrzeugs im dreidimensionalen Raum wird durch die Eulerwinkel (Lagewinkel) Roll-Nick-Gier-Winkel beschrieben

Bremsleistung nach Kategorien gemäss VTS Art. 65

2. PERFORMANCE OF BRAKING SYSTEMS OF VEHICLES OF CATEGORIES M AND N.

2.1. Service Braking System.

2.1.1. The service braking systems of vehicles of categories M and N shall be tested under the conditions shown in the following table:

Vehicle category		M ₂	M ₃	N ₁	N ₂	N ₃
Type of test ->		0-I	0-I-II or IIA	0-I	0-I	0-I-II
Type-0 test	v	60 km/h	60 km/h	80 km/h	60 km/h	60 km/h
with engine	S ≤	0.15v + (v ² /130)				
Disconnected	d _m ≥	5.0 m/s ²				
Type-0 test	v = 80% v _{max} but not exceeding:	100 km/h	90 km/h	120 km/h	100 km/h	90 km/h
with engine	S ≤	0.15v + (v ² /103.5)				
Connected	d _m ≥	4.0 m/s ²				
	F ≤	70 daN				

where: v = prescribed test speed
 S = stopping distance in metres
 d_m = mean fully developed deceleration (MFDD)
 F = force applied to foot control
 v_{max} = maximum speed of the vehicle



Abb.35: Installation des Messsystems auf dem Komatsu HD605

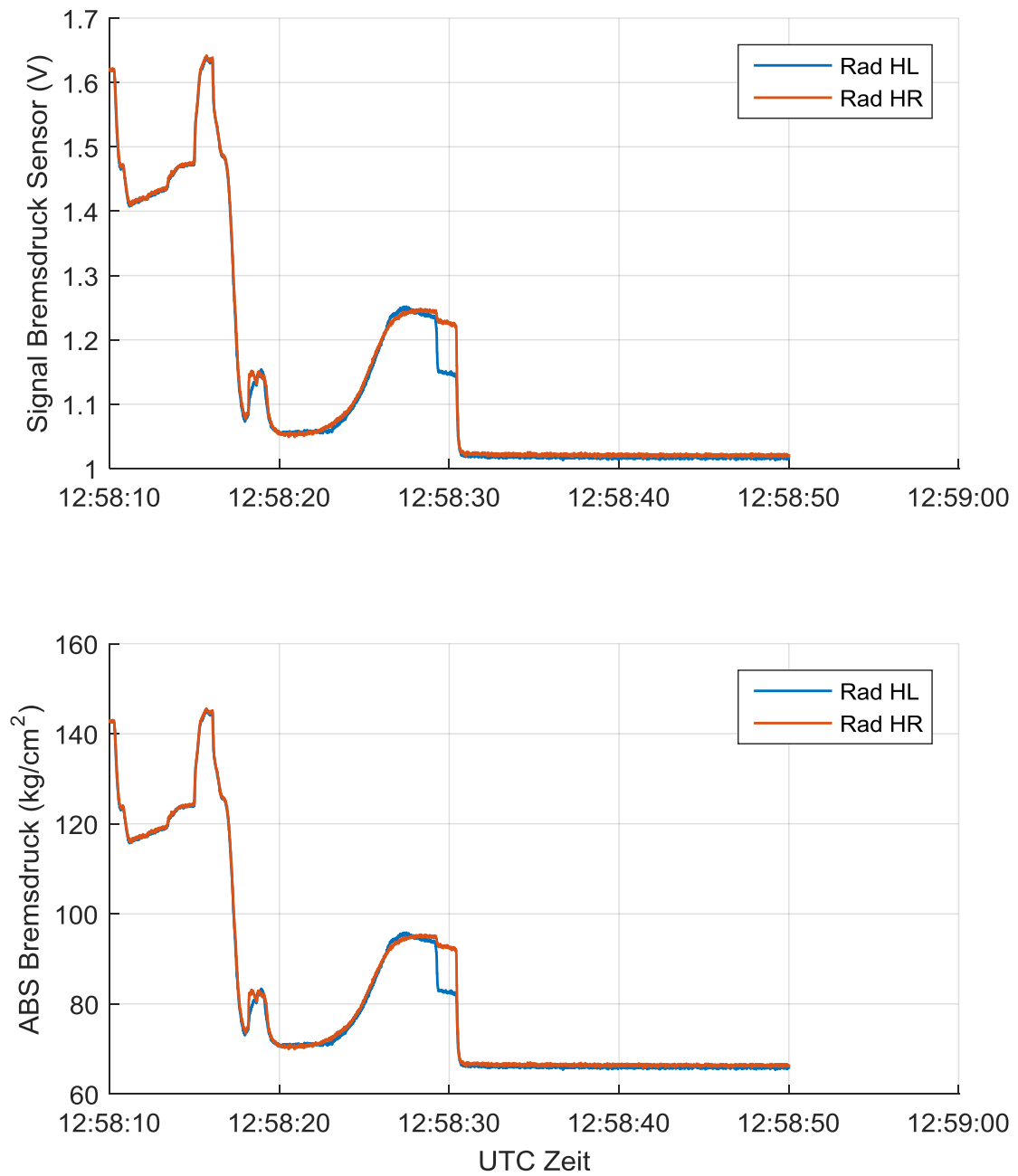


Abb.36: Anfahrvorgang detaillierter- Sensorsignal ABS Druck (oben) und Bremsdruck