

Dezentrale Photovoltaik: Autonomie, Eigenverbrauch und Netzentlastung durch lokale Strom- und Wärmespeicher

Jann Binder, Tobias Kelm

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg,

Industriestr. 6, 70565 Stuttgart, Germany

Tel.: +49 (0) 711 7870 209, Fax.: +49 (0) 711 7870 230

E-Mail: jann.binder@zsw-bw.de

Internet: www@zsw-bw.de

Kurzfassung

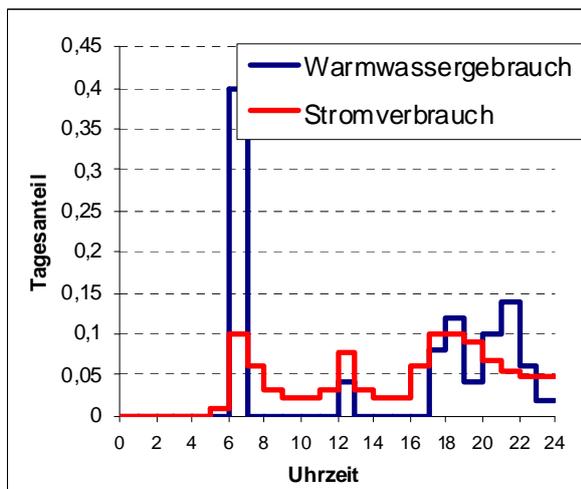
Mit Erreichen der „Grid Parity“ wird der Eigenverbrauch des Solarstroms zu einem wichtigen Baustein für die Wirtschaftlichkeit einer PV-Anlage jenseits der Einspeisevergütungen [1]. Mangelnde Gleichzeitigkeit zwischen Erzeugung und Verbrauch schränken den Eigenverbrauch jedoch auf etwa 30% ein [2], wenn die Jahresproduktion in etwa dem Stromverbrauch des Haushalts entspricht.

Eine reduzierte PV-Anlagengröße erhöht den solaren Eigenverbrauch, die prozentuale Deckung des Stromverbrauchs durch regenerativ erzeugte Energie aus Photovoltaik nimmt jedoch ab. Damit ist es mit Blick auf die CO₂ Bilanz des Haushalts nicht sinnvoll die PV-Anlagengröße zu verringern. Die nachhaltigere Variante den Eigenverbrauch zu erhöhen ist, die Wärmeerzeugung des Haushalts über eine Wärmepumpe an die Stromerzeugung zu koppeln [3] und einen thermischen Speicher einzusetzen. Der vorliegende Beitrag analysiert abhängig von der PV-Anlagengröße, dem Stromverbrauch für Haushaltsgeräte und der Heizlast des Hauses welche Eigenverbrauchswerte durch den Einsatz von Wärmepumpen, sowie thermischer und elektrischer Speichern erreicht werden.

Im Ergebnis kann bei einer PV-Anlage von 5 bis 8 kW_p auf einem Ein- oder Zweifamilienhaus mit 4 Personen durch den Einsatz von Wärmepumpen zur Raumheizung und Warmwasserbereitung der Eigenverbrauch von ~30% auf 40% für ein Passivhaus (sehr hoher Dämmstandard) und auf 65% für ein durchschnittliches Gebäude aus 1975 (niedriger Dämmstandard) erhöht werden. Bei Renovierungen wird ein mittlerer Dämmstandard und damit eine Erhöhung auf rund 50% Eigenverbrauch erreicht. Die Entscheidung für eine Wärmepumpe im Zuge der Renovierung unterstützt dann die Amortisation einer PV-Anlage über Eigenverbrauch. Für Gebäude mit sehr hohem Dämmstandard dominiert der Energiebedarf für Haushaltsgeräte. Dort ist ein elektrischer Speicher mit rund 5 kWh an nutzbarer Batteriekapazität notwendig, um den Eigenverbrauch auf 50% anzuheben.

Eingangsparameter

Die Berechnungen stützen sich auf Jahreszeitreihen im Stundenraster für die solare Einstrahlung, die Außentemperatur, den Strombedarf für Haushaltsgeräte und den Warmwasserbedarf. Die Klimawerte sind typische synthetisierte Werte über ein Jahr für den Standort Stuttgart aus PVSYST (www.pvsyst.ch). Die PV-Anlagengröße wird durch den Jahresertrag in kWh/a und die vereinfachte lineare Abhängigkeit von PV-Leistung zur solaren Einstrahlung charakterisiert. Das Profil des verwendeten täglichen Strom- und Warmwasserbedarfs ist in der Abbildung unten dargestellt. Der Jahresstrombedarf für Haushaltsgeräte ist mit 3.900 kWh/a als ein typischer Wert für einen 4-Personenhaushalt gewählt.



Aus der Gebäudeenergiebetrachtung gemäß EnEV [3] bekannte Normwerte für den thermischen Energiebedarf zur Warmwasserbereitung (12,5 kWh/m²a), zur Berücksichtigung interner Gewinne (5 W/m²a) und für die Heizgrenztemperatur (15°C) werden in der Simulation für das gewählte Haus mit 140 m² Nutzfläche (A_N) übernommen. Von der Tageszeit und vom Wetter abhängiger Eintrag von solarer Strahlungswärme (passiver solarer Gewinn) im Umfang von

3000 kWh/a wird durch entsprechende Fensterfläche berücksichtigt.

Als Wärmeerzeuger wird eine Wärmepumpe mit Wirkungsgrad $\eta_{WP} = 40\%$ angenommen. Die Leistungszahl als Verhältnis von thermischer Leistung P_{th} zu elektrischer Leistung P_{el} wird gemäß (1) für die jeweilige Temperatur im Wärmespeicher T_{Senke} bestimmt. Als Quellentemperatur T_{Quelle} werden die im Mittel geltenden 10°C für eine Erdwärmepumpe eingesetzt.

$$COP = \frac{P_{th}}{P_{el}} = \eta_{WP} * COP_{max} = \eta_{WP} * \frac{T_{Senke} [K]}{T_{Senke} - T_{Quelle}} \quad (1)$$

Als thermischer Speicher dient ein Schichtenspeicher für Heizungswasser, den die Wärmepumpe per Wärmetauscher im unteren Segment aufheizt. Aus der unteren Hälfte des Speichers wird die Fußbodenheizung mit 35°C Vorlauftemperatur betrieben. Als Wärmequelle für das Warmwasser dient die obere Hälfte des Speichers, der dazu bei Warmwasserbedarf auf mindestens 50°C aufgeheizt wird. Entscheidend für die Erhöhung des Eigenverbrauchs durch den thermischen Speicher ist das Volumen des Speichers und die Temperaturerhöhung, die genutzt wird, um in der Nacht benötigte Wärme schon am vorherigen Tag über PV Strom zu

erzeugen. Der Vorrang für den PV Strom wird durch eine erhöhte Grenztemperatur für die Speicherbeheizung erreicht. Bei überschüssigem PV Strom wird die Wärmepumpe bis zum Erreichen von 53°C im gesamten Speicher betrieben. Bei Gebäuden mit mehr als 5 kW Heizlast wird dieser Wert weiter erhöht, und zwar um je 2°C für jedes kW über 5 kW Heizlast. Durch die erhöhte Grenztemperatur für PV Strom sinkt die Jahresarbeitszahl zwar leicht, der Eigenverbrauch erhöht sich aber signifikant. Als Speichervolumen ergeben sich 1.000 Liter als sinnvolle Größe, mit einer Erhöhung um je 200 Liter für jedes kW über 5 kW Heizlast. Zum Vergleich werden in Bild 2 auch Ergebnisse ohne Speicher und mit 600 Liter Speichervolumen gezeigt.

Ergebnisse der Wärmebedarfsberechnung

Abhängig von der Außentemperatur wird im Stundenraster der Wärmebedarf abzüglich der passiven solaren Gewinne und internen Gewinne und zuzüglich des Bedarfs für die Warmwasserbereitung aus dem Wärmespeicher gedeckt. Sinkt dabei die Temperatur des Wärmespeichers unter die Grenztemperatur (im oberen Segment des Speichers unter 50°C, im unteren unter 35°C), so heizt die Wärmepumpe den Speicher auf. Vorrang hat die Warmwasserbereitung. Vorrang bei der Nutzung des Solarstroms haben die elektrischen Verbraucher und dann die Wärmepumpe. Überschüssiger PV Strom wird genutzt, um den Speicher auf die erhöhte Grenztemperatur zu bringen. Ist diese erreicht werden die Batterien geladen und bei voller Batterie der überschüssige Strom ins Netz gespeist. Die Batterie wird entladen solange möglich, um Strom aus dem Netz zu ersetzen.

Die in Tabelle 1 genannten Heizlasten sind als Eingangsgrößen so gewählt, dass die resultierenden spezifischen Heizwärmebedarfe runde Zahlen ergeben und sich den Gebäudestandards für 1975, 1995, 2009 und dem Passivhaus zuordnen lassen ([4], [5], [6]). Der Bestand von Ein- und Zweifamilienhaus lag 2010 im Mittel bei 200 kWh/m²a [7]. Die stundenweise Berechnung ergibt gleichzeitig den elektrischen Energiebedarf für die Wärmepumpe und die Jahresarbeitszahl.

(A _N =140 m ²)	Einheit	Passivhaus (Zero E.)	Gebäudestandard 2009	Gebäudestandard 1995	Gebäudestandard 1975
standardisierte Heizlast	kW	2,5	5,0	7,3	11,5
spezifischer Heizwärmebedarf	kWh/m ² a	30	75	120	200
jährlicher Wärmebedarf	kWh _{th} /a	4.300	10.500	16.800	28.000
Elektrische Energie für die Wärmepumpe	kWh _e /a	1.400	3.200	5.100	8.700
Jahresarbeitszahl (JAZ)		3,1	3,3	3,3	3,2

Tabelle 1: Berechnete thermische und elektrische Energiebedarfe zur Wärmebereitstellung.

Definitionen und Ergebnisse der Eigenverbrauchsberechnung

Durch Einsatz der Wärmepumpe kann der gesamte Energiebedarf des Hauses als elektrischer Energiebedarf ausgedrückt werden:

- **Gesamter Energiebedarf** ($\Sigma_{el,total}$) = elektrischer Energiebedarf für die Wärmepumpe + elektrische Energiebedarf für sonstige Haushaltsgeräte
- selbst erzeugte PV Energie Σ_{PV}
- PV Energie lokal verbraucht $\Sigma_{PV,local}$
- **Eigenverbrauch** *Self Consumption* = $\Sigma_{PV,local} / \Sigma_{PV}$
- **Bilanzielle Eigendeckung** = Verhältnis der selbst erzeugten Energie zur verbrauchten Energie = Rate of Local Generation

$$RLG = \Sigma_{PV} / \Sigma_{el, total}$$

- **Autonomie** = Quotient aus **zeitgleich** zum Verbrauch erzeugter Energie und Gesamtverbrauch $Autonomy = \Sigma_{PV,local} / \Sigma_{el,total}$

Tabelle 2 zeigt einen Ausschnitt der Berechnungen zum Eigenverbrauch in Abhängigkeit vom Gebäudestandard. Bild 1 stellt die Energiebilanzen graphisch dar. Der Eigenverbrauch nicht sanierter Gebäude aus früheren Jahren steigt demnach durch den Einsatz einer Wärmepumpe und eines thermischen Speichers auf bis zu 65% an, bei einer festen PV-Anlagengröße. Wenn die PV-Anlage vergrößert und auf den Gesamtenergiebedarf abgestimmt wird, mit dem Ziel eine bilanzielle Eigendeckung von 100% zu erreichen und damit bilanzielle Klimaneutralität, dann bleibt der Eigenverbrauch unabhängig vom Gebäudestandard bei rund 40%.

($A_N=140 \text{ m}^2$) kein Batteriespeicher	Einheit	Passivhaus (Zero E.)	Gebäudestandard 2009	Gebäudestandard 1995	Gebäudestandard 1975
Gesamter Energiebedarf	kWh _{el} /a	5.300	7.100	9.000	12.600
Fall: fest definierte PV Anlagengröße					
erzeugte PV Energie	kWh _{el} /a	5.500	5.500	5.500	5.500
bilanzielle Eigendeckung		104 %	77%	61%	44%
Autonomie		40 %	34%	33%	29%
Eigenverbrauch		38 %	44%	55%	65%
Fall: bilanzielle Eigendeckung = 100 %					
erzeugte PV Energie	kWh _{el} /a	5.300	7.100	9.000	12.600
Eigenverbrauch und Autonomie jeweils		39 %	37%	40%	39%

Tabelle 2: Berechnete bilanzielle Eigendeckung, Autonomie und (solarer) Eigenverbrauch bei verschiedenen Gebäudestandards, Wärmepumpe und thermischem Speicher von 1.000 Liter bis 5 kW Heizlast, sowie 1.460 L bzw. 2.300L für die „1995“ und „1975“ Standards.

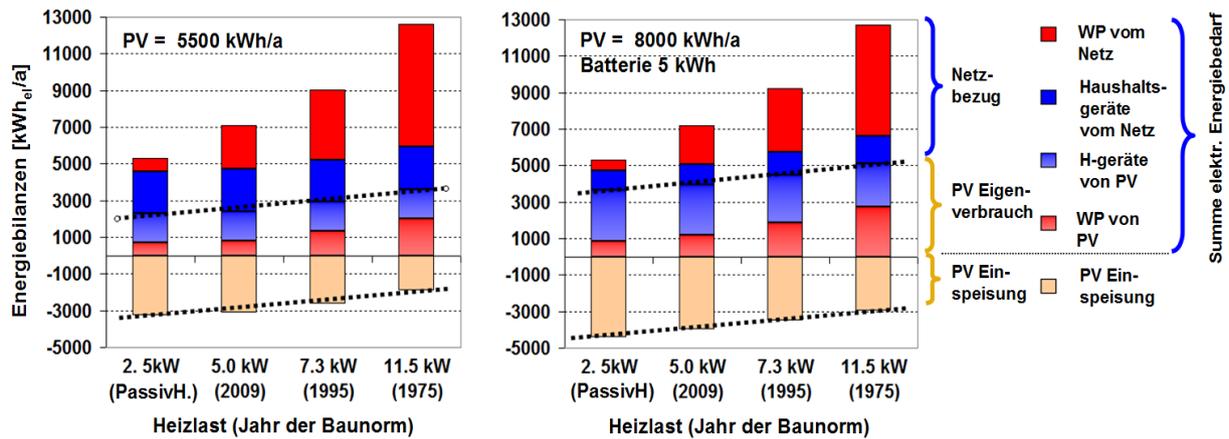


Bild 1: Energiebilanzen für eine PV-Anlage mit 5.500 kWh/a Ertrag sowie für eine Anlage mit 8.000 kWh/a und einer Batterie mit verfügbarer Ladeenergie von 5 kWh.

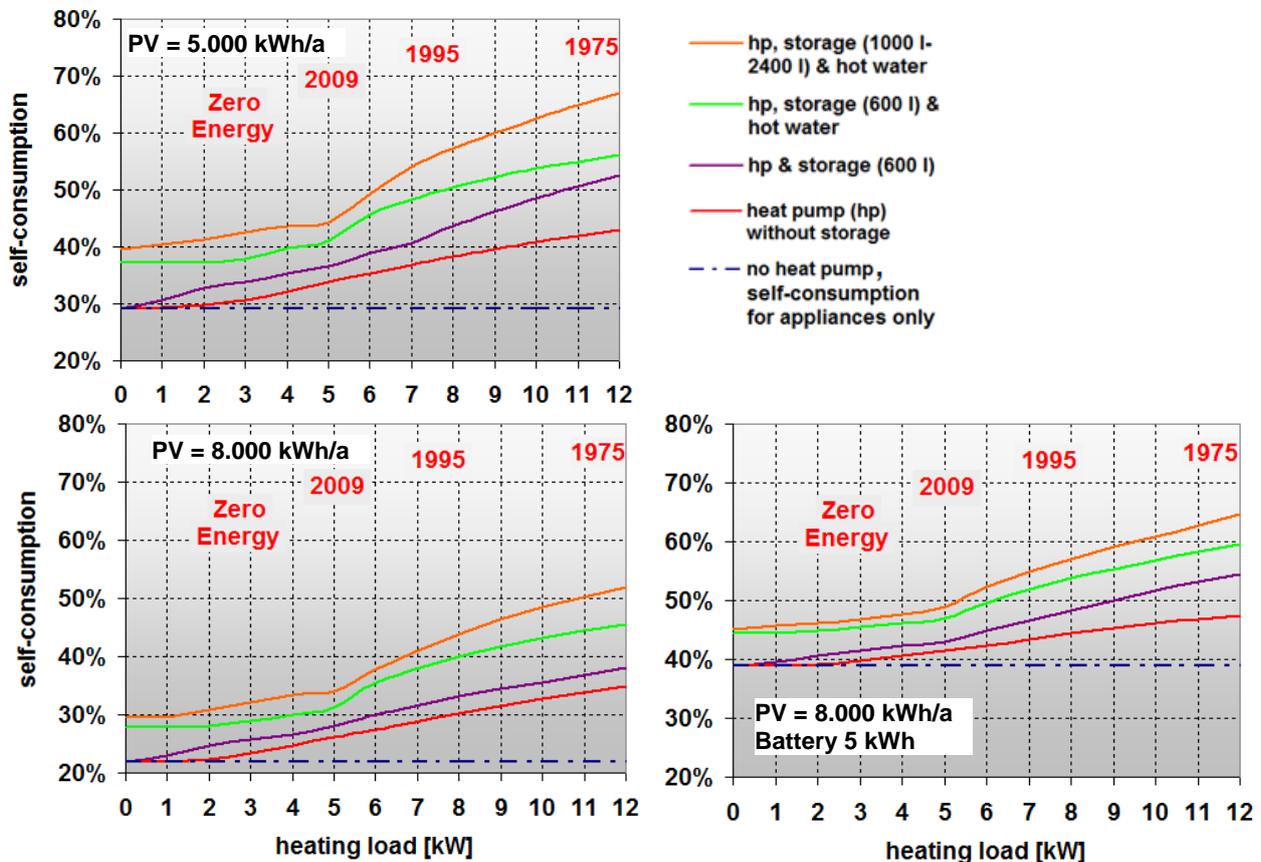


Bild 2: Eigenverbrauch in Abhängigkeit von der Heizlast für verschiedene Speichervolumina, mit und ohne Warmwasserbereitung und für verschiedene PV-Anlagengrößen.

Aus der Dominanz des Energieverbrauchs durch elektrische Haushaltsgeräte im Fall gut gedämmter Gebäude (Bild 1 – blauer Anteil) ergibt sich, dass hier der Einsatz von Batterien notwendig ist, um den Eigenverbrauch zu erhöhen. Bild 3 zeigt den Einfluss der nutzbaren Batteriekapazität auf die Eigenverbrauchswerte. Wird eine Wärmepumpe genutzt und ist ein thermischer Speicher vorhanden, dann bleibt die Eigenverbrauchserhöhung durch eine Batterie bei rund 10%. Bei reiner Nutzung des Solarstroms durch Haushaltsgeräte ergibt sich eine Erhöhung um 30-40%.

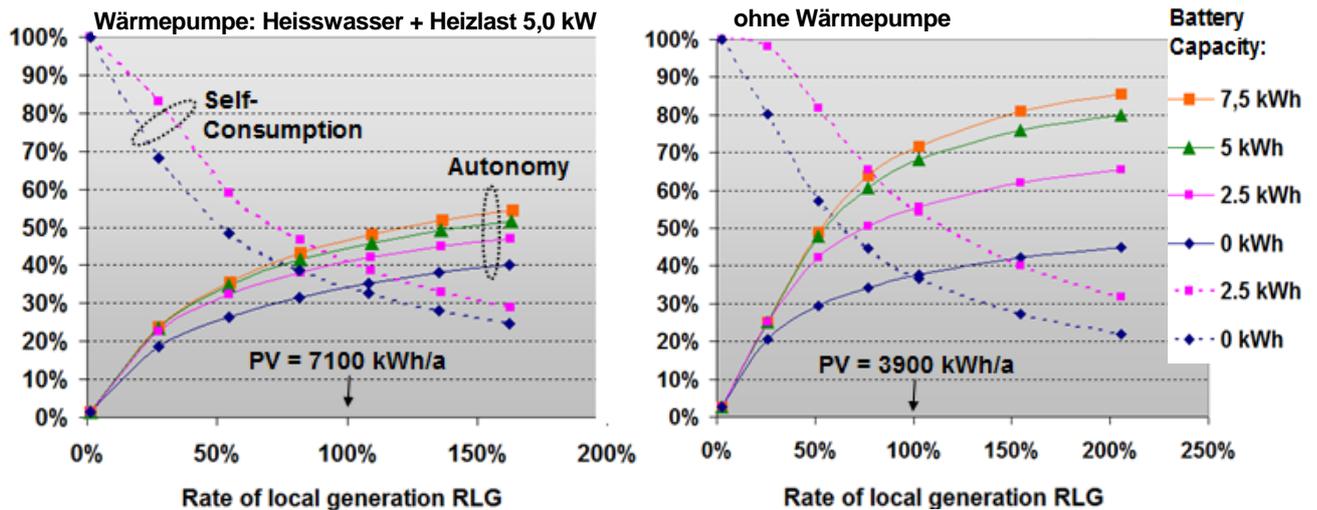


Bild 3: Eigenverbrauch (punktiert) und Autonomie (durchgezogene Linie) in Abhängigkeit von der bilanziellen Eigendeckung (Rate of local generation) und der Batteriekapazität.

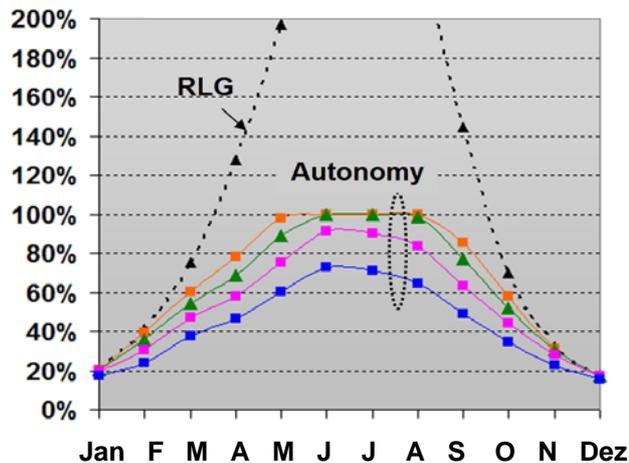


Bild 4: Monatsverlauf der bilanziellen Eigendeckung (RLG) und Autonomie, mit der Batteriekapazität als Parameter wie in Bild 3. Dargestellt ist der Fall des Gebäudestandards von 2009 mit einem Gesamtenergiebedarf von 7.100 kWh (Tabelle 1) und einer PV-Anlage mit 7.100 kWh/a Ertrag. Trotz ausgeglichener Produktion und Verbrauch im Jahresmittel, wird im Juni der Wert RLG = 280% erreicht, d.h. eine 2,8 fache Stromerzeugung gegenüber dem Verbrauch.

Wenn die PV-Anlage auf bilanziellen Eigendeckung ausgelegt ist, dann führt dies zu einer Produktion in den Sommermonaten, die erheblich über dem Verbrauch liegt (Bild 4) und zu geladenen thermischen und elektrischen Speichern bevor das Einspeisemaximum erreicht ist. Zusätzliche Algorithmen sind möglich, bei denen die Speicherbeladung verlangsamt oder für den thermischen Speicher eine zeitweise erhöhte Grenztemperatur zugelassen wird, um das Netz zu entlasten.

Literatur

- [1] M. Bost u.a., „Effekte von Eigenverbrauch und Netzparität bei der PV“, Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung IÖW, Berlin, Hamburg 2011.
- [2] V. Wachenfeld (SMA Solar Technology AG), „Storing Electricity from PV to Increase the Share of Self-Consumption“, IRES 2010, Berlin.
- [3] K. Büdenbender, M. Braun, and P. Strauß, „Technische Voraussetzungen für Netzentlastung,“ 7-tes Fachgespräche der Clearingstelle EEG, Berlin 15.10.2010.
- [4] EnEV Energieeinsparverordnung für Gebäude; Berlin, 29.04.2009. <http://www.enev-online.org/>
- [5] Wärmeschutzverordnung 1995, Berlin 16.08.1994
- [6] J. Adolf (Shell), M. Bräuninger (HWWI), H. Fehrenbach (ifeu) u.a., „Shell Hauswärme Studie“, Hamburg, November 2011, dort S. 21 „Entwicklung des Gebäudebestandes“
- [7] C. Nabe (Ecofys), F. Seefeld (prognos) u.a., „Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strommarkt und zur Netzintegration EE“, Tabelle 5, BMWI Vorhaben 50/10, 31.10.2011.