

Online-Anhang

©Springer Fachmedien Wiesbaden 2017

Erik Bombach, Traktionskonzept für Lastenfahrrad.

Simulationsprotokolle

Die Protokolle der Simulation der Lastfälle sind nach folgendem Schema aufgebaut:

- Titel
- Visualisierung des Lastfalls
- Simulationsergebnisse
- Ausgewählte, relevante Diagramme
- Bemerkungen
- Fazit

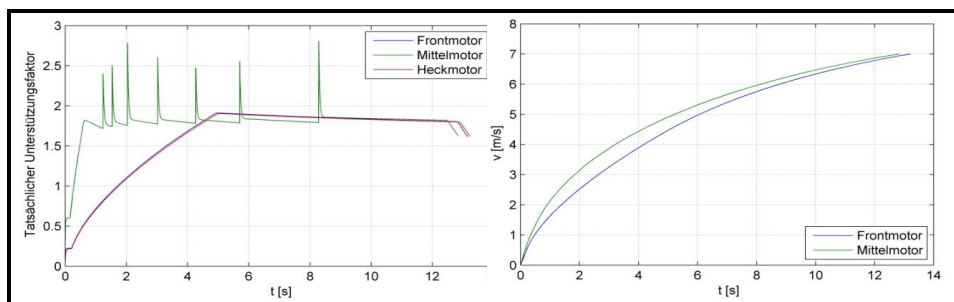
Die folgenden Lastfälle in dieser Reihenfolge aufgeführt:

1. Anfahren in der Ebene
2. Anfahren am Berg
3. Abbremsen bis Stillstand
4. Abbremsen bis Stillstand gefolgt von Beschleunigen (Ampelstopp)
5. Weite Ebene
6. Leichter Anstieg (100 Höhenmeter)
7. Steiler Anstieg (500 Höhenmeter)
8. Bergüberquerung
9. Stadt (Coswig - Pirna)
10. Gebirge (Clausthal-Zellerfeld - Brocken)
11. Land (Dresden - Freiberg)

1. Anfahren Ebene

U-faktor	2 1 0	
Tretleistung [W]	200 100 0	
Steigung [%]	5,00 0 -5,00	
Bremse vorn [Nm]	-50 -25 0	
Bremse hinten [Nm]	-50 -25 0	
Bedingung	v=7	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Zeit bis Abschluss [s]	verbrauchte elektrische Energie [J]	benötigte Strecke [m]	Verbrauch [J/m]	Wirkungsgrad Frontmotor	Wirkungsgrad Heck /Mitte	Motortemp. vorn bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte/Heck bei Abschluss [°C]
O-K	-	-	-	-	-	-	-	-
F-K	13,1	6210	62,9	99	66%	-	26,8	-
M-K	12,8	6360	64,4	99	-	72%	-	26,2
H-K	13,1	6220	62,6	99	-	66%	-	26,8
FM-K	13,2	6260	63,6	98	67%	72%	26,7	26,2
FH-K	13,3	6200	63,1	98	67%	66%	26,8	26,8
FM-T	13	6270	63,7	98	67%	72%	26,7	26,2
FH-T	13,3	6200	63,1	98	67%	66%	26,8	26,8

**Bemerkungen:**

Das unmotorisierte Fahrrad (O-K) erreicht nur 5,3 m/s.

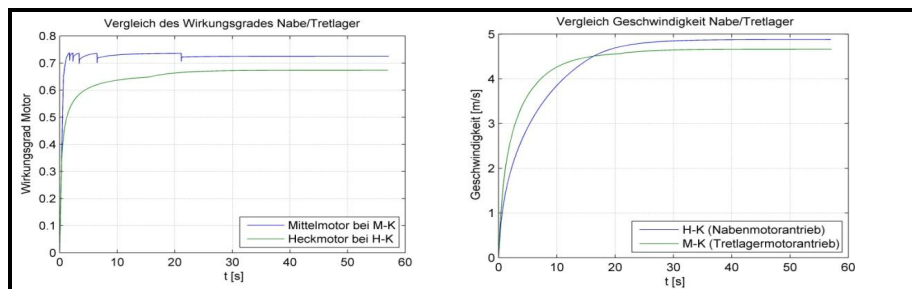
Fazit:

Trotz des grundlegend unterschiedlichen Verhaltens der tatsächlichen Unterstützung von Mittel- und Frontmotor sind die Kennwerte des Beschleunigungsvorganges quasi identisch. Der Mittelmotor arbeitet etwas effizienter und ist minimal effektiver. Der höhere Energiebedarf erklärt sich durch die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit und dem damit verbundenen Luftwiderstand sowie den Getriebeverlusten. Vor- oder Nachteile einer Mehrmotorenkonfiguration sind nicht erkennbar.

2. Anfahren am Berg

U-faktor	2 1 0	
Tretleistung [W]	200 100 0	
Steigung [%]	5,00 0 -5,00	
Bremse vorn [Nm]	-50 -25 0	
Bremse hinten [Nm]	-50 -25 0	
Bedingung	x=250	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Zeit bis Abschluss [s]	Erreichte Geschw. [m]	verbrauchte elektrische Energie [kJ]	Verbrauch [J/m]	Wirkungsgrad Frontmotor	Wirkungsgrad Heck/Mitte	Motortemp. vorn bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte/Heck bei Abschluss [°C]
O-K	153,8	1,6	-	-	-	-	-	-
F-K	57,0	4,9	30,6	122	65%	-	33,7	-
M-K	57,1	4,7	28,7	115	-	72%	-	29,8
H-K	57,0	4,9	30,7	123	-	65%	-	33,7
FM-K	56,8	4,8	29,8	119	65%	72%	33,9	29,7
FH-K	57,1	4,9	30,6	122	65%	65%	33,7	33,7
FM-T	56,8	4,8	29,8	119	66%	72%	33,3	30,0
FH-T	57,1	4,9	30,6	122	65%	65%	33,7	33,7



Bemerkungen:

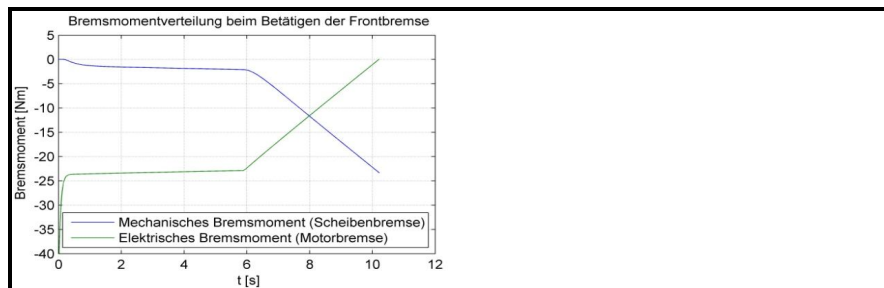
Fazit:

Beim Anfahren am Berg zeigt der Tretlagerantrieb leichte Vorteile in der Beschleunigung (rechtes Diagramm grüne Linie). Die erreichte Maximalgeschwindigkeit mit Tretlagermotor liegt allerdings leicht unter der des Nabenmotors. Aufgrund des Betriebes bei nur mittlerem Wirkungsgrad (linkes Diagramm) erwärmen sich Nabenmotoren deutlich stärker als Tretlagermotoren. Die Momentenverteilung in Abhängigkeit der Motortemperatur (Strategie T) gleicht dies bei kombiniertem Mittel- und Frontmotor etwas aus (vgl. Motortemperaturen bei FM-K gegen FM-T).

3. Abbremsen auf Stillstand

U-faktor	2 1 0	
Tretleistung [W]	200 100 0	
Steigung [%]	10,00 0 -10,00	
Bremse vorn [Nm]	-50 -25 0	
Bremse hinten [Nm]	-50 -25 0	
Bedingung	v=0	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Zeit bis Stillstand [s]	Bremsweg [m]	Rekup. elektrische Energie [J]	Ladezustand Supercap bei Abschluss	Maximale elektrische Bremsleistung [W]	Motortemp. vorn bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte bei Abschluss [°C]
O-K	10,2	35,2	-	-	-	-	-
F-K	10,2	33,8	1049	39,6%	270	26,4	-
M-K (schalten)	11,8	40,5	1367	44,6%	265	-	25,3
M-K	12,6	42,1	923	38,3%	265	-	25,3
FM-K (50:50)	11,3	37,5	989	39,0%	225	26,6	25,3
FM-K (hinten)	12,5	41,3	620	33,5%	268	25,0	26,0
FM-K (vorn)	10,1	33,8	525	31,7%	203	26,4	-

**Bemerkungen:**

Bremsmoment je nach Motorposition auf alle Motoren gleichmäßig verteilt. Startgeschwindigkeit 7m/s, Kondensatorladezustand am Start 20 %. Das Thermomanagement wirkt nicht auf Bremsmomente, FM-T ist daher gleichwertig mit FM-K. Immer 8. Gang außer 'M-K (schalten)'!

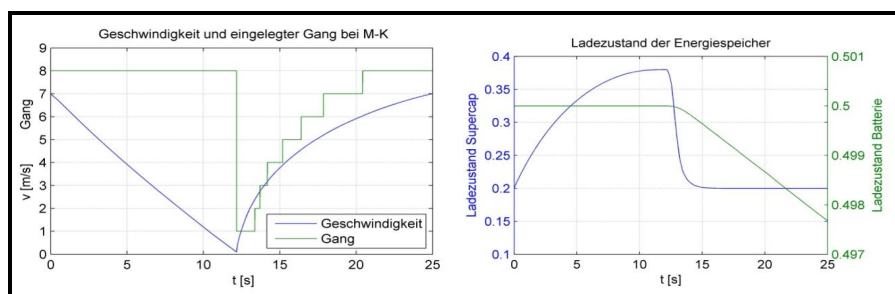
Fazit:

Die meiste Energie wird bei Nutzung des Mittelmotors zurückgewonnen, allerdings nur, wenn parallel zum Bremsen stufenweise heruntergeschaltet wird (M-K (schalten)). Da dies in der Realität eher selten der Fall ist, verliert der Mittelmotor den Vorteil des Schaltgetriebes und läuft wie die Nabenmotoren kinematisch gekoppelt mit. Dadurch ist die rekuperierte Energie beim Mittelmotor (M-K), zumindest im höchsten Gang, niedriger als beim Nabenmotor (M-K). Bei Nutzung eines Mehrmotorantriebes halbiert sich aufgrund der kleineren Motoren die rekuperierte Energie, wenn nur eine Bremse gezogen wird (FM-K vorn bzw. hinten). Hier ist es energetisch sinnvoll, immer beide Bremsen synchron zu nutzen (FM-K 50:50). Die erreichte Ladeleistung (270 W) ist kleiner als die maximale Leistungsaufnahme der Batterie (550 W), bei schwachem Abbremsen ist ein Supercap also unnötig.

4. Ampelstopp

U-faktor	2 1 0		
Tretleistung [W]	200 100 0		
Steigung [%]	10,00 0 -10,00		
Bremse vorn [Nm]	-25 -12,5 0		
Bremse hinten [Nm]	-25 -12,5 0		
Bedingung	v=0	v=7	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Zeit bis Abschluss [s]	Verbrauchte elektrische Energie [J]	Rekup. elektrische Energie [J]	Energieeinsparung durch Rekup. [J]	Maximale elektrische Antriebsleistung [W]	Motortemp. vorn bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte bei Abschluss [°C]
O-K	-	-	-	-	-	-	-
F-K	23,1	6210	1049	16,9%	583	28,1	-
M-K	25,0	6360	923	14,5%	871	-	26,5
M-K (schalten)	24,1	6360	1367	21,5%	881	-	26,5
FM-K	23,9	6260	989	15,8%	692	28,1	26,5
FM-T	23,9	6270	989	15,8%	693	28,1	26,6

**Bemerkungen:**

Bremsmoment je nach Motorposition gleichverteilt. Bei Mehrmotorenbetrieb werden Front- und Heckbremse synchron betätigt. Startgeschwindigkeit 7 m/s, Kondensatorladezustand am Start 20 %. Kein Herunterschalten beim Bremsen, außer 'M-K (schalten)'.

Fazit:

Der Ampelstopp ist eine Kombination aus Bremsen bis zum Stillstand und Beschleunigen auf Nenngeschwindigkeit und liefert daher die selben Energieverbräuche bzw. Rekuperationen wie die Einzelversuche. Verdeutlicht wird mit diesem Lastfall das Energieeinsparpotential durch Rekuperation, welche im Optimalfall, Mittelmotor mit stufenweisem Herunterschalten (M-K schalten), über 20 % beträgt. Wird nicht mitgeschalten (M-K und linkes Diagramm), werden nur zwei Drittel dieses Betrages rekuperiert. Die im Supercap zwischengespeicherte Energie wird beim Anfahren schnell aufgebraucht, versorgt aber die Stromspitze beim Anfahren und schont damit den Akku (Diagramm rechts).

5. Weite Ebene

U-faktor	2 1 0	
Tretleistung [W]	200 100 0	
Steigung [%]	10,00 0 -10,00	
Bremse vorn [Nm]	-25 -12,5 0	
Bremse hinten [Nm]	-25 -12,5 0	
Bedingung	x=20.000	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Durchschnittsgeschw. [m/s]	Verbrauchte elektrische Energie [kJ]	Verbrauch [J/m]	Akkuzustand bei Abschluss	Reichweite [km]	Wirkungsgrad Motor vorn	Wirkungsgrad Motor Mitte	Motortemp. vorn bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte bei Abschluss [°C]
O-K	3,64	-	-	-	-	-	-	-	-
F-K	6,24	706	35,3	76,7%	85,8	76,8%	-	45,6	-
M-K	6,18	721	36,1	76,2%	84,0	-	77,3%	-	48,0
FM-K	6,21	713	35,7	76,4%	84,7	76,9%	77,3%	45,9	47,7
FM-T	6,21	713	35,7	76,4%	84,7	76,9%	77,3%	46,2	47,3

Bemerkungen:

Startgeschwindigkeit 6 m/s.

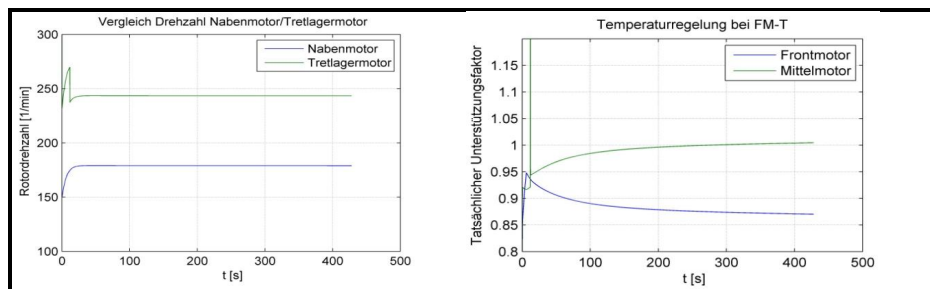
Fazit:

Bei dem Durchqueren einer weiten Ebene ist das Pedelec mit einem einzelnen Nabenmotor am frühesten am Ziel und hat zudem am wenigsten Energie verbraucht. Der Mittelmotor dissipiert durch das Betreiben eines für diesen Lastzustand nutzlosen Getriebes rund 5 % seiner Energie. Die Abstände zwischen den Motorisierungen sind allerdings sehr gering. Die Mehrmotorvarianten sind der Mittelwert der beiden Einzelantriebe.

6. Leichter Anstieg (100 Höhenmeter)

U-faktor	2 1 0	
Tretleistung [W]	200 100 0	
Steigung [%]	5,00 0 -5,00	
Bremse vorn [Nm]	-50 -25 0	
Bremse hinten [Nm]	-50 -25 0	
Bedingung	x=2000	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Zeit bis Abschluss [s]	Verbrauchte elektrische Energie [kJ]	Verbrauch [J/m]	Ladezustand Batterie bei Abschluss	Geschätzte Reichweite [km]	Motortemp. Front bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte bei Abschluss [°C]	Motortemp. Heck bei Abschluss [°C]
O-K	1118	-	-	-	-	-	-	-
F-K	418	239	119	91,5%	23,5	63,1	-	-
M-K	442	217	109	92,4%	26,3	-	43,5	-
H-K	418	239	119	91,5%	23,5	-	-	63,1
FM-K	428	231	116	91,8%	24,4	65,4	46,8	-
FH-K	418	239	119	91,5%	23,5	63,1	-	63,1
FM-T	428	230	115	91,9%	24,7	59,7	50,3	-
FH-T	418	239	119	91,5%	23,5	63,1	-	63,1

**Bemerkungen:**

Startgeschwindigkeit 4 m/s
100 Höhenmeter auf 2 km = 5 % Steigung

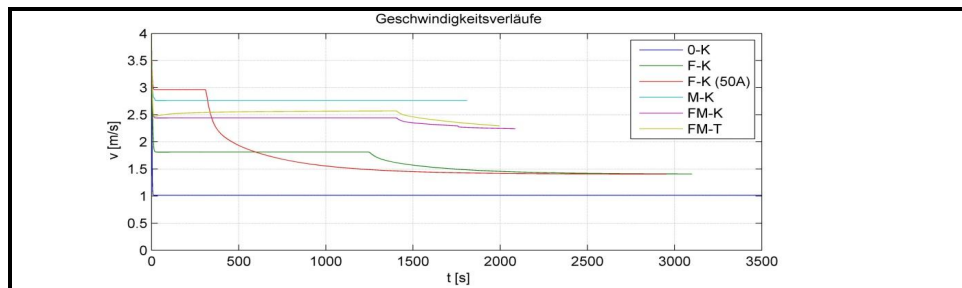
Fazit:

Die Ergebnisse der leichten Bergfahrt mit verschiedenen Konfigurationen unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Der Mittelmotor arbeitet aufgrund der höheren Drehzahl (linkes Diagramm, Nenndrehzahl=275 1/min) effizienter und der Nabenmotor bringt etwas mehr Leistung, allerdings auf Kosten der Reichweite und Motortemperatur. Die Betriebsstrategie der Temperaturregelung ist der konstanten Momentenverteilung leicht überlegen (FM-K vs FM-T): Bei gleicher Fahrleistung sinkt der Energieverbrauch, da der effizientere Mittelmotor bevorzugt wird (rechtes Diagramm).

7. Steiler Anstieg (500 Höhenmeter)

U-faktor	2 1 0	
Tretleistung [W]	200 100 0	
Steigung [%]	10,00 0 -10,00	
Bremse vorn [Nm]	-50 -25 0	
Bremse hinten [Nm]	-50 -25 0	
Bedingung	x=5000	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Zeit bis Abschluss [s]	Verbrauchte elektrische Energie [kJ]	Verbrauch [J/m]	Ladezustand Batterie bei Abschluss	Geschätzte Reichweite [km]	Motortemp. Front bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte bei Abschluss [°C]	Wirkungsgrad Front bei t=100s	Wirkungsgrad Mitte bei t=100s
O-K	4912	-	-	-	-	-	-	-	-
F-K	3099	676	135	77,6%	22,3	124,0	-	53,5%	-
F-K (50A)	2967	740	148	74,0%	19,2	124,4	-	50,5%	-
M-K	1810	930	186	66,5%	14,9	-	86,5	-	73,5%
FM-K	2086	905	181	68,1%	15,7	127,1	108,8	58,0%	73,5%
FM-T	1996	940	188	66,5%	14,9	127,0	120,0	59,0%	71,5%

**Bemerkungen:**

Startgeschwindigkeit 4 m/s
 500 Höhenmeter auf 5 km = 10 % Steigung
 Motor-Maximaltemperatur = 130 °C

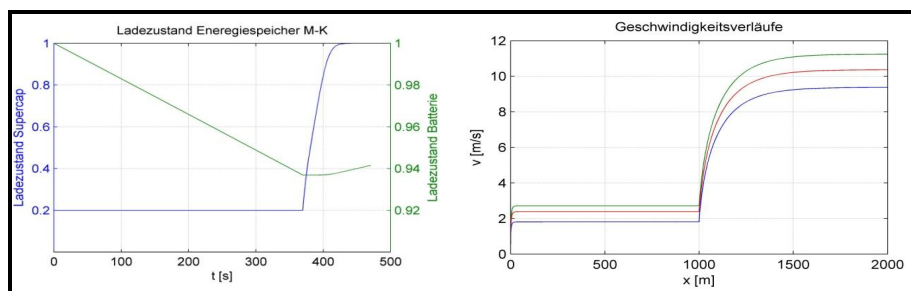
Fazit:

Bei steilen Anstiegen werden die Antriebscharakteristika der Positionierungskonzepte deutlich. Der reine Nabenmotor (F-K) läuft dauerhaft an der maximalen Strombegrenzung von 30 A und schafft es nicht, diesen sehr ineffizienten Betriebsbereich zu verlassen. Auch eine Erhöhung des maximalen Motorstromes auf 50 A (F-K 50A) bringt zwar eine kurze Leistungssteigerung, allerdings überhitzt der Motor umso schneller und regelt herunter. Der Tretlagermotor schafft aufgrund des Schaltgetriebes den Anstieg ohne Überhitzung und ist hier der klare Sieger, der höhere Energieverbrauch liegt in der durchweg anliegenden Motorunterstützung begründet. Die Mehrmotorvarianten liegen zwischen den beiden Extremen, wobei das thermische Management aufgrund der Bevorzugung des Mittelmotors etwas besser als die konstante Momentenverteilung abschneidet.

8. Bergüberquerung

U-faktor	2 1 0		
Tretleistung [W]	200 100 0		
Steigung [%]	10,00 0 -10,00		
Bremse vorn [Nm]	-25 -12,5 0		
Bremse hinten [Nm]	-25 -12,5 0		
Bedingung	x=1000	x=2000	

Konfiguration und Betriebsstrategie	Fahrzeit [s]	Verbr. elektrische Energie [kJ]	Rekup. Energie [kJ]	Tatsächlich verbrauchte Energie [kJ]	Energie-einsparung durch Rekup.	Verbrauch [J/m]	max. elektr. Antriebsleistung [W]	max. elektr. Bremsleistung [W]
O-K	1140	-	-	-	-	-	-	-
F-K	676	166	41,9	124	25,2%	62,1	597	405
M-K	470	181	24,8	156	13,7%	78,1	567	279
FM-K	513	184	33,9	150	18,42%	75,1	580	354
FM-T	500	188	33,9	154	18,03%	77,1	580	354

**Bemerkungen:**

Start aus Stillstand. Bremsverteilung je nach Motorisierung gleichmäßig auf alle Motoren. Kein Herunterschalten beim Bremsen.

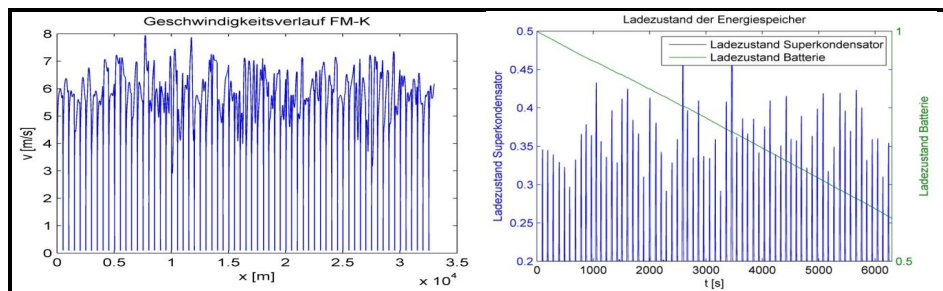
Höhendifferenz 100 m. Die Steigung wurde so gewählt, dass weder beim Anstieg noch beim Rekuperieren ein Motor überhitzt.

Fazit:

Im Bereich der Steigung sind die Ergebnisse äquivalent zum Versuch 'leichte Steigung'. Bei der Talfahrt stellen sich trotz des gleichen Sollbremsmomentes unterschiedliche Geschwindigkeiten ein (rechtes Diagramm: grün=M-K, rot=FM-K, blau=F-K). Dies liegt an der Nichtbeachtung der verschiedenen Radgrößen im Sollmomentgeber der Motoren. Durch den kleineren Raddurchmesser vorn ist die wirkende Bremskraft bei gleichem Bremsmoment größer und die sich einstellende Geschwindigkeit kleiner (rechtes Diagramm blau). Die schwächere Rekuperation des Mittelmotors erklärt sich durch das hinter dem Motor liegende Schaltgetriebe: Im Beispiel wird durch die hohe Geschwindigkeit bergab ein hoher Gang eingelegt und das Motormoment verkleinert, wodurch nur etwa das halbe elektrische Bremsmoment tatsächlich am Rad anliegt und das Fehlmoment durch die mechanische Bremse zugesteuert wird. Letzteres dissipiert Energie, welche letztendlich nicht rekuperiert wird. Prinzipiell ist durch eine Erweiterung des Bremsmomentgebers um einen Koeffizienten für Raddurchmesser sowie eine Gangerkennung für den Mittelmotor eine höhere Rekuperation als beim Radnabenmotor möglich (siehe Versuch 'Abbremsen auf Stillstand'). Der Supercap kann nur einen kleinen Teil der Bremsenergie aufnehmen, seine Kapazität ist schnell erreicht und die Batterie muss aushelfen (linkes Diagramm).

9. Stadt (Radebeul - Pirna)						
U-faktor	2 1 0				x 33 n=1...33	
Tretleistung [W]	150 100 0					
Steigung [%]	5,00 0 -5,00					
Bremse vorn [Nm]	-25 -12,5 0					
Bremse hinten [Nm]	-25 -12,5 0					
Bedingung		v=0	v=5	x=n*500		x=33000

Konfiguration und Betriebsstrategie	Fahrtzeit	Verbr. elektr. Energie	Rekup. Energie	Tatsächlich verbrauchte Energie	Energieeinsparung durch Rekup.	Verbrauch	Akkuzustand bei Abschluss	Reichweite
	[h:min]	[kJ]	[kJ]	[kJ]		[J/m]		[km]
O-K	02:51	-	-	-	-	-	-	-
F-K	01:43	1259	57,5	1202	4,57%	36,4	58,80%	80,1
F-K-V	01:44	1247	57	1190	4,57%	36,1	59,20%	80,9
M-K	01:47	1240	53,2	1187	4,29%	36,0	59,40%	81,3
M-K-V	01:48	1227	53,3	1174	4,34%	35,6	59,90%	82,3
FM-K	01:45	1250	54,9	1195	4,39%	36,2	59,10%	80,7
FM-K-V	01:46	1238	54,5	1184	4,40%	35,9	59,60%	81,7
FM-T	01:45	1251	44,9	1206	3,59%	36,5	58,90%	80,3
FM-T-V	01:46	1238	44,6	1193	3,60%	36,2	59,30%	81,1

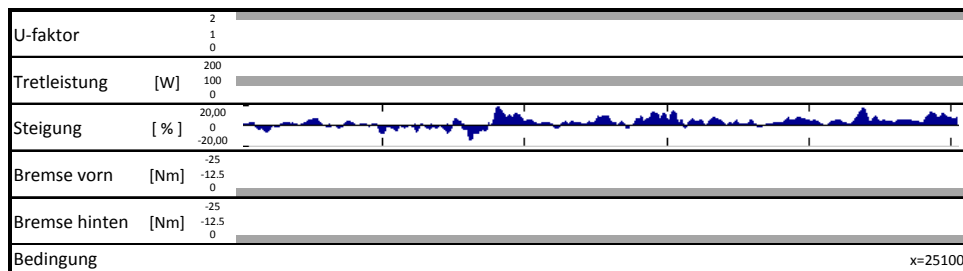
**Bemerkungen:**

Ein Stopp alle 500 m. Anfahren mit 150 W Tretleistung, ab 5 m/s 100 W. Bremsen mit 25 Nm, je nach Motorposition einzeln oder gleichmäßig verteilt. Kein Herunterschalten beim Bremsen. Der oben gezeigte Höhenverlauf verläuft parallel zu den 33 Stopps.

Fazit:

In der Stadtfahrt bringt der Frontmotor etwas mehr Unterstützung als der Mittelmotor und verkürzt die Fahrtzeit etwas, allerdings auf Kosten des Energieverbrauches. Insgesamt sind die Unterschiede sehr gering, dass keine Antriebsvariante deutliche Vorzüge zeigt. Durch Rekuperation kann rund 4 % Energie eingespart werden. Die Motortemperatur bleibt bei allen Varianten in einem unkritischen Bereich.

10. Gebirge (Clausthal-Zellerfeld - Brocken)



Konfiguration und Betriebsstrategie	Fahrzeit [h:min]	Verbrauchte elektrische Energie [kJ]	Verbrauch [J/m]	Akkuzustand bei Abschluss	Reichweite [km]	Wirkungsgrad Motor vorn	Wirkungsgrad Motor Mitte	Motortemp. vorn bei Abschluss [°C]	Motortemp. Mitte bei Abschluss [°C]
O-K	05:03	-	-	-	-	-	-	-	-
F-K	02:38	1632	65,0	44,6%	68,59	59,5%	-	124,4	-
F-K-V (1km)	02:41	1586	63,2	46,4%	70,90	59,9%	-	124,4	-
F-K-V (5km)	02:43	1551	61,8	47,6%	70,90	59,9%	-	124,4	-
F-K-V (empfindl.)	02:43	1542	61,4	48,0%	72,52	60,1%	-	124,4	-
M-K	02:06	1627	64,8	44,4%	68,35	-	75,5%	-	67,6
M-K-V	02:12	1522	60,6	48,3%	73,50	-	74,3%	-	64,4
FM-K	02:12	1702	67,8	41,8%	65,29	64,1%	74,0%	127,5	85,1
FM-K-V	02:18	1601	63,8	45,5%	69,7	64,4%	72,8%	127,5	80,8
FM-T	02:07	1745	69,5	39,9%	63,2	65,4%	73,8%	127,4	93,8
FM-T-V	02:13	1639	65,3	43,9%	67,7	65,8%	73,0%	127,3	88,4

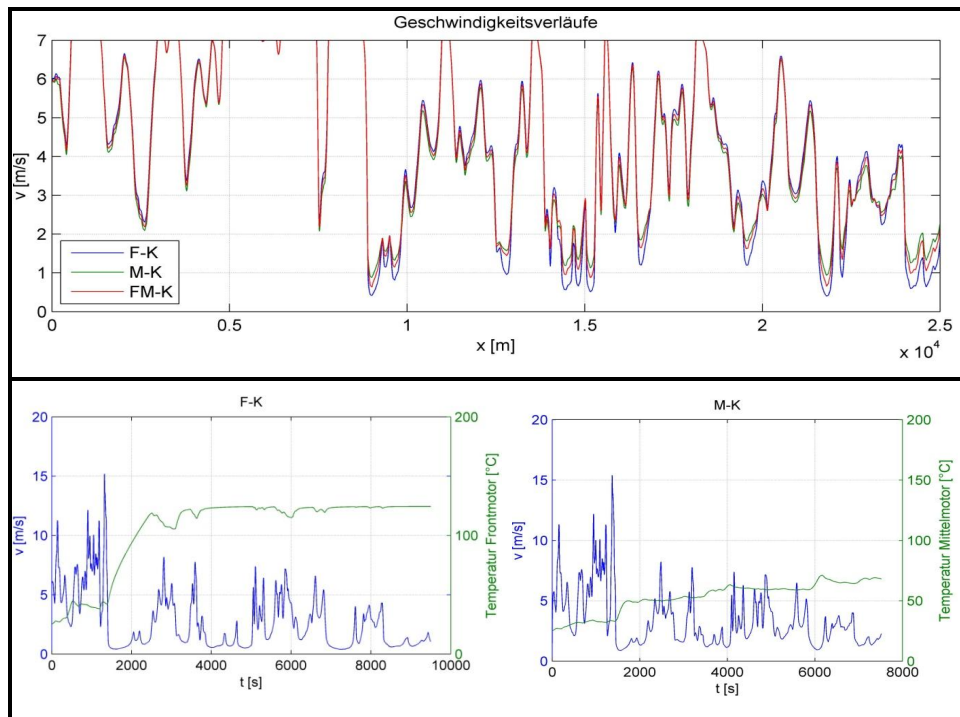
Bemerkungen:

Durchgehendes Fahren mit 100 W Tretleistung ohne Stopps, Dauerhaftes Treten, auch bergab.

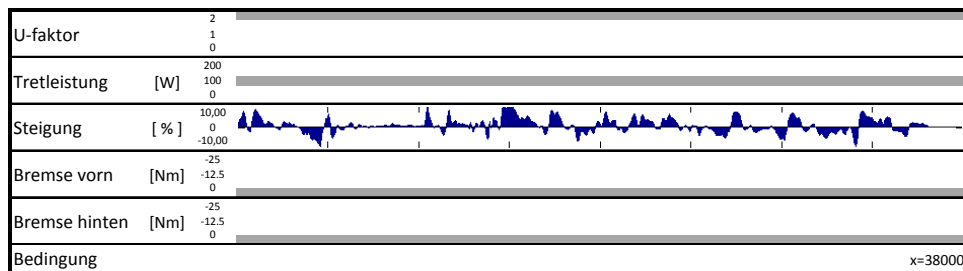
Fazit:

Während des ersten steilen Anstieges kommt der Nabenmotor (F-X) an seine thermische Grenze und regelt auf Nennmoment herab. Dieses reicht allerdings nicht, um das Fahrrad auf einer fahrbaren Geschwindigkeit zu halten (oberes Diagramm blau, und unten links). Auch die prädiktive Motorregelung verzögert dies nur kurz und bringt keine nennenswerten Vorteile. Ein Nabenmotor ist für diesen Lastfall völlig ungeeignet. Der Anstieg ist nur mit einem Mittelmotor erklimmbar, welcher die Gangschaltung mitnutzt und damit in einem besseren Wirkungsgrad mit geringerer Wärmeentwicklung läuft (oberes Diagramm grün, und unten rechts).

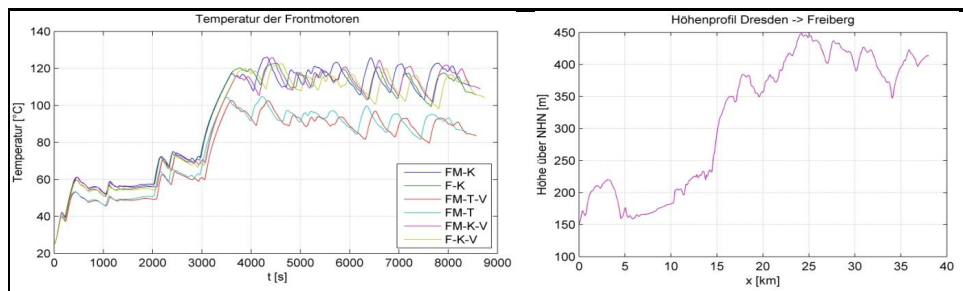
Abbildungen zu Lastfall 10:



11. Land (Dresden - Freiberg)



Konfiguration und Betriebsstrategie	Fahrzeit	Verbrauchte elektrische Energie	Verbrauch	Akkuzustand bei Abschluss	Reichweite	Wirkungsgrad Motor vorn	Wirkungsgrad Motor Mitte	Motortemp. vorn bei Abschluss	Motortemp. Mitte bei Abschluss
	[h:min]	[kJ]	[J/m]		[km]			[°C]	[°C]
O-K	04:55	-	-	-	-	-	-	-	-
F-K	02:23	1864	49,1	35,4%	58,82	68,3%	-	105,6	-
F-K-V	02:26	1808	47,6	37,6%	60,90	68,4%	-	104,2	-
M-K	02:23	1688	44,4	42,3%	65,86	-	75,9%	-	51,1
M-K-V	02:26	1630	42,9	42,3%	65,86	-	75,3%	-	49,6
FM-K	02:21	1796	47,3	38,1%	61,39	68,8%	75,4%	110,2	52,3
FM-K-V	02:24	1738	45,7	40,3%	63,7	68,9%	75,0%	108,8	49,8
FM-T	02:20	1776	46,7	38,8%	62,1	70,4%	75,4%	85,6	62,3
FM-T-V	02:23	1715	45,1	41,2%	64,6	70,4%	75,2%	83,5	59,2

**Bemerkungen:**

Durchgehendes Fahren mit 100 W Tretleistung ohne Stopps, Dauerhaftes Treten, auch bergab.

Fazit:

Durch die Nutzung einer elektromotorischen Unterstützung wird die Fahrbarkeit der Strecke deutlich verbessert, da steile Anstiege auch bei nur mittlerer Tretleistung kein Hindernis mehr darstellen. Die Fahrzeiten liegen sehr nah beieinander, am schnellsten war die Variante mit kombiniertem Front- und Heckmotor und Thermomanagement. Der niedrigste Energiebedarf bestand beim einzelnen Mittelmotor mit prädiktiver Motorregelung, wobei diese Variante am längsten unterwegs war. Bei allen Varianten bringt das prädiktive Herunterregeln der Motoren vor Anstiegen eine Energieersparnis von rund 3,5 %, was allerdings mit einer Verlängerung der Fahrzeit von 3 Minuten (2 %) einhergeht.

Traktionskonzept für ein Lastenfahrrad

Untersuchung von Fahrverhalten und Antriebsstrang

Bombach, E.

2016, XVI, 143 S. 61 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-16407-2