

Rekuperation 1

E-Maschinen

Bilder: dle

Jedes Fahrzeug in Fahrt hat kinetische Energie gespeichert. Der Betrag dieser Energie hängt von der Fahrzeugmasse und der Fahrzeuggeschwindigkeit ab, wobei die Masse linear und die Geschwindigkeit quadratisch wirkt. Das bedeutet, wenn ein Fahrzeug mit 50 km/h fährt, hat es eine gewisse kinetische Energie gespeichert, bei 100 km/h speichert es dann nicht die doppelte, sondern die vierfache Energie. Beim Bremsen wird die Energie zwischen Bremsbelägen und Bremscheiben durch Reibung in Wärme umgewandelt. Bei einem Crash passiert das Gleiche durch Molekularreibung in den sich verformenden Blechen und Strukturen.

Ein Teil der Bewegungsenergie kann bei normaler Bremsverzögerung in der E-Maschine eines Hybrid- oder E-Fahrzeugs aber auch wieder in elektrische Energie zurückverwandelt und in der Batterie gespeichert werden.

Bremsenergie

Da bei Hybrid- und E-Fahrzeugen die E-Maschinen sowohl motorisch als auch generatorisch arbeiten können, kann die Energie beim Abbremsen direkt von der E-Maschine wieder in elektrische Energie umgewandelt und von der Leistungselektronik der Batterie zugeführt werden. Es braucht aber einen zusätzlichen Mikroprozessor, welcher bestimmen kann, in welchem Moment wieviel Bremsenergie in elektrische und wieviel in Wärmeenergie umgewandelt wird.

In Bild 1 sind die elektrisch umsetzbaren Energien dargestellt. Die blauen Bereiche müssen konventionell über Reibungsbremsen umgewandelt werden. Je nach Leistungsfähigkeit der E-Maschine werden die blauen Flächen grösser oder kleiner. Im Bereich 3 stellt die maximale Leistung der E-Maschine die Rekuperationsgrenze dar. Wenn sie mehr Bremsenergie umsetzen müsste, würde sie überhitzen. Im Bereich 2 schafft die Maschine die gesamte Energieumwandlung. In diesem Bereich rekuperiert sie mit bestem Wirkungsgrad. Im Bereich 1 ist die Geschwindigkeit (Drehzahl) kleiner und die Induktion bzw. die Rekuperationsmöglichkeit wird schwächer.

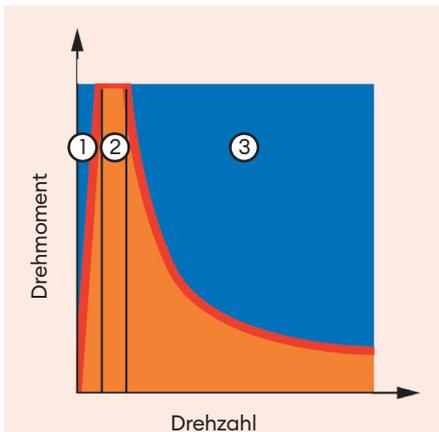


Bild 1: Die abzubauenen Bremsenergie wird zwischen der E-Maschine (orange) und den Reibungsbremsen (blau) aufgeteilt.

Es geht aber nicht nur um die Traktionsmaschine, die Batterie muss die gelieferte elektrische Energie in jedem Moment aufnehmen und speichern können. Damit ist die Rekuperation nicht nur eine Herausforderung für die E-Maschine, sondern für das ganze System des Elektroantriebs. Die Steuerelektronik muss genau wissen, was der Batterie zuzutrauen ist und welche Leistung die E-Maschine umwandeln kann. Den Rest der Bremsenergie muss die Reibungsbremse aufnehmen und in Wärme umwandeln.

Rekuperation mit PSM

Die permanenterrregte Synchronmaschine (PSM) wird für die Rekuperationsbremsung angesteuert. Natürlich könnten die Erregerwicklungen auch einfach nicht bestromt werden. Durch die Drehung des Rotors und den magnetischen Fluss der Permanentmagnete würde so eine Induktion entstehen. Dabei wird die Batterie geladen und das Fahrzeug verzögert. Die PSM würde in dieser (ungeregelten) Betriebsphase aber mit voller Leistung bremsen und eine Teilbremsung wäre nicht möglich. Wird der Motor angetrieben, fließt ein grosser Erregerstrom, welcher das Drehfeld im Stator erzeugt. Die Frequenz des Drehfeldes muss beim Synchronmotor genau der Drehzahl entsprechen. Durch die exakten Positionsgeber im Rotor kann aber ein positiver Lastwinkel (Bild 3) erzeugt werden. Je grösser der Lastwinkel, desto grösser sind Drehmoment und Beschleunigung. Beim Ausrollen des Fahrzeuges muss das Drehfeld immer noch aufrechterhalten werden, damit durch die Permanentmagneten keine bremsende Induktion entsteht.

Negativer Lastwinkel

Wird der Lastwinkel in den negativen Bereich gezogen, läuft der Rotor dem Drehfeld vor und die Bremsinduktion ist gewollt (Bild 3). Ab einem gewissen Punkt übersteigt die Bremsinduktion die Erregerspannung, diese wird ausgeschaltet und der Erregerstrom wird vom Induktionsstrom abgezweigt. Der überschüssige Induktionsstrom wird

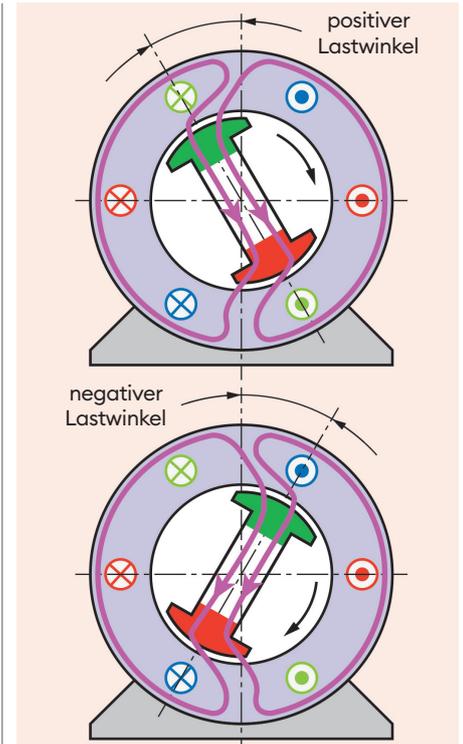


Bild 3: Der Lastwinkel entsteht, wenn das Drehfeld zum Beschleunigen vorausseilt oder der Rotor zum Verzögern abgebremst wird. oben: Beschleunigen, unten: Bremsen

über den DC/DC-Wandler zur Batterie geleitet, welche geladen wird. Im Vierquadrantendiagramm (Bild 2) ist dazu eine Linie von rechts oben (1. Quadrant - Motorischer Betrieb) nach unten (4. Quadrant - Generatorischer Betrieb) zu legen. Die Linie wird je nach Verzögerung fast senkrecht bis ziemlich schräg ausfallen. Je schräger die Linie, desto grösser stellt die Elektronik den negativen Lastwinkel und damit das Bremsmoment ein. Nach Bild 1 wird die Drehzahl der E-Maschine plötzlich so klein, dass eine weitere Rekuperation nicht mehr sinnvoll ist und das Drehfeld zurückgeregelt wird (b in Bild 2). In der letzten Phase (c in Bild 2) ist das Drehfeld noch genau so gross, dass die Bremsinduktion null wird. Durch die starken Permanentmagnete ergibt sich bei jeder Bewegung des Motors eine Induktion. Somit muss der Motor auch im Leerlauf exakt angesteuert werden.

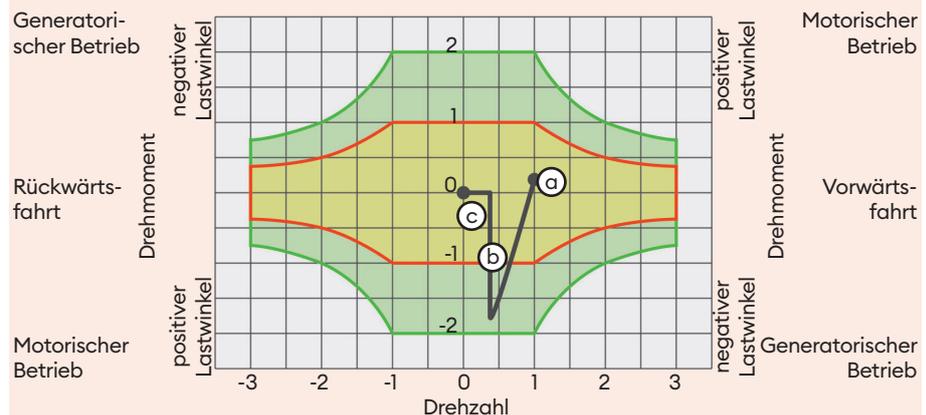


Bild 2: Das Vier-Quadranten-Diagramm mit der Bremslinie. a Bremsbeginn - es wird bis zu einem maximalen negativen Lastwinkel (=Bremsmoment) verzögert - b die Motordrehzahl ist für eine wirkungsvolle Rekuperation zu gering - c Das Drehfeld wird auf Leerlauf eingestellt.