



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 25. Juni 2012

Gebäudeintegrierte polyvalente Energiebereitstellung

Gebäude als Kraftwerk

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:**Ökozentrum Langenbruck**

Schwengiweg 12
4438 Langenbruck
www.oekozentrum.ch

Empa, Building Science and Technology Laboratory
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf
www.empa.ch

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, ZHAW

Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
Technikumstrasse 9
8401 Winterthur
www.zhaw.ch

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, HSLU

Zentrum für integrale Gebäudetechnik
Technikumstrasse 21
6048 Horw
www.hslu.ch

Autoren:

Christian Gaegauf, Ökozentrum Langenbruck,
christian.gaegauf@oekozentrum.ch

Viktor Dorer, Empa
Andreas Weber, Empa

Frank Tillenkamp, ZHAW
Tobias Keller, ZHAW

Gerhard Zweifel, HSLU
Christian Struck, HSLU

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Dr. Charles Filleux

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154395 / 103333

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abstract | 5 |
| 1 Ausgangslage | 6 |
| 2 Ziel der Arbeit | 6 |
| 3 Polyvalente Energieversorgung für Gebäude und Fahrzeug | 6 |
| 4 Elektromobilität | 8 |
| 4.1 Stärken und Schwächen | 8 |
| 4.2 Elektroauto | 8 |
| 4.2.1 Elektromobilität und Stromverbrauch | 8 |
| 4.2.2 Energiekosten | 9 |
| 4.2.3 Ladestationen und Infrastruktur | 9 |
| 4.2.4 Batterien | 9 |
| 4.2.5 Reichweite und Fahrverhalten | 10 |
| 4.2.6 Elektroauto und Netz | 10 |
| 4.2.7 CO ₂ -Emissionen und Ökobilanz von Elektroautos | 10 |
| 5 Dezentrale Energieproduktion und Stromnetz | 12 |
| 6 Systemmodellierung | 13 |
| 6.1 Grundlagen..... | 13 |
| 6.2 Dynamisch-thermische Gebäudesimulation | 13 |
| 6.2.1 Modellbildung der WKK-Anlagen | 13 |
| 6.2.2 Modellierungsgrad | 13 |
| 6.2.3 Bewertung der Anlagentechnik | 14 |
| 7 Gebäudetypen | 16 |
| 7.1 Systemgrenze Wohneinheit | 16 |
| 7.2 Variantenmatrix | 17 |
| 8 Anlagensysteme | 19 |
| 8.1 Anlagensysteme Referenzszenario 'Konservativ' | 19 |
| 8.2 Anlagensysteme Referenzszenario 'Progressiv' | 19 |
| 8.3 Anlagensysteme Referenzszenario 'Polyvalente Energieversorgung' | 20 |
| 9 Anlagekomponenten | 21 |
| 9.1 Erdsondenwärmepumpen | 21 |
| 9.2 Fossil befeuerte WKK-Anlagen..... | 21 |
| 9.2.1 Gas-Wärme-Kraft-Kopplungsanlage | 21 |
| 9.2.2 Mikrogasturbine..... | 22 |
| 9.3 Biobrennstoff-befeuerte WKK-Anlagen | 26 |
| 9.3.1 Betriebsdaten eines Pellet-befeuerten Stirlingmotors | 26 |
| 9.3.2 Leistungsdaten eines Pellet-befeuerten Dampfmotors | 28 |
| 9.4 30 | |
| 9.4 In der Simulation verwendete Betriebsdaten | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 10 Simulationsergebnisse | 31 |
| 10.1 Bewertungskriterien | 31 |
| 10.2 Energiebedarf der verschiedenen Gebäudestandards | 31 |
| 10.3 Primärenergiebedarf der verschiedenen Gebäudestandards und Anlagesysteme | 33 |
| 10.4 Saisonaler Verlauf der Stromerzeugung | 35 |
| 10.5 Elektrische Eigenbedarfsdeckung | 38 |
| 10.6 Polyvalente Energiesysteme und Mobilität | 39 |
| 10.6.1 Spezifische Fahrleistungen | 39 |
| 10.6.2 Herleitung von Fahrzeug-Ladeprofilen | 40 |
| 10.6.3 Berücksichtigung der Fahrzeugladeprofile bei der Simulation | 42 |
| 10.6.4 Energie- und Umweltbewertung der Systemszenarien mit Einbezug der Mobilität | 43 |
| 10.6.5 Untersuchung der Gleichzeitigkeit von Stromerzeugung und Fahrzeugbatterieladung | 46 |
| 10.6.6 Auswirkung der Elektromobilität auf die elektrische Eigenbedarfsdeckung | 50 |
| 10.7 Elektroauto als Verbraucher und Versorger | 51 |
| 11 Schlussfolgerung | 56 |
| 11.1 Systemszenarien und -modellierung | 56 |
| 11.2 Elektroauto und gebäudeintegrierte, polyvalente Anlagesysteme | 56 |
| 11.3 Energie | 57 |
| 11.4 Umwelt | 58 |
| 11.5 Fazit | 58 |
| 12 Symbolverzeichnis | 60 |
| 13 Literaturverzeichnis | 61 |
| 14 Anhang A – Materialisierung der Wohneinheit in Abhängigkeit vom Gebäudestandard | 65 |
| 15 Anhang B – Bewertung des Modelldetaillierungsgrades | 70 |

Abstract

The European Union aims for new building standards by 2019 achieving Near Zero Energy Buildings (NZEB). Such buildings are equipped with distributed power generation units such as photovoltaic (PV) and co-generation (co-gen). Since buildings induce also individual transportation the energy consumption of transport related to living and working has also be taken in to consideration. Three different sets of dwellings designed according to various energy standards were analyzed for their energy consumption, greenhouse gas (GHG) emissions and environmental impacts. The simulation assessed the supply of energy for room heating, domestic hot water and electricity for household as well as for an electric car.

The substitution of an internal combustion engine vehicle by an electric car reduces GHG substantially provided that the electricity is not from coal power plants. The findings show clearly the advantage of the combination of co-gen units and PV covering the energy demand in winter and the summer season respectively. The power production of the co-gen units is strongly dependent on the heat demand of the buildings since low heat demand cuts down co-gen operation time. The least environmental impact shows the co-gen unit fired with wood pellets and PV. Distributed power production and combined cycle power plant have similar energy and environmental footprints.

The use of the electric car battery in combination with co-gen and PV increases the share of home produced electricity and its use from some 30% up to 70%. Electric cars with the capability of power storage are a most welcome part of a home power management (smart home).

With the simulation tool developed it is possible to optimize the domestic energy plant design for the building it is installed in. The tool gives energy production patterns over a year or on monthly data. The simulation tool and the data produced is meaningful in the context of the Swiss program for energy 2050. It gives forecast of the contribution of distributed power production to the overall energy needs.

1 Ausgangslage

Die Europäische Union zielt darauf ab, dass alle neuen Gebäude ab 2019 im Schnitt über das Jahr keine Energie verbrauchen [Crawley D. et al., 2009]. Das kann nur durch die weitere Reduktion des Energiebedarfs und den verstärkten Einsatz von dezentralen Energieversorgungsanlagen erreicht werden.

Es ist technisch durchaus sinnvoll, die Gebäudeinfrastruktur in die zukünftige dezentrale Energieversorgung einzubeziehen. Die Gebäudeoberfläche ist als Erntefläche für die dezentral anfallende Sonnenenergie prädestiniert. Die Gebäudewärmeverteilung bietet eine ideale Voraussetzung, um die Abwärme von Wärme-Kraftkopplungsanlagen (WKK) zu nutzen. Diese Vorzüge wurden bereits auch schon von Energiedienstleistern erkannt, die WKK-Anlagen als Teil eines virtuellen Kraftwerkparkes im Keller ihrer Kunden betreiben [www.lichtblick.de, 2012-03-15]. Energiedienstleister sehen im dezentralen Anlageleasing mit dem gleichzeitigen Verkauf von Wärme und Strom neue Optionen, solche virtuellen Kraftwerke kosteneffizient zu betreiben.

2 Ziel der Arbeit

Das Nationale Kompetenznetzwerk Gebäudetechnik und Erneuerbare Energien - brenet - greift die Möglichkeit der Gebäude als Teil des virtuellen Kraftwerkes in seinem Themenbereich Kraftwerk Haus [Gaegauf C. et al., 2010] auf. Mit dem vorliegenden brenet-Projekt werden neuartige Konzepte einer nachhaltigen, gebäudeintegrierten, polyvalenten Energieversorgung untersucht. Das Projekt erweitert dabei die energetische Systemgrenze der Wohneinheiten auf die Mobilität. Energieoptimiertes Wohnen, wie es durch die verschiedenen neuen Normen vorgegeben wird, muss auch im Lichte der standortinduzierten Mobilität betrachtet werden. In Zukunft gilt es für ressourcen- und umweltfreundliche Wohnkonzepte Gebäude und Mobilität gemeinsam zu betrachten.

Der Hauptakzent des vorliegenden Projektes liegt auf Systemuntersuchungen zu Photovoltaik- und WKK-Anlagen, die in ihrer Leistung auf die Wärme- und Stromversorgung einer Wohneinheit zugeschnitten sind. Die WKK-Anlagen versorgen dabei zusätzlich den Strombedarf von Elektro- resp. Hybridfahrzeugen. Mit dem Einbezug von Batterien und Range Extendern von Plug-in-Hybrid-Elektroautos ergeben sich Potenziale für Stromspeicherung und WKK-Anlagen.

Um die Systemeffizienz bewerten zu können, werden universal einsetzbare Simulationsmodelle entwickelt, um neue, zukunftsweisende Systemkombinationen von Gebäude und Mobilität beurteilen zu können.

3 Polyvalente Energieversorgung für Gebäude und Fahrzeug

Die grundlegende Idee von gebäudeintegrierten polyvalenten Energieversorgungssystemen ist die Nutzung der bei der Stromproduktionen anfallenden Abwärme. Bei Mikro-WKK-Anlagen wird die Wärme für Raumheizung und die Erzeugung von Brauchwarmwasser verwendet. Bei einem weitergehenden Konzept der polyvalenten Energieversorgung wird die Abwärme auch für die thermisch getriebene Kühlung genutzt. Ein weiterer Aspekt wird in diesem Projekt verfolgt: es soll mit der WKK-Anlage zusätzlich Strom für die Elektromobilität erzeugt und dabei die anfallende Abwärme im Gebäude genutzt werden. Zudem wird auch

ein möglicher Zusatznutzen des Range Extenders im Plug-in-Hybrid als WKK-Anlage für das Gebäude untersucht.

Vergleiche von Mikro-WKK-Anlagen mit konventionellen Anlagen wurden in der Vergangenheit u.a. von [Zogg M., 1998] durchgeführt. Das Potential und die Rolle von WKK in der zukünftigen Energieversorgung der Schweiz wurde auch von Prognos [Kirchner A., 2007] untersucht. Resultate von neueren diesbezüglichen Studien auf dem Hintergrund der geänderten Schweizer Energiepolitik unter Berücksichtigung des Ausstiegs aus der Atomenergie werden im Jahr 2012 erwartet. Zu erwähnen ist auch die umfassende Analyse über gebäudeintegrierte Brennstoffzellen-WKK-Systeme [Krewitt W. et al., 2004].

Ausgangspunkt für die Systemuntersuchungen in diesem Projekt waren die Arbeiten und Erkenntnisse aus früheren Forschungsprojekten, die sich mit gebäudeintegrierten WKK-Geräten und -Anlagen (engl. micro co-generation oder micro combined heat and power) befassten. In diesen früheren Projekten ging es einerseits darum, gesicherte Leistungsdaten der entsprechenden WKK-Geräte verschiedenster Technologien (Gasmotor, Stirlingmotor, Brennstoffzellen, etc.) zu erhalten, und andererseits darum, mit diesen Daten mittels dynamischer Gebäude- und Anlagen-Simulationen Leistungen von WKK-Systemen bezüglich Energie und Emissionen für verschiedene Gebäudetypen, Nutzerprofile und Klimata zu ermitteln und mit Referenztechnologien zu vergleichen.

Eine frühe diesbezügliche Arbeit war der Vergleich von Solid-Oxide-Brennstoffzellensystemen mit Fällen traditioneller Hausversorgung mit Netzstrom und Gasterme [Dorer V., Weber R., 2004]. Diese Arbeiten wurden im Rahmen IEA-ECBCS Annex 42 (2004-2007) weitergeführt und durch Messungen an Geräten wie auch Anlagen [Beausoleil-Morrison I. (ed.), 2008] ergänzt. Zu diesem Thema wurde auch eine Literaturstudie durchgeführt [Dorer V., 2007]. In der Simulationsstudie für Schweizer Verhältnisse wurden zusätzliche Mikro-WKK-Geräte, Gebäudetypen und Referenzanlagen (u.a. Wärmepumpe mit Erdsonde) mit berücksichtigt [Dorer V., Weber A., 2008], [Dorer V., Weber A., 2009].

Die Studien zeigten, dass mit den Mikro-WKK-Anlagen – im Vergleich zu bestehenden Systemen mit Gasbrennwertkessel und Netzstromversorgung – in vielen Fällen signifikante Reduktionen von Primärenergie und Treibhausgasen möglich sind. Dies, obwohl es sich in vielen Fällen bei den WKK-Geräten noch um Prototypen-Systeme handelt, die noch nicht das volle Leistungspotenzial der Technologien widerspiegeln, und oft die Systeme nicht optimal auf die Lasten ausgelegt waren. Die Resultate hängen aber sehr vom angenommenen Erzeugungsmix für den Netzstrom ab. Auch konnte gezeigt werden, dass im realen Betrieb für den Nutzungsgrad des Systems (Gerät, Speicher etc.) im Vergleich zu den nominellen Wirkungsgraden des Gerätes alleine z.T. wesentlich tiefere Werte resultierten. Dynamische Effekte sowie die Art der Regelung und des Energiemanagements spielen also eine wichtige Rolle. Die Mikro-WKK-Technologien werden zudem durch andere Technologien wie erdgekoppelte Wärmepumpen und auch solare Systeme konkurrenziert. Auch die Schweizer Studie bestätigte diese Resultate. Mikro-WKK-Systeme wurden mit Brennwertkessel und mit erdgekoppelten Wärmepumpen-Systemen mit Strom ab Netz verglichen. Für den europäischen Strommix resultierten für fast alle Mikro-WKK-Systeme Einsparungen an nicht-erneuerbarer Primärenergie (NRPE) bis 38% und an CO₂-Emissionen bis 23%. Wichtig ist in jedem Falle ein hoher elektrischer Wirkungsgrad der WKK-Anlage. Auch für einen Strommix mit Kombikraftwerken neuester Technologie resultierten Reduktionen für NRPE und CO₂-Emissionen. Die grössten Reduktionen wurden aber mit der erdgekoppelten Wärmepumpe erreicht. Für den Schweizer Strommix verschoben sich die Vorteile noch deutlicher zur erdgekoppelten Wärmepumpe.

Im Rahmen des EU-Projektes PolySMART (2006-2010) wurden Mikro-WKK-K-Anlagen (Wärme-Kälte-Kraft-Kopplungs-Anlagen) in Feldversuchen und mittels Simulation untersucht, mit einer ähnlichen Methodik wie im erwähnten IEA Annex 42 Projekt. Aufgrund der verfügbaren Geräte für thermisch angetriebene Kühlung (TDC) waren die WKK-Geräte und damit die WKK-K-Systeme in einer etwas höheren Leistungsklasse für die WKK-Geräte von ca. 10 kWe angesiedelt [PolySMART, 2010]. In diesem Projekt zeigte sich bei der Beurteilung derselbe Einfluss des Netzstrommix. In der Untersuchung von WKK-K-Systemen mit Solid-Oxide-Brennstoffzellengeräten (SOFC) [Weber A., Dorer V., 2010], brachte je nach Fall das

mechanische System mit Wärmepumpe/mechanischem Kältegerät oder das SOFC-WKK-K-System Vorteile bezüglich nicht-erneuerbarem Primärenergiebedarf resp. bezüglich CO₂-Emissionen. In Kombination mit thermischer Kühlung konnten Vorteile nur bei sehr hohen angenommenen elektrischen Wirkungsgraden des SOFC WKK-Gerätes von gegen 60% erreicht werden.

Es musste zudem festgestellt werden, dass der Elektrizitätsbedarf für das thermisch angetriebene Kühlgerät für Hilfspumpen und Regelung sowie für die nötige Rückkühlung wie Pumpen und Kühlturm-Ventilator sorgfältig minimiert werden muss, damit die Vorteile bezüglich Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen im Vergleich zu einer Anlage mit mechanischer Kühlung bestehen blieben [PolySMART WP 4, 2010]. Auch bestanden mehrfach unterschiedliche Anforderungen bezüglich Durchflussraten und Temperaturniveau in den Kreisläufen von WKK-Geräten resp. thermisch angetriebenen Kühlgeräten, die nur schwer beidseitig erfüllt werden konnten.

4 Elektromobilität

4.1 Stärken und Schwächen

Gegenüber dem auf Verbrennungsmotoren basierenden Verkehr bietet die Elektromobilität sowohl aus volkswirtschaftlicher wie auch aus ökologischer Sicht Vorteile und Potenziale:

- Verringerung der direkten Emissionen der Fahrzeuge wie Abgase und Lärm.
- Minderung der CO₂-Emissionen durch Nutzung von Strom aus nicht fossilen, erneuerbaren Energiequellen oder effizienten fossilen WKK-Anlagen.
- Effiziente Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren.
- Potenzial zur Änderung des Mobilitätsverhaltens durch neue Transportmittel (Elektroroller, Elektrovelos).
- Erhöhung der Versorgungssicherheit durch Nutzung verschiedener Energiequellen.
- Lokale Energieproduktion in PV- und WKK-Eigenerzeugungsanlagen.
- Batteriespeicher des Elektroautos ist aus Sicht des Stromlastmanagements im Gebäude ein steuerbarer Verbraucher.

Für die breite Umsetzung der Elektromobilität gilt es noch verschiedene Probleme vor allem auch technischer Art zu lösen:

- Speicherkapazität und Sicherheit der Batteriespeicher müssen verbessert und ihre Kosten gesenkt werden.
- Es muss für die Batterieladung in Parkzonen öffentliche Zugänge zum Stromnetz geben.

4.2 Elektroauto

4.2.1 Elektromobilität und Stromverbrauch

Der Stromverbrauch der Schweiz lag im Jahr 2009 bei 62 TWh. Davon wurden ca. 5 TWh für Bahn und Tram benötigt. Im Jahre 2008 standen 4 Millionen Personenwagen im Verkehr. Würde man sämtliche Verbrennungsmotorfahrzeuge durch Elektroautos mit einer täglichen Fahrtstrecke von 25 km und einem täglichen Strombedarf von 5 kWh ersetzen, ergäbe das pro Jahr einen zusätzlichen Strombedarf von 7.3 TWh. Dies entspricht einem Anteil von 12% am Stromverbrauch von 2009. Wollte man den Stromverbrauch mit neuen erneuerbarem Strom decken, müssten 12% des Stromverbrauchs von 2009 aus erneuerbaren Quellen stammen [Baumgartner F., 2010].

4.2.2 Energiekosten

Der jährliche Energiebedarf eines Elektrofahrzeugs kann durch eine PV-Anlage gedeckt werden, die auf der Dachfläche eines Carports Platz hat. Auch bei Solarstrom sind die reinen Energiekosten eines Elektrofahrzeugs, ohne Berücksichtigung der Batteriekosten, nicht höher als die eines Benzinautos. Bei einem Verbrauch von 20 kWh/100 km bewegen sich die Energiekosten für PV-Strom um CHF 4.– bis 6.– wenn ein PV-Strompreis zwischen 20 und 30 Rp/kWh angenommen wird. Bei einem heutigen Auto mit einem Verbrauch von 5 bis 7 Liter/100 km Benzin belaufen sich die Treibstoffkosten auf CHF 8.– bis 13.–.

Berücksichtigt man die Batteriekosten des Elektroautos, fallen CHF 8.40/100 km Kosten an (Berechnungsbasis: Batteriestandzeit 100'000 km, Batteriepreis für 20 kWh à 300 EUR/kWh ergeben Batteriekosten von CHF 8'400.–).

4.2.3 Ladestationen und Infrastruktur

Grundsätzlich können Elektroautos an jeder Steckdose aufgeladen werden. Das existierende Netz öffentlich zugänglicher Akkuladestellen ist für Elektrofahrzeuge noch sehr dünn und lange Ladezeiten der Akkumulatoren erfordern bei längeren Reisen eine sorgfältige Weg- und Zeitplanung.

Wechselakkusysteme sind bislang rar, etwa für lokal gebundene Flottenfahrzeuge. Ähnlich wie das heutige Tankstellennetz können Wechselakkusysteme jedoch die Reichweitenbegrenzung aufheben. Die Tatsache, dass noch die dafür notwendige Infrastruktur fehlt, ist vergleichbar mit dem Zustand vor der Verbreitung des Tankstellennetzes für Benzinautos vor gut 100 Jahren. In Ländern wie Israel und Dänemark und anderen Orten und Regionen gibt es bereits Ansätze für ein Netz von Ladestationen und Akkuwechselstationen.

4.2.4 Batterien

Akkus sollen langlebig sein, viel Energie speichern, eine hohe Leistung haben, wenig wiegen und wenig kosten. Bislang sind die Batteriesysteme jedoch die Achillesferse der Elektromobilität. Zur Zeit erreicht ihre Energiedichte nur ein bis zwei Prozent der Energiedichte von flüssigen Kraftstoffen. Eine Übersicht gängiger Batterietypen findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1 Batteriespeicher für Elektrofahrzeuge

| Akkutyp | Energiedichte | Leistungs- dichte | Lebensdauer | Preis/Bemerkungen |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|---|--|
| Blei-Akkus | 50 Wh/kg | 300 W/kg | 500 bis 800 Zyklen: 5'000 -100'000km | 100 bis 300 Euro/kWh. |
| NiCad (Nickel- Cadmium) | 60 Wh/kg | 150 W/kg | 1'000 bis 1'500 Zyklen: >100'000 km | |
| NiMH (Nickel- Metallhydrid) | 80 Wh/kg | 300 W/kg | 1'000 Zyklen: <100'000 km | 430 Euro/kWh |
| Li-Ion (Lithium-Ionen) | 100 bis 200 Wh/kg | 1'800 W/kg | 500 bis 5'000 Zyklen: >100'000 km; (200- 300 km pro Zyklus) | 1'000 Euro/kWh, chinesische Produktion: 300 Euro/kWh Problem: Alterung, nach ca. 3 Jahren zu schnelle Entladung, mechanische Beschädigung kann zu Explosion oder Brand führen |

4.2.5 Reichweite und Fahrverhalten

Nur leistungsfähige Energiespeicher ermöglichen Elektrofahrzeugen Reichweiten, die mit denen von Verbrennungsmotorfahrzeugen vergleichbar sind. Technisch sind bereits Reichweiten von bis zu 500 Kilometern machbar.

Die Analyse der heutigen Fahrzeugnutzung zeigt, dass die beschränkte Reichweite von Elektroautos eher ein psychologisches Problem ist. Im Durchschnitt wird ein Auto für 3 bis 5 Fahrten pro Tag benutzt. Die mittlere Entfernung pro Fahrt liegt zwischen 16 und 26 Kilometern. Das Fahrzeug bewegt sich dabei mit einer mittleren Fahrgeschwindigkeit von 35 bis 52 Stundenkilometern.

Interessant sind auch die mittleren Standzeiten der Fahrzeuge zwischen zwei Fahrten. Diese betragen drei Stunden und bieten sich ideal für die Zwischenladungen der Batterien an. Über Nacht steht ein Auto im Mittel sogar neun Stunden, was problemlos eine vollständige Ladung der Fahrzeugbatterie erlaubt.

Ein kleinvolumiger Verbrennungsmotor als Range Extender wird in den nächsten Jahren Standard im Elektroauto sein. Damit fallen die Negativpunkte betreffend Batterie- und Reichweitenproblematik weg. Aktuelles Beispiel dafür ist der Opel Ampera. Dieses Plug-in-Hybrid-Fahrzeug erzielt mit einer Batterieladung eine Reichweite von 60 km und schaltet danach automatisch auf den Range Extender um, der weitere 500 km Fahrstrecke ohne Betankung ermöglicht.

4.2.6 Elektroauto und Netz

Der Zugang des Elektroautos zum Netz sollte während den verhältnismässig langen Standzeiten erleichtert werden. Die Netzankopplung ermöglicht die gesteuerte Ladung der Fahrzeugbatterie mit einem Gebäude-Lastmanagement. In Kombination mit einer PV-Anlage lassen sich so beispielsweise PV-Leistungsspitzen gegenüber dem Netz über Mittag kappen (Peak Shaving), was das Netz entlastet. Steuerbare Verbraucher wie Fahrzeugbatterien sind interessante Optionen für eine zukünftige Netzoptimierung (Smart Grids).

Das Konzept, das Elektroauto auch zur Abgabe von Strom ins öffentliche Stromnetz (Vehicle to Grid, V2G) zu verwenden, dürfte mit den heute verwendeten Batterien weniger opportun sein. Die Lebensdauer der Fahrzeugbatterien hängt von den Lade-/Entladezyklen ab. Der V2G-Betrieb vermindert die Lebensdauer der Batterie. Das Elektroauto mit der derzeitigen Batterietechnologie und deren Kosten dürfte vorerst nur als ansteuerbarer Verbraucher eingesetzt werden.

V2G kann allenfalls im Rahmen grösserer Unternehmen mit einer Elektrofahrzeugflotte in Frage kommen. Hohe Lastspitzen bedeuten für Firmen Stromtarife, die deutlich über den durchschnittlichen Strompreisen liegen. Unternehmen könnten daher Arbeitnehmern freie Parkplätze für Elektroautos anbieten. Im Gegenzug verpflichten sich die Parkplatznutzer, gegen entsprechendes Entgelt ihre Autobatterie zur Abdeckung von Lastspitzen des Unternehmens zur Verfügung zu stellen. Damit die Lebensdauer der Batterie nicht zu stark reduziert wird, sollte die Netzeinspeisung nicht mehr als 5-10% der Batteriekapazität ausmachen. Die Pufferung des Spitzenbedarfs setzt jedoch auch voraus, dass eine grosse Anzahl an Elektroautos zur Verfügung steht.

4.2.7 CO₂-Emissionen und Ökobilanz von Elektroautos

Auch Hybridfahrzeuge, Brennstoffzellenfahrzeuge und Elektrofahrzeuge gilt es in der ökologische Bewertung kritisch zu betrachten. Zentrale Punkte in der öffentlichen Debatte sind die graue Energie der Batterien im Elektroauto und der getankte Strommix. Eine Ökobilanz der Empa [Notter D. A. et al., 2010] ergab, dass bei einem Elektro-Personenwagen der Golf-Klasse mit Lithium-Ionen-Batterie maximal 15% der ökologischen Gesamtbelastung auf die Batterie entfallen. Dabei sind die Herstellung, der Unterhalt und die Entsorgung mit einge-

rechnet. Die Batterie ist somit nicht die markante zusätzliche Umweltbelastung des Elektrofahrzeuges.

Entscheidend ist die Herkunft des Fahrstroms. Während Strom aus dem europäischen Erzeugermix die Ökobilanz über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs deutlich belastet, führt Strom aus Wasserkraft kaum zu einer zusätzlichen Belastung. In der Betrachtung von der Quelle (Primärenergie) zum Rad kann somit trotz höherer Effizienz des Elektroantriebs die CO₂-Belastung bei einem Auto mit Verbrennungsmotor durchaus etwas tiefer sein als die des Elektrofahrzeugs mit Fahrstrom aus CO₂ belastetem Strommix. So stösst ein mit Kohlestrom-betriebener Elektro-Smart 90 g/km CO₂ aus, ein Smart mit Dieselmotor 88 g/km CO₂. Der Opel-Ampera mit Range Extender und elektrischer Energie aus europäischem Strommix kommt auf 40 g/km CO₂.

Seine klaren Vorteile bezüglich Klima- und Ressourcenschutz kann das Elektroauto dann ausspielen, wenn der getankte Strom aus WKK-Anlagen oder noch besser aus erneuerbaren Energiequellen stammt [Baumgartner F., 2010].

5 Dezentrale Energieproduktion und Stromnetz

Während bisher Stromnetze mit zentraler Stromerzeugung dominierten, geht der Trend hin zu dezentralen Erzeugungsanlagen. Das sind heute vor allem WKK-, PV- und Windkraftanlagen. Dies führt zu einer wesentlich komplexeren Struktur, primär im Bereich der Lastregelung und zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität. Kleinere, dezentrale Stromerzeugungsanlagen speisen im Gegensatz zu heutigen Kraftwerken direkt in die unteren Spannungsebenen der Niederspannungs- und Mittelspannungsnetze ein.

Nivellierung der Last kann mittels intelligenter Netze durch automatische Steuerungen und Kontrolle von Verbrauchsanlagen erfolgen. Ein solches "Smart Grid" integriert alle Akteure auf dem Strommarkt, durch das Zusammenspiel von Erzeugung, Speicherung, Netzmanagement und Verbrauch in ein gesamtes System. Eine Eigenschaft von Smart Grids ist die Möglichkeit, Zustandsinformationen und Lastflussdaten aus den einzelnen Netzelementen, wie z.B. Erzeugungsanlagen, Verbrauchern (Haushalte oder Industrieanlagen) oder auch Transformatorenstationen in Echtzeit abrufen und verarbeiten zu können. Smart grid bezieht neben den Produktionsanlagen auch grössere Verbraucher wie Wärmepumpen, Warmwasserspeicher und Autobatterien in das Netzmanagement mit ein. Damit wird eine Überwachung und Optimierung der miteinander verbundenen Erzeuger und Verbraucher ermöglicht. Ziel ist die Sicherstellung der Energieversorgung auf Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs. Die Erzeugung von Strom kann von den Kontrollsystemen gesteuert werden, wodurch Netzüberlastungen vermieden werden und stets nur so viel Strom wie benötigt produziert wird.

Ein gebäudeeigenes Lastmanagement ergänzt das Smart Grid. Mittelfristig werden PV-Anlagen auf Hausdächern zum Standard. PV-Anlagen produzieren mit einer gewissen Zufälligkeit Strom. Mit einem lokalen Lastmanagement lassen sich zu einem gewissen Grad die stochastischen Lieferprofile ausgleichen. Voraussetzung dafür sind schaltbare Verbraucher oder Stromspeicher.

Die erneuerbaren Energien werden im Sommer einen grösseren Anteil an Elektrizität liefern. Im Winter ergänzen regelbare WKK-Anlagen die geringe PV-Stromproduktion. Stationäre WKK-Anlagen aber auch Range Extender von Elektroautos nutzen fossile Energieträger effizient, da die Abwärme zur Raumheizung genutzt werden kann. Diese Art unterschiedlicher saisonaler Produktion ergibt effiziente Gesamtsysteme einer polyvalenter Energiebereitstellung.

Zwischen dem Smart Grid und dem lokalen Lastmanagement steht der Smart Meter. Seine zentrale Aufgabe ist die Erfassung der Netzlast und -stabilität. An den Smart Meter ist das lokale Lastmanagement angeschlossen, das die im Gebäude schaltbaren Geräte bei Bedarf aus- beziehungsweise einschaltet.

6 Systemmodellierung

6.1 Grundlagen

Gemeinsam mit Elektrofahrzeugexperten wurde in einem Workshop das Synergiepotential von Elektrofahrzeug und häuslicher Stromversorgung/Stromerzeugung analysiert. Aufgrund des Workshops wurden die relevanten Konzepte der polyvalenten Energiebereitstellung für Gebäude und Fahrzeug entwickelt. Diese Konzepte bilden die Basis für die Evaluation der Energie- und Umwelteffizienz der verschiedenen Systeme polyvalenter Energieerzeugung.

Für die ausgearbeiteten Gebäude- und Anlagensysteme wurden praxisnahe Szenarien definiert. Die Betrachtung der Systemeffizienz von polyvalenten Energieanlagen basiert auf einer Wohneinheit. Damit lassen sich Primärenergiebedarf, Kohlendioxidemissionen und Umweltbelastung auf Wohnbauten verschiedener Grösse als Ein- oder Mehrfamilienhäuser skalieren.

6.2 Dynamisch-thermische Gebäudesimulation

Die Bewertung der Energie- und Umweltaspekte von polyvalenten Energiesystemen in Gebäuden erfolgt mittels dynamisch-thermischer Gebäude- und Energieanlagensimulation. Für das vorliegende Projekt wird das IDA ICE-Tool v4 angewendet. IDA ist ein gleichungsbasiertes Simulationswerkzeug, das modular hierarchisch strukturiert und durch Nutzung des Neutral-Modeling-Formats universal anwendbar ist [Trcka M., 2008].

6.2.1 Modellbildung der WKK-Anlagen

Die WKK-Anlagedaten für die Systemmodellierung basieren auf Feldmessungen und skalierten Daten aus Werkdaten.

Die Kennzahlen der Pellet-WKK-Anlage [www.sunmachine.de, 2010-06-06] entstammen Feldmessungen in verschiedenen Voll- und Teillastzuständen. Die Daten der Energiebilanz basieren auf einer Messung über einen Zeitraum von 15 Stunden. Die Emissionsdaten der Anlage sind in den Betriebsphasen Kaltstart, Warmstart und Dauerbetrieb gemessen. Die Kaltstartemissionen sind in der Startphase der Feuerung, die Warmstartemissionen in der Anfachphase der Feuerung 1 Stunde nach Betriebspause und der Dauerbetrieb 6 Stunden nach dem Start der Feuerung gemessen.

Mittels Recherche wurden verfügbare Emissions- und Leistungsdaten von Mikrogasturbinen (MGT) aufgearbeitet. Anhand dieser Datengrundlage wurde ein physikalisches Modell erstellt, evaluiert und auf einen kleineren Leistungsbereich skaliert. Dieses theoretische Modell orientiert sich am Stand der Technik und stellt ein Mass für zukünftige Entwicklungen in der dezentralen Energieversorgung auf der Basis von MGT dar.

Es wurde eine Marktrecherche von Verbrennungsmotoraggregaten durchgeführt, die sich als Diesel- oder Benzin-getriebene Range Extender für Elektrofahrzeuge eignen.

6.2.2 Modellierungsgrad

Für den Modellierungsansatz und die Umsetzung des Modells für IDA ICE wurde ein mittlerer Detaillierungsgrad für die dynamische Simulation der WKK-Anlagen festgelegt.

Die Modellierung von WKK-Anlagen wurde im Rahmen des IEA Annex 42 [Beausoleil-Morrison I. (ed.), 2008] vorangetrieben. Als Resultat wurden zwei WKK-Modelle erstellt und, soweit die Datengrundlage dies zulies, kalibriert. Mit dem einen Modell lassen sich Solid-Oxide- und Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen abbilden, mit dem andern lassen sich Verbrennungsmotoren darstellen.

Das Modell für Verbrennungsmotoren erlaubt die dynamische Bewertung des Brennstoffbedarfs sowie des Outputs an Wärme und Elektrizität. Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Modells. Es besteht aus den Komponenten Energy Conversion-Control-Volume, Thermal Mass-Control-Volume und Cooling liquid-Control-Volume.

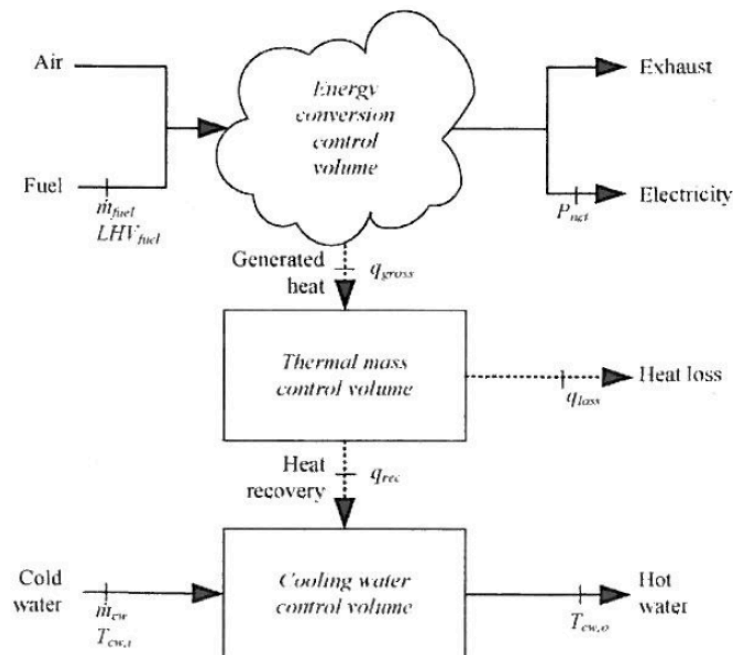


Abbildung 1 Modellaufbau einer Wärme-Kraftkopplungsanlage für die Simulation nach IEA Annex 42

Drei Möglichkeiten der WKK-Modell-Implementierung wurden in IDA ICE evaluiert:

- 1) Performance Maps
- 2) volle IEA Annex 42-Modell-Implementierung
- 3) Teil-Implementierung
(siehe Anhang A – Bewertung des Modelldetaillierungsgrades)

Für das vorliegende Projekt wurde die Teil-Implementierung gewählt, da deren Vorteile die Nachteile überwiegen. Die Implementierung von WKK-Anlage-Modellen ist nicht zu aufwändig. Die Ergebnisse erreichen eine zulässige Genauigkeit. Die Teil-Implementierung sieht die Implementierung der wesentlichen Bestandteile der IEA Annex 42-Modelle vor. Die Kalibrierung wird auf die wesentlichen Parameter reduziert, welche die instationären Charakteristiken beinhalten, für die auch Messergebnisse vorliegen.

6.2.3 Bewertung der Anlagentechnik

Die Bewertung der Anlagentechnik in Gebäuden basiert üblicherweise auf dem Primärenergiebedarf und den CO₂-Emissionen als Vergleichskriterien. Um jedoch den weiter greifenden Einfluss der Technologien auf die Umwelt bewerten zu können, sind zusätzliche Vergleichskriterien hilfreich. Solche Kriterien sind beispielsweise der kumulierte Energieaufwand, der MIPS-Indikator (Material-Input pro Serviceeinheit), die Wirkungsindikatoren der CML-Methode (Methode des 'Centrum voor Milieukunde' in Leiden, NL, CML), der Eco-Indikator 99 oder Umweltbelastungspunkte [Koch M., 2008].

Um sowohl die Vergleichbarkeit mit historischen Studien, als auch den gesamten weiterführenden Einfluss auf die Umwelt bewerten zu können, werden in dieser Arbeit für die Bewer-

tung Primärenergiebedarf, CO₂-Emissionen und Umweltbelastungspunkte nach Koch verwendet.

Primärenergieeinsatz, CO₂-Emissionen und Umweltbelastung wurden nach Faktoren von R. Frischknecht ([Frischknecht R., Tuchschnid M., 2008], siehe auch Tabelle 14) bestimmt. Bei Produkten für die keine Faktoren verfügbar waren wie z.B. Ökostrom, wurden Annahmen getroffen und Faktoren errechnet.

Umweltbelastungspunkte (UBP) basieren auf dem Konzept der ökologischen Knappheit und quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energieressourcen, Land und Wasser, Emissionen in Luft, Gewässern und Boden sowie die Abfallentsorgung. Die Nutzung der UBP erlaubt die kombinierte und gewichtete Bewertung der individuell betrachteten Kriterien Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen.

7 Gebäudetypen

7.1 Systemgrenze Wohneinheit

Die Betrachtung der Systemeffizienz von polyvalenten Energieanlagen bezieht sich auf eine Wohneinheit (WE). Mit dem Bezug auf eine Wohneinheit lassen sich Zielgrössen wie Primärenergiebedarf, Kohlendioxidemissionen oder Umweltbelastungspunkte auf Wohnbauten verschiedener Grösse als Ein- oder Mehrfamilienhäuser skalieren. Die Energieversorgung deckt den Bedarf für Raumwärme, Brauchwarmwasser, Haushaltstrom für Licht und Geräte sowie die jährliche Fahrleistung von 18'000 km eines Elektroautos ab.

Um den Gegebenheiten des Schweizer Gebäudeparks gerecht zu werden, wurden drei typische Wohneinheiten für die Szenarien festgelegt. Eine Wohneinheit basiert auf der Geometrie des Minergie-P-Musterhauses, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist.

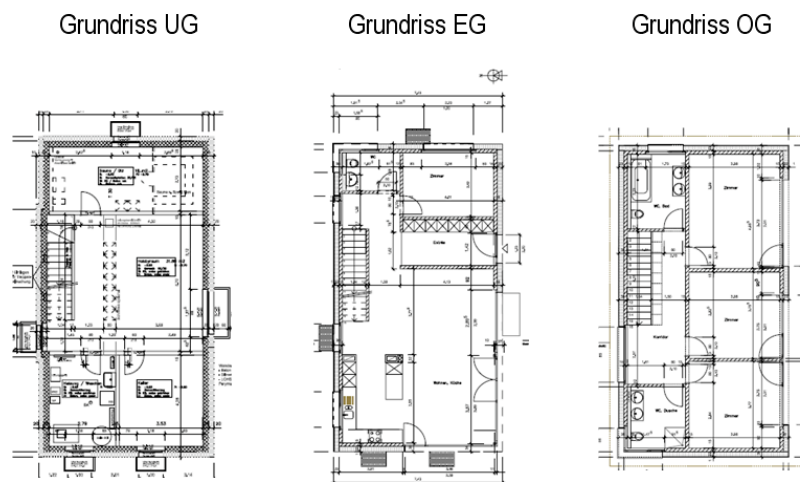


Abbildung 2 Grundrisse eines Minergie-P-Musterhauses dessen Geometrie für die betrachtete Wohneinheit (WE) verwendet wurde.

Die für die Simulation verwendete Wohneinheit ist nach drei Varianten differenziert:

- 1) Wohneinheit nach Schweizer Durchschnitt der Baujahre 1925 - 1965:
Bezeichnung: 'Bestand 1980'
- 2) Wohneinheit gemäss Mustervorschriften der Kantone (MuKE) [EnDK, 2008]
Bezeichnung: 'MuKE'
- 3) Wohneinheit nach Minergie-P-Vorgaben [Ragonesi M. et al., 2008]
Bezeichnung: 'Minergie-P'

Angaben zur Materialisierung gemäss energetischem Gebäudestandard finden sich in Anhang A – Materialisierung der Wohneinheit in Abhängigkeit vom Gebäudestandard

Die Wohneinheit ist durch die folgenden Eckdaten charakterisiert (Tabelle 2).

Tabelle 2 Eckdaten der Wohneinheit (WE)

| Parameter | Einheit | Wert |
|------------------|-------------------|------|
| Grundfläche | [m ²] | 160 |
| Raumhöhe | [m] | 2.5 |
| Warmwasserbedarf | [l/p*d] | 40 |

7.2 Variantenmatrix

Die Wohneinheiten mit polyvalenten Energieanlagesystemen wurden bezüglich Primärenergiebedarf, Klimagasemissionen und Umweltbelastungspunkte mit Referenzsystemen gemäss Tabelle 3 verglichen. Das Referenzszenario 'Konservativ' deckt den Energiebedarf ausschliesslich mit fossilen Brenn- und Treibstoffen ab. Das Referenzszenario 'Progressiv' versorgt die Wärme- und Mobilitätsbedürfnisse mit Netzstrom ab. Als Variante wird das Szenario 'Progressiv' mit einer Photovoltaik-Anlage ergänzt.

Tabelle 3 Übersicht der gewählten Systemszenarien und der verwendeten Systemkomponenten

| Systemszenarien | Systemkomponenten |
|---------------------------------------|--|
| Referenzszenario 'Konservativ' | <ul style="list-style-type: none"> Gaskessel für Raumwärme und Brauchwarmwasser Verbrennungsmotorfahrzeug mit fossilen Treibstoffen Netzstrom |
| Referenzszenario 'Progressiv' | <ul style="list-style-type: none"> erdgekoppelte Wärmepumpe für Raumwärme und Brauchwarmwasser Elektrofahrzeug Variante: Netzstrom Variante: Netzstrom mit Photovoltaik-Anlage |
| Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' | <ul style="list-style-type: none"> WKK-Anlage für Strom und Raumwärme Photovoltaik-Anlage Wärmepumpe nur für Brauchwarmwasser Elektroauto Netzverbund, Photovoltaik-Anlage (PV) |

Die Verbindung der drei Wohneinheiten 'Bestand 1980', 'MuKE' und 'Minergie-P' mit den Systemszenarien ergeben den Gesamtraster für die in Tabelle 4 dargestellten Variantenmatrix.

Tabelle 4 Variantenmatrix der Systemszenarien

| Systemszenarien | Bestand 1980 | MuKE | Minergie-P |
|--|--------------|------|------------|
| Referenzszenario 'Konservativ' | | | |
| Referenzszenario 'Konservativ' | X | X | X |
| Referenzszenario 'Progressiv' | | | |
| Referenzszenario 'Progressiv' | X | X | X |
| Referenzszenario 'Progressiv + PV' | X | X | X |
| Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' | | | |
| WKK-Anlage | X | X | X |
| Mikrogasturbine (MGT) | X | X | X |
| Stirlingmotor | X | X | X |

8 Anlagesysteme

8.1 Anlagesysteme Referenzszenario 'Konservativ'

Das konservative Szenario repräsentiert die weit verbreitetste Variante der im Einsatz stehenden Anlagenkonzepte. In diesem Szenario werden keine neuen Technologien zur Bereitstellung von Haushaltsstrom und Wärme oder für die Mobilität eingesetzt. Die Systemkomponenten sind in Tabelle 5 differenziert nach den Techniken für Mobilität, Heizung und Brauchwarmwasser mit dem entsprechenden Energiestandard dargestellt.

Tabelle 5 Anlagesysteme im Referenzszenario 'Konservativ' – Spezifikation der verwendeten Anlagekomponenten.

| | | Bestand 1980 | MuKE | Minergie-P |
|------------------|----------------------|--|---|------------|
| Stromversorgung | Netz | CH-Verbrauchermix | | |
| Heizung | Wärmeerzeugung | Gaskessel 1975, Kesseltemperatur 75°C | kondensierender Gaskessel | – |
| | Verteilung/ Regelung | aussentemperaturgeführte Vorlaufregelung (VL-Temperatur 60°C) | aussentemperaturgeführte Vorlaufregelung (VL-Temperatur 35°C) | – |
| | Wärmeabgabe | Radiatoren | Fussbodenheizung | – |
| Brauchwarmwasser | | mittels Heizkessel auf 60°C (SIA 385/3), Jahresgleichzeitigkeit nach Fahrplan Wohnen (SIA MB 2024), Kaltwassereintrittstemperatur 10°C | | |
| Mobilität | | Auto mit Benzinmotor: Verbrauch 70 kWh/100 km – 18'000 km/a | | |

8.2 Anlagesysteme Referenzszenario 'Progressiv'

Das progressive Szenario repräsentiert die in Neubauten bzw. Renovierungen eingesetzten Anlagesysteme. In diesem Szenario wird die Nutzung der aktuellen Technologien zur Bereitstellung von Haushaltsstrom und Wärme berücksichtigt. Neu werden die Mobilitätsdienstleistungen mit einem Elektroauto abgedeckt. Die Zusammenstellung der verwendeten Techniken für Mobilität, Heizung und Brauchwarmwasser sowie der Energiestandard findet sich in Tabelle 6.

Tabelle 6 Anlagesysteme im Referenzszenario 'Progressiv' – Spezifikation der verwendeten Anlagekomponenten.

| | | Bestand 1980 | MuKE n | Minergie-P |
|------------------------|------------------------------|---|---|---|
| Stromversor- gung | Photovoltaik/ Netzverbund | Wirkungsgrad η : 15%; Panelfläche: 20 m ² ; Anstellwinkel: optimiert Strom: CH-Verbrauchermix. | | |
| Heizung | Wärmeerzeu- gung | erdgekoppelte Wärmepumpe mit Speicher; Erdreich- austrittstemperatur 0°C; Speichervolumen: 400 Liter | | erdgekoppelte Wärmepumpe Erdreichaustritts- temperatur 0°C |
| | Verteilung/ Reg- lung | aussentemperaturge- führte Vorlaufregelung (VL 60°C) | aussentemperaturgeführte Vorlaufregelung (VL 35°C) | aussentempera- turgeführte Rück- laufregelung (RL 25°C) |
| | Wärmeabgabe | Radiatoren und Ther- mostatventil; Heizgrenz- temperatur 16°C | Fussbodenheizung; Heizgrenztemperatur 12°C | |
| Brauchwarmwasser (BWW) | | erdgekoppelte Wärmepumpe mit BWW-Speicher; BWW-Vorrangschaltung; Speichervolumen: 270 Liter; Speicherverluste an Raum über ΔT (Raumtem- peratur 10°C); Legionellen-BWW-Speicheraufheizung (1xWoche > 60°C). | | |
| Mobilität | | Elektroauto: Stromverbrauch: 23 kWh/100 km – 18'000 km/a | | |

8.3 Anlagesysteme Referenzszenario 'Polyvalente Energieversorgung'

Das polyvalente Szenario repräsentiert den heutigen Stand innovativer Anlagenkonzepte, die in der Praxis eingesetzt werden. Diese Technologien decken den Bedarf für Haushaltsstrom und Wärme ab. Auch hier kommt ein Elektroauto zum Einsatz. In Tabelle 7 sind die eingesetzten Techniken beschrieben.

Tabelle 7 Anlagesysteme im Referenzszenario 'Polyvalente Energiesysteme' – Spezifikation der verwendeten Anlagekomponenten.

| | | Bestand 1980 | MuKE | Minergie-P |
|------------------|---------------------|--|--|---|
| Stromversorgung | Netzverbund | Strom: CH-Verbrauchermix | | |
| | Gas-WKK-Anlage | $\eta_{\text{elektr.}}$ 27%; $\eta_{\text{therm.}}$ 66%; Brennstoff: Erdgas oder Biogas als Variante; Strom: CH Verbrauchermix. | | |
| | Stirlingmotor | $\eta_{\text{elektr.}}$ 15,4%; $\eta_{\text{therm.}}$ 68,6%; Brennstoff: Holzpellets | | |
| | Gasturbine | $\eta_{\text{elektr.}}$ 24%; $\eta_{\text{therm.}}$ 72%; Leistung _{therm.} : 12,5 - 44 kW | | |
| | Photovoltaik | η : 15%; Panelfläche: 20 m ² ; Anstellwinkel: 30° | | |
| Heizung | Wärmeerzeugung | Wärmepumpenboiler mit Pufferspeicher; WP-Betrieb Hochdruck; Speichervolumen: 400 Liter | | |
| | Verteilung/Regelung | aussentemperaturgeführte Vorlaufregelung (VL-Temperatur 60°C) | aussentemperaturgeführte Vorlaufregelung (VL 35°C) | aussentemperaturgeführte Vorlaufregelung (VL-Temperatur 30°C) |
| | Wärmeabgabe | Radiatoren + Thermostatventil; Heizgrenztemperatur (HG) 14°C | Fussbodenheizung; Heizgrenztemperatur (HG) 6°C | Fussbodenheizung; Heizgrenztemperatur (HG) 2°C |
| Brauchwarmwasser | | Wärmepumpenboiler; BWW-Vorrangschaltung; Speicher: 270 Liter; Speicherverluste; Legionellen-BWW-Speicheraufheizung (1xWoche > 60°C). | | |
| Mobilität | | Elektroauto: Stromverbrauch: 23 kWh/100 km – 18'000 km/a | | |

9 Anlagekomponenten

Während Simulationsmodelle für Speicher, Photovoltaikpaneele und Wärmepumpen schon ausgiebig in der Literatur beschrieben und angewendet werden, sind WKK-Anlagen ein noch wenig bearbeitetes Thema. Im Rahmen des Projektes wurden drei Typen von Wärmeerzeugern und Kleinstkraftwerken betrachtet. Die Wärmeerzeuger sind Brennwertkessel und Erdwärmesonden. Die betrachteten Mikro-WKK-Anlagen sind Ottomotoren, Stirlingmotoren und Mikrogasturbinen. Im Folgenden sind die verwendeten Systemkomponenten kurz beschrieben.

9.1 Erdsondenwärmepumpen

Für die Wärmepumpe wurde eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einem COP von 4.5 bei den Referenzbedingungen einer Soletemperatur von 0°C und einer Vorlauftemperatur von 35°C zugrunde gelegt. Die Umrechnung auf verschiedene Betriebszustände erfolgt gemäss SIA MB 2044 [SIA, 2010]. Die Quelltemperatur wurde auf konstant 0°C fixiert.

9.2 Fossil befeuerte WKK-Anlagen

9.2.1 Gas-Wärme-Kraft-Kopplungsanlage

Unter der Bezeichnung "Strom erzeugende Heizung" bieten verschiedene Hersteller Mikro-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen an. Die Geräte haben eine elektrische Leistung von wenigen Kilowatts und sind damit auf Wohneinheiten von Ein- und Zweifamilienhäusern zugeschnitten. Mit zum System gehören u.a. ein Wärmespeicher und ein Brennwert-Gaskessel für Spitzenlast- und Notbetrieb. Einige Geräte sind für einen leistungsmodulierten Betrieb konzipiert. Neben den Ottomotor-betriebenen Mikro-WKK-Geräten finden sich Anlagen mit Stirlingmotor. Den geringeren elektrischen Wirkungsgrad wiegt die teilweise hermetische Bauweise der Stirlingmotoren mit nahezu verschleissfreiem Betrieb auf. Eine Zusammenstellung der auf dem Markt angebotenen WKK-Geräte findet sich in Tabelle 8.

Das genutzte Modell zur Beschreibung von WKK-Anlagen basiert auf den Modellen, die im Rahmen des IEA Annex 42 ausgearbeitet wurden [Beausoleil-Morrison I. (ed.), 2008]. Als Resultat wurden zwei WKK-Modelle erstellt und, soweit die Datengrundlage dies zulies, kalibriert. Mit dem einen Modell lassen sich Solid-Oxide- und Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen abbilden, mit dem andern lassen sich Verbrennungsmotoren darstellen.

Diese Ansätze wurden für die Implementierung des WKK-Tools in der IDA ICE-Umgebung mit berücksichtigt. Für den Modellierungsansatz und die Umsetzung des Modells für IDA ICE wurde ein mittlerer Detaillierungsgrad für die dynamische Simulation der WKK-Anlagen festgelegt.

Tabelle 8 Auf dem Markt verfügbare Gas-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen.

| Hersteller | Typ | Prinzip | elektr. Leistung | elektr. Wirkungs- grad | therm. Leistung |
|---|---------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|
| | | | [kW] | [%] | [kW] |
| AISIN Seiki Co., Ltd | Mini-BHKW | Ottomotor | 0,3 - 4,6 | 28,8 | 11,7 |
| EC Power A/F | XRGI 15G-TO | Ottomotor | 6,0 - 15,2 | ca. 30,0 | 17,0 - 30,0 |
| green energy solutions | green two | Ottomotor | 5,0 - 6,5 | ca. 27,0 | 12,0 - 16,0 |
| Kirsch GmbH | microBHKW L 4.12 | Ottomotor | 2,0 - 4,0 | 25,0 | 5,0 - 12,0 |
| proennis GmbH & Co. KG | primus 1.4 | Ottomotor | 2,0 - 3,8 | ca. 24,2 | 5,6 - 10,7 |
| SenerTec GmbH | Dachs G5.5 | Ottomotor | 5,5 | 27,0 | 12,5 |
| Vaillant GmbH | ecoPOWER1.0 | Ottomotor | 1,0 | 26,3 | 2,5 |
| Vaillant GmbH | ecoPOWER 3.0 | Ottomotor | 1,3 - 3,0 | 25,0 | 4,0 - 8,0 |
| Vaillant GmbH | ecoPOWER 4.7 | Ottomotor | 1,3 - 4,7 | 25,0 | 4,0 - 12,5 |
| DeDietrich Remeha GmbH | eVita | Stirlingmotor | 1,0 | ca. 14,0 | 3,0 - 23,7 |
| Viessmann Werke GmbH & Co. KG | Vitotwin 300-W | Stirlingmotor | 1,0 | 15,0 | 3,6 - 26,0 |
| WhisperGen (EHE Efficient Home Energy SL) | | Stirlingmotor | 1,0 | ca. 11,0 | 7,5 - 14,5 |
| Otag Vertriebs GmbH | Lion Powerblock | Freikolben- Dampfmaschine | 0,3 - 2,0 | ca. 12,0 | 3,0 - 16,0 |

9.2.2 Mikrogasturbine

Die Einbettung von Gasturbinen-WKK-Anlagen in das verwendete Modell der Simulationsrechnungen für die verschiedenen Anlagensysteme erforderte eine Mikrogasturbine (MGT) mit einem elektrischen Leistungsbereich um 15 kW.

Auf der Basis der MGT-Modellbildung anhand einer auf dem Markt verfügbaren 30 kW MGT wurden die erarbeiteten Ansätze zur Abbildung des Teillastverhaltens evaluiert. Hierfür wurde über ein Upscaling der 30 kW-MGT eine MGT mit 60 kW Klemmenleistung ausgelegt und mit den Daten einer verfügbaren 60 kW-MGT verglichen.

Der Vergleich ergab, dass beim Upscaling der elektrische Wirkungsgradverlauf sowie die Klemmenleistung mit einer mittleren relativen Abweichung von 11.7% von den Nenndaten und die Abgastemperaturen mit einer mittleren relativen Abweichung von 12.5% abgebildet werden können.

Aufgrund der Bestätigung des Upscaling-Ansatzes dieses vereinfachten Modells und der guten Übereinstimmung im Leistungsbereich über 50% Nennleistung, wurde ein Downscaling auf eine rechnerisch ausgelegte MGT mit 15 kW Klemmenleistung durchgeführt. Entstanden ist ein Modell, das sich im Teillastbereich ähnlich wie die 30 kW- und 60 kW-MGT verhält. Die Details zu diesem Ansatz und zur Modellierung sind mit dem Konferenzbeitrag [Keller T. et al., 2011] veröffentlicht worden.

Das in der Simulationsrechnung verwendete MGT-Modell weist folgende Daten auf:

- Klemmenleistung 14.8 kW
- elektrischer Wirkungsgrad 24.3%
- maximale Abgastemperatur 252°C.

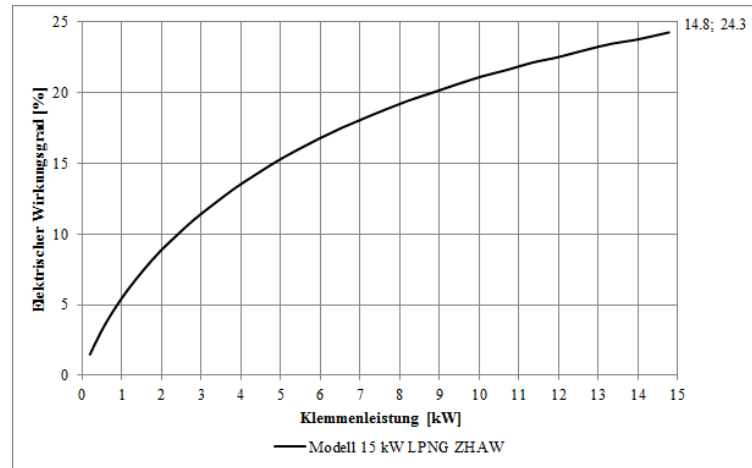


Abbildung 3 Klemmenleistung zu elektrischem Wirkungsgrad.

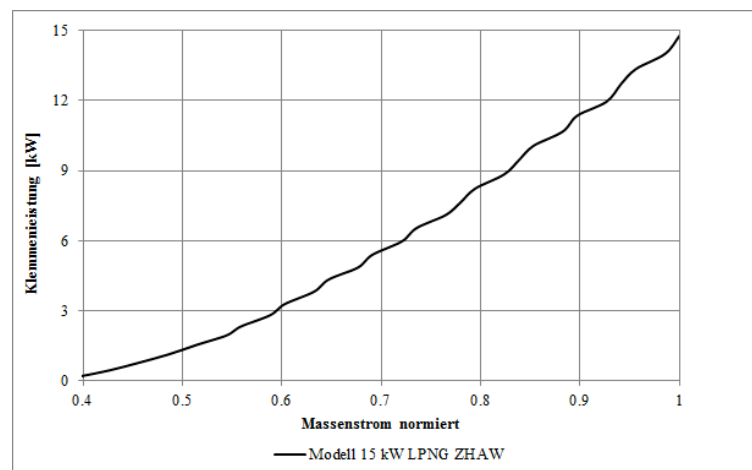


Abbildung 4 Verlauf der Abgastemperaturen.

Für die Potenzialabschätzung von MGT kleiner als 15 kW Klemmenleistung im Gebäude-technikbereich setzt dieses Modell einen Massstab. Die daraus entwickelten thermodynamischen Simulationsmodelle können für Potenzialabschätzungen in dynamischen Gebäudesimulationsprogrammen wie IDA/ICE und TRNSYS verwendet werden. Als Emissionswerte wurden diejenigen von vorhandenen Komponenten (Werte für C30 NG, Tabelle 9) als Stand der Technik gewählt und für das Simulationsmodell verwendet.

Tabelle 9 Emissionsdaten für Mikrogasturbinen.

| | | NOx | CO | CO ₂ | VOC (hier als Methan) | P _{el} | P _{th} |
|-----------------|--------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Capstone | | [mg/m ³] | [mg/m ³] | [kg/MWh _{el}] | [mg/m ³] | [kW] | [kW] |
| C30 NG | Erdgas | 18 | 50 | 767 | 6 | 30 | 80 |
| C65 NG Standard | Erdgas | 19 | 50 | 690 | 5 | 65 | 148 |
| C65 NG Low NOx | Erdgas | 8 | 50 | 713 | 5 | | |
| C65 NG CARB | Erdgas | 8 | 9 | 713 | 2 | | |
| C200 NG | Erdgas | 18 | 50 | 604 | 5 | 200 | 395 |
| C200 NG CARB | Erdgas | 8 | 9 | 604 | 2 | | |
| Turbec (API) | | | | | | | |
| T100 | Erdgas | 32 | 18 | k.A. | 10 | 100 | 155 |

Modellierung der Abwärmenutzung

Für die Modellierungsansätze der Abwärmenutzung wurde eine mögliche Prozessabbildung der Wirkungsgradverläufe bezüglich der Heiz- und Warmwasseraufbereitung angestrebt und keine exakte Modellabbildung, da keine exakten Messdaten, sondern nur die Randbedingungen für den Volllastbetrieb sowie die ausgedruckten Wirkungsgradverläufe vorlagen.

Die Abbildung der Abgasnutzung für die Heiz- und Brauchwassererwärmung zeigte, dass der Ansatz über die Anpassung des kA-Werts (Wärmedurchgangszahl*Fläche) für beide Messungen in der oberen Hälfte des Leistungsspektrums bestätigt wird, bei der C30 ebenfalls in der unteren. Die Gründe des unterschiedlichen Verhaltens des Wärmetauschers der C65 sind nicht bekannt, werden jedoch in der Veränderung der Strömungseigenschaften auf der Luftseite vermutet. Trotz allem ist der vereinfachte Ansatz zu bevorzugen, da der unterste Leistungsbereich für den Betrieb einer MGT wirtschaftlich erst gar nicht in Frage käme. Weiter konnte damit das Verhalten des Abgaswärmetauschers der unabhängigen Messung einer C30 MGT qualitativ nachgebildet werden.

Die Untersuchung zeigte ebenfalls, dass gemäss Messungen, bei der Heiz- und Brauchwarmwassererwärmung mit 80/60°C Kreislauf, Gesamtwirkungsgrade bis zu 85% erreicht werden, was aktuelle Datenblätter von Capstone bestätigen. Ein Wirkungsgrad von 84% für eine Mikrogasturbine mit 15 kW Klemmenleistung ist als Zielwert plausibel.

Es wurden für das Projekt zwei theoretische C15-Simulationsmodelle erstellt. Eines mit 60/80°C Brauchwarmwasserzyklus mit 84% Gesamtwirkungsgrad und eines mit 20/60°C Brauchwarmwasserzyklus mit einem Gesamtwirkungsgrad von 96%. Im Zuge der MGT-Modellierung für die dezentrale Energieversorgung wird eine Brauchwassererwärmung mit Vor- / Rücklauftemperatur von 80/60°C vorgesehen. Raumheizung und Warmwasserbereitstellung für Wohneinheiten sollen über die Mikro-WKK-Anlagen (WKK: Kraft-Wärme-Kopplung) gewährleistet werden.

Modell (I) mit Heiz- und Warmwassererwärmung 60/80°C:

- Elektrischer Wirkungsgrad bei Volllast ≈ 24%
- Thermischer Wirkungsgrad bei Volllast ≈ 60%
- Gesamtwirkungsgrad bei Volllast ≈ 84%
- Leistung Abgaswärmetauscher 36-9.5 kW (Heizleistung)
- Klemmenleistung bei Volllast 14.8 kW (Erdgasverdichter 0.45 kW berücksichtigt)
- Brennstoffeinsatz 60-13.5 kW Erdgas (H_u)
- Abgaseintrittstemperatur 251-186°C in Wasser-Luft-Wärmetauscher
- Abgasaustrittstemperatur 65-61°C

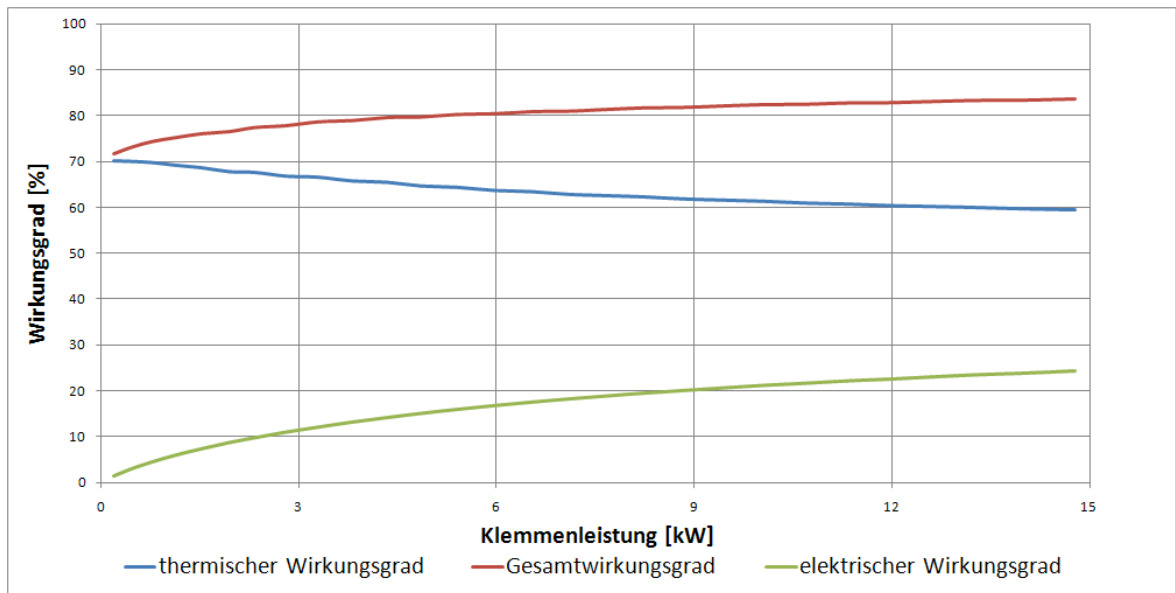


Abbildung 5 Wirkungsgradverläufe Simulation mit Heiz- und Warmwasseraufbereitung 80/60°C

Die Zunahme des thermischen Wirkungsgrads im tieferen Leistungsbereich ist stark abhängig vom benötigten Temperaturniveau des Wassers. D.h. je höher das Temperaturniveau, desto geringer ist der thermische Wirkungsgrad. Zudem verläuft er damit auch flacher, da die Wirkungsgradsteigerung im unteren Leistungsbereich relativ zum Brennstoffeinsatz ebenfalls kleiner wird, weswegen das Ausscheren schwächer ausfallen würde. Deshalb ist das Ansteigen des thermischen Wirkungsgrads nicht als falsch zu bewerten.

Modell (II) mit Heiz- und Warmwassererwärmung 20/60°C:

In diesem Modell wird vom 'Capstone-Standard' 60/80°C Abstand genommen und ein leistungsfähigerer Wärmetauscher verwendet. Das Verhalten wird ebenfalls über den vorgestellten Ansatz der kA-Approximation modelliert, welcher bei der Abbildung der C30-Messdaten evaluiert worden ist.

- Elektrischer Wirkungsgrad bei Volllast $\approx 24\%$
- Thermischer Wirkungsgrad bei Volllast $\approx 72\%$
- Gesamtwirkungsgrad bei Volllast $\approx 96\%$
- Leistung Abgaswärmetauscher 44-12.5 kW (Heizleistung)
- Klemmenleistung bei Volllast 14.8 kW (Erdgasverdichter 0.45 kW berücksichtigt)
- Brennstoffeinsatz 61-13.7 kW Erdgas (H_u)
- Abgaseintrittstemperatur 251-186°C in Wasser-Luft-Wärmetauscher
- Abgasaustrittstemperatur 25-21°C (Wassertaupunkt $< 50^\circ\text{C}$, Anstieg Korrosionsgeschwindigkeit)

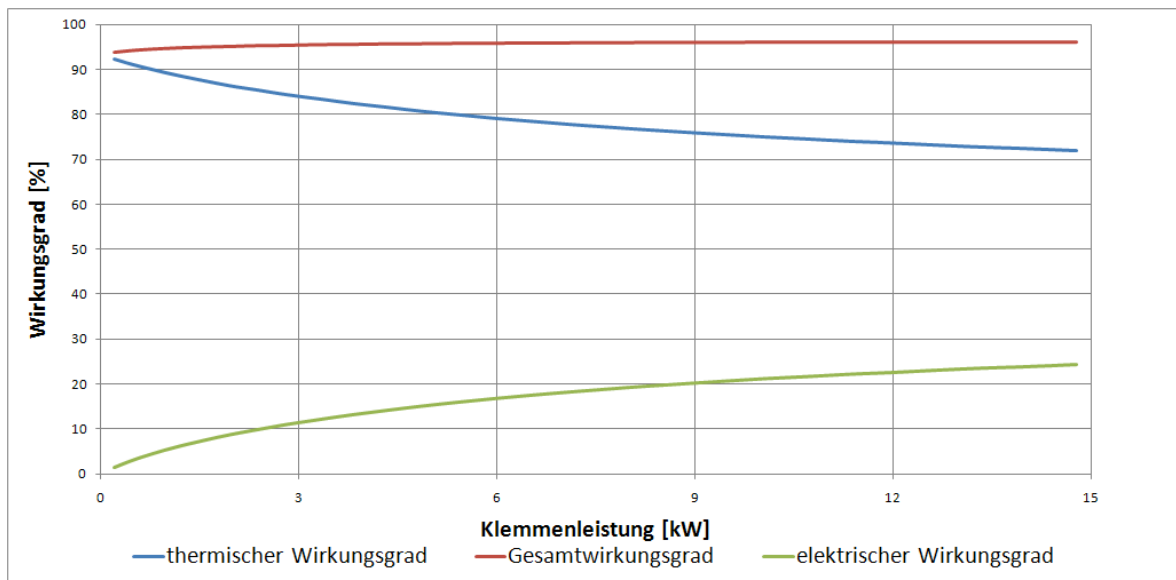


Abbildung 6 Wirkungsgradverläufe Simulation mit Heiz- und Warmwasseraufbereitung 60/20°C

9.3 Biobrennstoff-befeuerte WKK-Anlagen

9.3.1 Betriebsdaten eines Pellet-befeuerten Stirlingmotors

Der Einsatz von WKK-Anlagen ist aus Sicht einer rationellen Energienutzung anzustreben. Eine Anlage, die zudem mit biogenem und somit CO₂-neutralem Brennstoff Pellet betrieben werden kann, ist von speziellem Interesse.

Als eine der wenigen Anbieter stellte die Firma Sunmachine GmbH (D) Pellet-befeuerte WKK-Anlagen her. An einer Pilotanlage im Ökozentrum Langenbruck wurden die Leistungsdaten der WKK-Anlage unter realen Bedingungen analysiert.

Die Sunmachine wurde in drei verschiedenen Betriebszuständen getestet. Im Volllastbetrieb wurde die Sunmachine mit und ohne schalldämmende Hülle vermessen. Zusätzlich wurden Messungen im Teillastbetrieb durchgeführt. Die Sunmachine war noch nicht für den Betrieb im Teillastbereich programmiert. Durch eine steuerungsinterne Reduktion der Erhitzerkopf-temperatur konnte dennoch im Teillastbereich gefahren werden.

Leistung

Die werkseitigen Leistungsangaben konnten auf dem Prüfstand erreicht werden. So lieferte die Sunmachine bis zu 3.2 kW Strom und bis zu 14 kW Wärme.

Energiebilanz

Die Messungen der Energiebilanz wurden jeweils über einen Zeitraum von 10-15 Stunden durchgeführt. Basierend auf den drei Versuchsanordnungen ergaben sich folgende Wirkungsgrade der Sunmachine:

Tabelle 10 Ergebnisse der Energiebilanzmessungen bei verschiedenen Betriebszuständen.

| Betriebszustand | Abgabe Energie th. [kWh] | Abgabe Energie el. [kWh] | Anteil th. [%] | Anteil el. [%] | η gesamt [%] | η elektrisch | Strom- kennzahl |
|---|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| Teillast (7 kWth) | 153 | 50.7 | 75.1 | 24.9 | 79.4 | 19.8 | 0.33 |
| Volllast (13 kWth) ohne Isolation der WKK-Anlage | 175 | 42.2 | 80.6 | 19.4 | 82.2 | 16.0 | 0.24 |
| Volllast (13 kWth) mit Isolation der WKK- Anlage | 206 | 46.1 | 81.7 | 18.3 | 84.0 | 15.4 | 0.22 |

Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage erreichte mit 79.4%-84% nicht die in den technischen Spezifikationen ausgewiesenen Werte (>85%). Auch der elektrische Wirkungsgrad liegt im Teillastbetrieb mit 19.8% knapp und im Volllastbetrieb mit 15.4%-16% deutlich unter den werkseitigen Angaben (ca. 20%). Die Stromkennzahl berechnet sich aus dem Quotienten von elektrischer und thermischer Energie.

Hilfsenergie

Die Sunmaschine benötigt in der Start- und Betriebsphase elektrische Hilfsenergie. Die Leistungsaufnahme im Dauerbetrieb für Abgasventilator, Pumpen und Steuerung liegt im Teillastbetrieb bei ca. 200 Watt und im Volllastbetrieb bei ca. 425 Watt.

Das Aufheizen des Brenners vor dem Start des Feuers benötigt während 40-45 Minuten eine elektrische Leistung von ca. 2500 Watt, was einer elektrischen Energie von ca. 1.9 kWh entspricht. Vor allem im taktenden Betrieb ergibt sich so ein Hilfsenergiebedarf, der nicht vernachlässigt werden darf. Der taktende Betrieb konnte nicht erprobt werden.

Emissionen

Die Emissionen der Sunmaschine wurden in drei verschiedenen Betriebsphasen (Kaltstart, Warmstart, Dauerbetrieb) gemessen. Der Kaltstart wurde in der Startphase der Feuerung nach automatischer, elektrischer Vorwärmung aus dem kalten Anlagezustand gemessen. Der Warmstart wurde in der Startphase der Feuerung nach 1 h Betriebspause gemessen. Der Brenner ist nach dieser Pause immer noch warm. Die Emissionen im Dauerbetrieb wurden 6 Stunden nach dem Start der Feuerung gemessen.

Die Messungen ergaben folgende Emissionswerte für Staub (Particulate Matter Emissions, PME), Kohlenmonoxid (CO) und Stickstoffoxid (NOx).

Tabelle 11 Ergebnisse der Emissionsmessungen in verschiedenen Betriebsphasen.

| Betriebsphase | Staub PME/Vol [mg/m ³ @13%O ₂] | Kohlenmonoxid CO [mg/m ³ @13%O ₂] | Stickstoffoxid NOx [mg/m ³ @13%O ₂] |
|--|---|--|--|
| Kaltstart | 86 | 2232 | 165 |
| Warmstart | 110 | 1111 | 174 |
| Dauerbetrieb (Vorgaben der Fa. Sunma- chine in Klammern) | 85 (19) | 433 (74) | 180 (154) |

Im Dauerbetrieb überschreiten alle Emissionswerte die Angaben der von der Firma Sunmaschine intern durchgeführten Messungen. Die von der Schweizer Luftreinhalte-Verordnung (LRV) geforderten Grenzwerte für Staub (60 mg/m³@13%O₂) und Kohlenmonoxid (300 mg/m³@13%O₂) konnten nicht eingehalten werden.

Die Produktion von Strom und Wärme aus biogenem Brennstoff im kleinen Leistungsbereich ist ein ambitioniertes aber absolut notwendiges Ziel. Die Firma Sunmachine hat dieses lobenswerte Ziel verfolgt. Leider ist die aktuell auf dem Markt erhältliche Anlage der Firma Sunmachine noch nicht geeignet für den Einsatz in der Praxis. Abgesehen von den Leistungsangaben konnten die von der Firma Sunmachine genannten Eigenschaften nicht bestätigt werden. Auch die Emissionswerte müssen weiter verbessert werden. Die hohe Störanfälligkeit und die daraus folgende Wartungsintensität erlauben aktuell keinen wirtschaftlichen Betrieb.

Da sich die Firma Sunmachine in Insolvenz befindet, ist abzuwarten, wie die Verhandlungen mit potenziellen Investoren weiter verlaufen. Für den Fall einer Weiterführung der Geschäfte von Sunmachine wird empfohlen, eine Anlage der nächsten Serie eingehend zu prüfen.

9.3.2 Leistungsdaten eines Pellet-befeuerten Dampfmotors

Die Firma Button Energy GmbH bietet eine Pellets-befeuerte Mikro-WKK-Anlage an. Derzeit sind 30 Anlagen im Feldtest in Österreich in Betrieb. Es wurden mit einigen Anlagen bereits ca. 10'000 Betriebsstunden erreicht.

Das Herzstück der WKK-Anlage ist ein oszillierend arbeitender 2-Zylinder-2-Takt Dampfmotor. Der Strom wird über den mit dem Lineardampfkolben gekoppelten Lineargenerator erzeugt. Der Dampf wird in einem Rohrverdampfer bis auf 30 bar und einer Temperatur von ca. 350°C erhitzt. Der Dampf gelangt abwechselnd in den rechten bzw. linken Arbeitszylinder. Nach der Expansion des Dampfes im Motor wird die Restwärme dem Heizungskreislauf zugeführt.

Tabelle 12 Technische Daten Mikro-WKK-Dampfanlage Bison.

| Bezeichnung | Bison Powerblock |
|-----------------------------|--|
| Hersteller | Button Energy Energiesysteme GmbH 2281 Raasdorf www.buttonenergy.at |
| Dampfmotor | 2-Zylinder-2-Takt-Freikolbenmaschine |
| Arbeitsfrequenz | 40 - 75 Hz |
| Leistungsbereich elektrisch | 0.3 - 2.0 kW |
| Leistungsbereich thermisch | 3 - 16.0 kW |
| Wirkungsgrad gesamt | bis 94% |
| Wirkungsgrad elektrisch | ca. 10% |
| Elektrische Ausrüstung | |
| Wechselrichter | 230 V, 50 Hz |
| Gewicht | ca. 195 kg |

Die WKK-Anlage lässt sich modulierend betreiben. Dabei wird der elektrische Wirkungsgrad nicht gemindert. Die Anlage lässt sich im Notbetrieb ohne Dampfmotor zur Erzeugung von Heizwärme betreiben.



Abbildung 7 Pellet-befeuerte Mikro-WKK-Dampfanlage

Der Pelletbrenner zeichnet sich durch eine kompakte Bauweise aus. Die 2-stufige Verbrennung wird im Gegenstrom geführt: Die Schwelgase der Primärstufe durchströmen vom Glutbett her das Brennstoffbett. Die Pellets fallen durch einen Schacht auf das Brennstoffbett. Die Zündung der Flamme erfolgt im Sekundärraum, wo sie dann dem Rohrverdampfer zugeführt werden.



Abbildung 8 Pelletbrenner der Mikro-WKK-Dampfanlage

9.4 In der Simulation verwendete Betriebsdaten

In Tabelle 13 sind die in der Systemmodellierung verwendeten Daten zusammengestellt.

Tabelle 13 Betriebsdaten der in den Simulationen verwendeten Systemkomponenten

| Komponente | Leistung therm. | elektr. | min. Leistung therm. | Wirkungs- grad therm. | elektr. | Min. Laufzeit | Last- wechsel | VL Temp. max. | RL Temp. min. |
|--|--------------------|---------|----------------------------|---|---|------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| | kW | kW | kW | % | % | | | °C | °C |
| Gasheizung | 35 | 0 | 6 | 96% | - | keine | 30 Sek. | 80 | 20 |
| Wärmepumpe | 35 | 0 | 17.5 | 330% | - | keine | 30 Sek. | 50 | 15 |
| Gas- WKK-Anlage Senertec | 29.2 | 10 | 29.2 | 66% | 27% | keine | keiner | 83 | 60/20 |
| Pellets Stirlingmotor Sunmachine | 13 | 3.12 | 4.5 | Vollast: 68.6% Teillast: 59.6% | Vollast: 15.4% Teillast: 18.6% | 2 h | 10 Min. | 75 | 60/30 |
| Gas- Mikroturbine Capstone | 36 | 15 | 10 | 74% | 24% | keine | 30 Sek. | 80 | 60/20 |

10 Simulationsergebnisse

10.1 Bewertungskriterien

Zur Bewertung der Anlagesysteme wurden die Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 14 von Frischknecht und Tuchschnid verwendet.

Tabelle 14 Umweltgewichtungsfaktoren wie sie für die Anlagesimulationen verwendet wurden [Frischknecht R., Tuchschnid M., 2008].

| Energieträger/ Produktionsanlage | Primärenergie- faktoren [MJ-eq] | | CO ₂ -Äquivalente [kg CO ₂ -eq] | | Umweltbelastungspunkte [UBP 06] | |
|--|---------------------------------------|---------|--|---------|------------------------------------|---------|
| | Fahrzeug | Gebäude | Fahrzeug | Gebäude | Fahrzeug | Gebäude |
| Benzin | 1.29 | – | 0.317 | – | 286.2 | – |
| Diesel/ Heizöl | 1.22 | 1.24 | 0.302 | 0.295 | 195.5 | 159.8 |
| Erdgas | 1.17 | 1.15 | 0.234 | 0.241 | 145.8 | 121.3 |
| Biogas | 0.45 | 0.48 | 0.115 | 0.137 | 115.9 | 97.9 |
| Elektrizität: (CH- Verbrauchermix) | – | 2.97 | – | 0.155 | – | 443.5 |
| Holzpellet | – | 1.22 | – | 0.036 | – | 100.08 |
| Elektrizität: europäi- scher Erzeugermix (ENTSO) | – | 3.5 | – | 0.594 | – | 656.92 |
| Gas-/Dampf-Kraftwerk (GUD) | – | 2.34 | – | 0.486 | – | 268.92 |
| Ökostrom* | – | 1.05 | – | 0.043 | – | 220.10 |
| Wasserkraft | – | 1.22 | – | 0.003 | – | 61.3 |
| Photovoltaik | – | 1.66 | – | 0.025 | – | 53.2 |
| WKK-Anlage Biogas | – | 0.2 | – | 0.052 | – | 61.3 |

* Der Primärenergiefaktor für den Ökostrom basiert auf einem angenommenen Mix der Elektrizität generiert aus Wasserkraft (80%), Biogas-befeuerte WKK-Anlagen (18%) und Photovoltaik (2%).

10.2 Energiebedarf der verschiedenen Gebäudestandards

Abbildung 9 zeigt den Nutzenergiebedarf für die drei Gebäudestandard-Varianten der Wohneinheit. Es ist deutlich ersichtlich, dass der spezifische Nutzenergiebedarf für Beleuchtung, Warmwasser und Geräte bei allen drei Gebäudestandards annähernd gleich ist. Nur der Bedarf für Raumheizung zeigt grosse Unterschiede. So weist die Wohneinheit mit einem 'Minergie-P'-Gebäudestandard einen um den Faktor 6 geringeren Nutzenergiebedarf für die Raumheizung auf als die Wohneinheit mit einem Gebäudestandard 'Bestand 1980'.

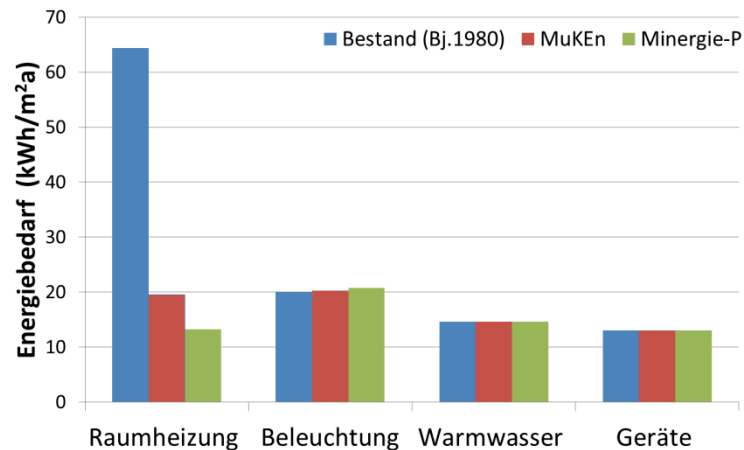


Abbildung 9 Elektrischer und thermischer Nutzenergiebedarf der Wohneinheit differenziert nach den drei Gebäudestandard-Varianten 'Bestand 1980', 'MuKEn' und 'Minergie-P'.

Der Vergleich des Primärenergiebedarfs für Raumheizung und Warmwasser der Referenzszenarien 'Konservativ' und 'Progressiv' ist für die drei Gebäudestandards in Abbildung 10 dargestellt. Die Kombination des 'Minergie-P'-Standards mit einem Gaskessel (Referenzszenario 'Konservativ') wurde nicht gerechnet. Beim Referenzszenario 'Progressiv' ist der Beitrag der Photovoltaik-Anlage nicht berücksichtigt.

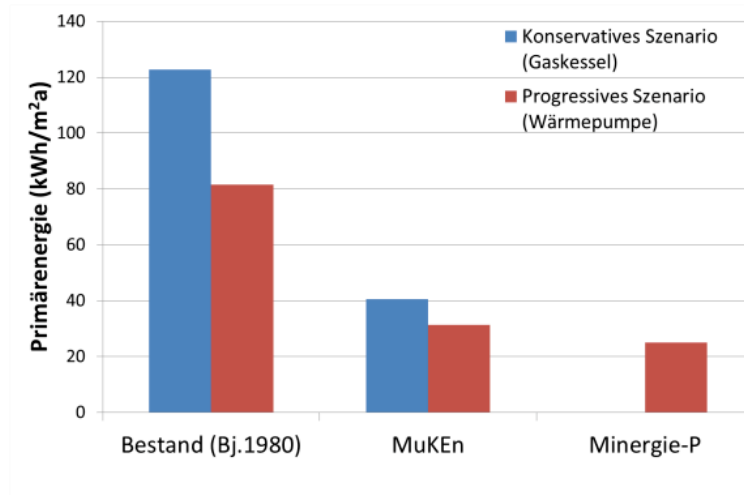


Abbildung 10 Vergleich des Primärenergiebedarfs für Heizung und Warmwasser der Wohneinheiten basierend auf den Referenzszenarien 'Progressiv' und 'Konservativ'. Die Primärenergiefaktoren für Strom und Erdgas richten sich nach den Vorgaben von [Frischknecht R., Tuchschnid M., 2008].

Der Vergleich zeigt, dass der Primärenergieeinsatz für eine nach dem aktuellen gesetzlichen Mindeststandard MuKEn 2008 gebaute Wohneinheit um 67% geringer ist, als derjenige eines Baus 'Bestand 1980'. Die alleinige Umrüstung von Gaskessel auf Wärmepumpe mit Erdwärmesonde im 'Bestand 1980'-Standard erzielt eine Einsparung von 33%. Der Wechsel

im Referenzszenario 'Progressiv' vom Gebäudestandard 'MuKE' zu 'Minergie-P' spart bei identischer Anlagentechnik 20% Primärenergie ein.

10.3 Primärenergiebedarf der verschiedenen Gebäudestandards und Anlagesysteme

In diesem Abschnitt wird der Primärenergieverbrauch der Wohneinheiten mit polyvalenten Energiesystemen mit den Referenzsystemen 'Konservativ' und 'Progressiv' verglichen. Der Verbrauch schliesst den Strom für Haushaltsgeräte und Licht aus. Basis des Vergleichs ist der Primärenergieeinsatz und die mit Brennstoff gewonnene, primärenergiegewichtete elektrische Energie. Für den Strom-Primärenergiefaktor wurde der Schweizer Verbrauchermix in Tabelle 14 verwendet. In den Gebäudesimulationen werden die modellierten WKK-Anlagen wärmegeführt betrieben. Die von der WKK-Anlage erzeugte elektrische Energie hängt dadurch vom Gebäudewärmebedarf ab.

Die Auswertungen sind in Abbildung 11 bis Abbildung 13 dargestellt. Um eine Aussage zur Primärenergiebilanz einschliesslich des häuslichen Elektrizitätsbedarfs machen zu können, ist ein primärenergiegewichteter häuslicher Elektrizitätsbedarf in den Abbildungen dargestellt. Der dafür angenommene Endenergieverbrauch beträgt 5'000 kWh/a.

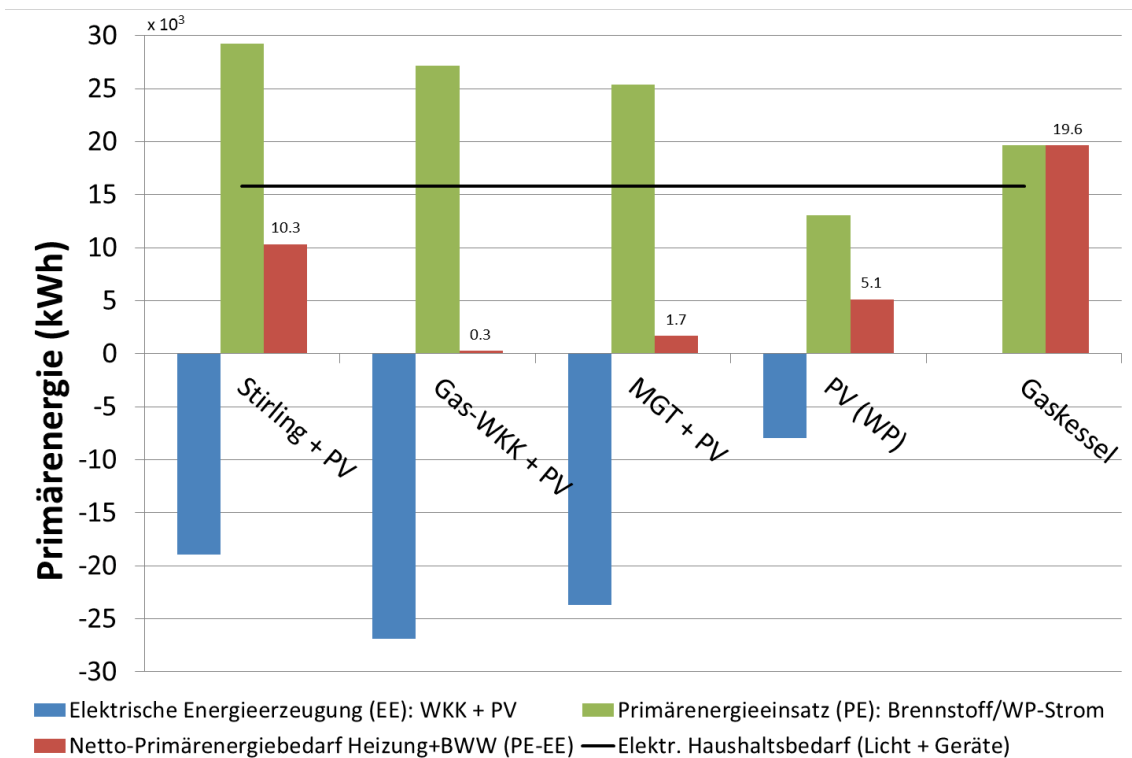


Abbildung 11 Wohneinheit 'Bestand 1980' – Primärenergiebedarf und primärenergiegewichtete elektrische Energieerzeugung des Anlagesystems 'Polyvalente Energiesysteme' mit den Anlagevarianten Stirling-WKK/PV, Gas-WKK/PV und MGT-WKK/PV im Vergleich zu den Referenzsystemen 'Progressiv' (PV/Wärmepumpe) und 'Konservativ' (Gaskessel).

Abbildung 11 zeigt, dass die erdgasbefeuerte WKK-Anlage den geringsten Netto-Primärenergiebedarf erzielt und eine praktisch ausgeglichene Primärenergiebilanz ermöglicht, wenn der Haushaltstromverbrauch nicht berücksichtigt wird. Der höchste Netto-Primär-

energiebedarf unter den Anlagen 'Polyvalente Energiesysteme' weist die WKK-Anlage mit Stirlingmotor auf. Die Differenz zur Gas-WKK-Anlage beträgt ca. 10'000 kWh. Ausschlaggebend für den Netto-Primärenergiebedarf ist das Verhältnis von thermischem zu elektrischem Wirkungsgrad. Das Referenzszenario 'Progressiv' mit Wärmepumpe und PV-Anlage liegt zwischen den Anlagensystemen Stirlingmotor-WKK und Gasmotor-WKK bzw. Mikroturbinen-WKK. Das Referenzszenario 'Konservativ' mit Gaskessel hat den höchsten Netto-Primärenergiebedarf, da der gesamte Strom vom Netz bezogen wird.

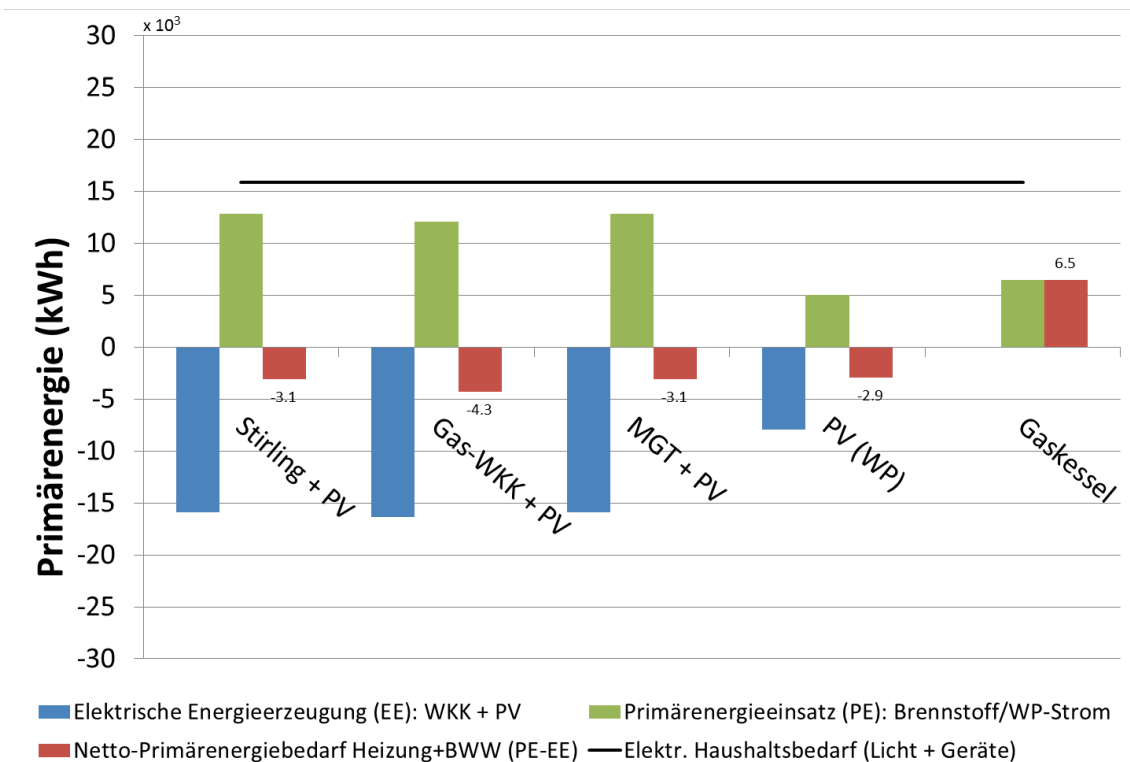


Abbildung 12 Wohneinheit 'MuKen' – Primärenergiebedarf und primärenergiegewichtete elektrische Energieerzeugung des Anlagensystems 'Polyvalente Energiesysteme' mit den Anlagevarianten Stirling-WKK/PV, Gas-WKK/PV und MGT-WKK/PV im Vergleich zu den Referenzsystemen 'Progressiv' (PV/Wärmepumpe) und 'Konservativ' (Gaskessel).

Im Vergleich zur Wohneinheit 'Bestand 1980' zeichnet sich der MuKen-Standard in Abbildung 12 für alle Varianten ausser für den Gaskessel durch eine positive jährliche Primärenergiebilanz aller Anlagensysteme aus. Der höchste Netto-Primärenergiegewinn wird durch die gasbefeuerte WKK-Anlage und der niedrigste durch die Wärmepumpe mit Photovoltaik erzielt. Die Differenz beträgt jedoch weniger als 1'500 kWh.

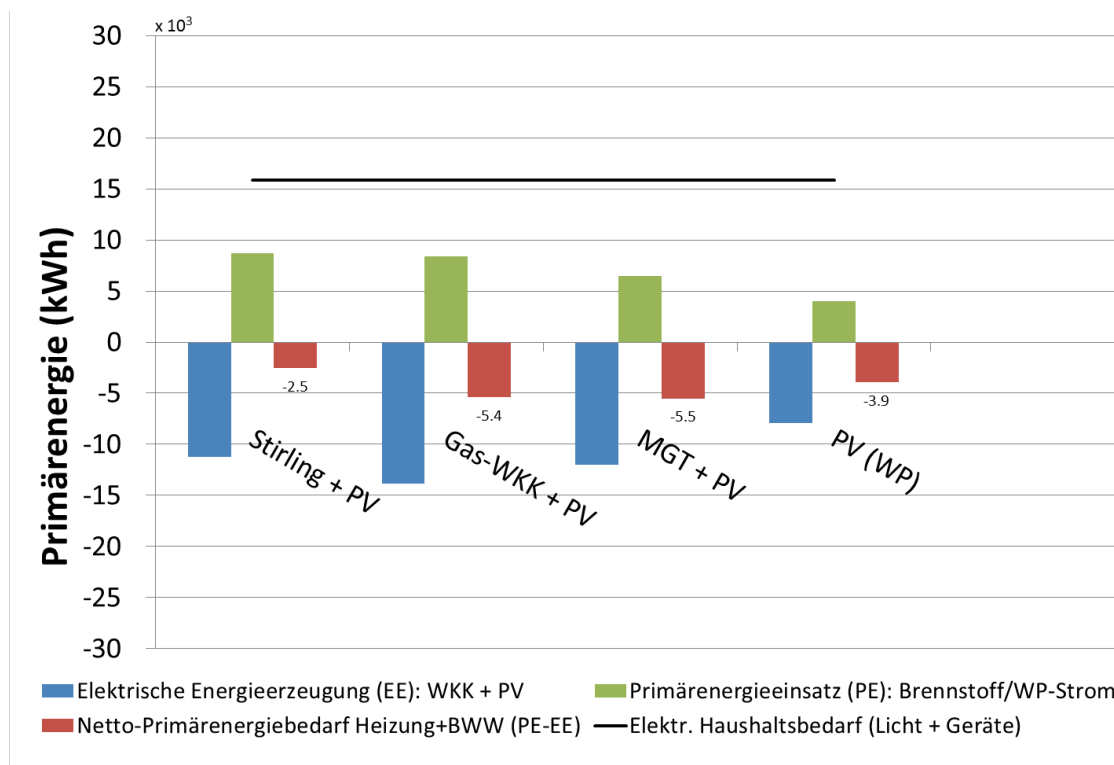


Abbildung 13 Wohneinheit 'Minergie-P' – Primärenergiebedarf und primärenergiegewichtete elektrische Energieerzeugung des Anlagensystems 'Polyvalente Energiesysteme' mit den Anlagevarianten Stirling-WKK/PV, Gas-WKK/PV und MGT-WKK/PV im Vergleich zu dem Referenzsystem 'Progressiv' (PV/Wärmepumpe).

Das Bild verschiebt sich leicht für die Ergebnisse bei der Wohneinheit 'Minergie-P' (Abbildung 13). Die Netto-Primärenergiegewinne unterscheiden sich im Durchschnitt nur sehr geringfügig von der Variante 'MuKen', was auf den geringeren Wärmebedarf mit entsprechend geringerer Stromproduktion der WKK-Anlagen zurückzuführen ist.

Der Primärenergieverbrauch einer Wohneinheit 'Minergie-P' reduziert sich im Durchschnitt um 70% gegenüber der Wohneinheit 'Bestand 1980'. Bedingt durch den geringen Wärmebedarf der Wohneinheit 'Minergie-P' geht die Elektrizitätserzeugung durchschnittlich um knapp 50% zurück.

10.4 Saisonaler Verlauf der Stromerzeugung

Für die Energieversorgung ist neben der Jahresenergiebilanz auch der Verlauf des Erzeugungsprofils der dezentralen Stromproduktionsanlagen über das Jahr von zentraler Bedeutung. In Ergänzung zu der jährlichen Bilanzierung der vorhergehenden Kapitel wird in diesem Kapitel das saisonale Stromerzeugungsprofil der verschiedenen Anlagensysteme untersucht. Abbildung 14 bis Abbildung 16 zeigen die monatliche Stromproduktion der verschiedenen PV- und WKK-Anlagen.

PV- und WKK-Anlagen ergänzen sich über den Jahresverlauf ideal. Der PV-Anlagen Stromertrag ist bei allen Gebäudestandards identisch. Da die WKK-Anlagen wärmegeführt sind, verringert sich die WKK-Stromdeckung mit energieeffizienterem Gebäudestandard und damit verbundenem tieferem Wärmebedarf.

In den Abbildungen ist auch die Verbrauchskurve des Haushaltstroms dargestellt. Sein variierender Verlauf ist durch die folgenden Faktoren bedingt:

- Der Strombedarf ist für die Beleuchtung im Winter durch das geringere Tageslichtangebot höher.
- Die in den Berechnungen verwendete Stromgeräte-Standardnutzung gemäss SIA Merkblatt 2024 [SIA, 2010] berücksichtigt die Ferienabwesenheiten.

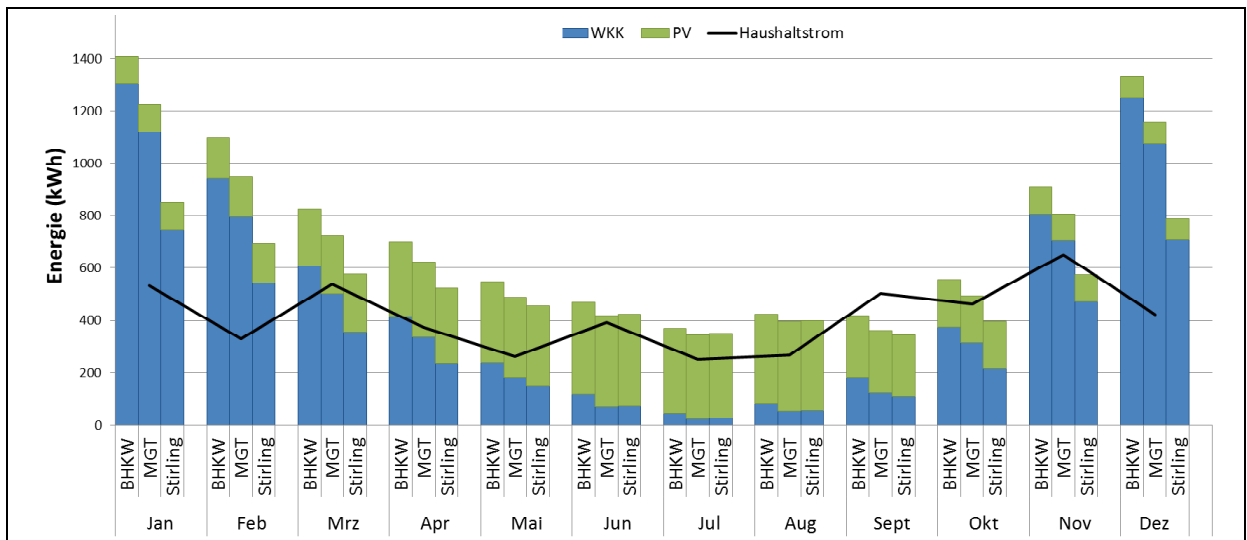


Abbildung 14 Wohneinheit 'Bestand 1980' – Monatsprofil des Strombedarfs und der Stromerzeugung verschiedener Anlagevarianten des Szenarios 'Polyvalente Energiesysteme'.

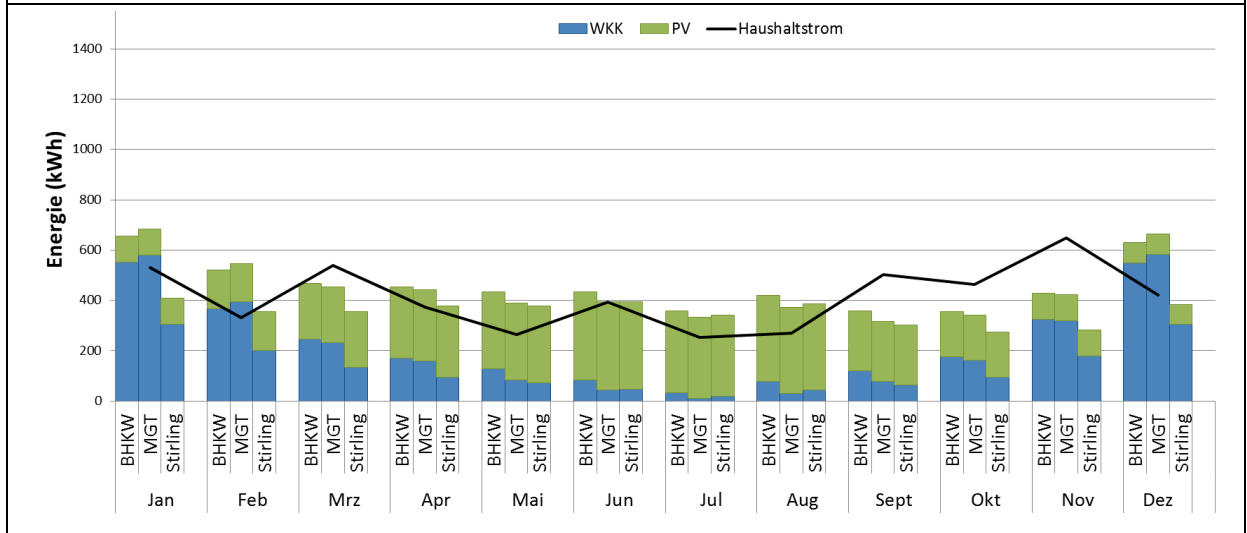


Abbildung 15 Wohneinheit 'MuKen' – Monatsprofil des Strombedarfs und der Stromerzeugung verschiedener Anlagevarianten des Szenarios 'Polyvalente Energiesysteme'.

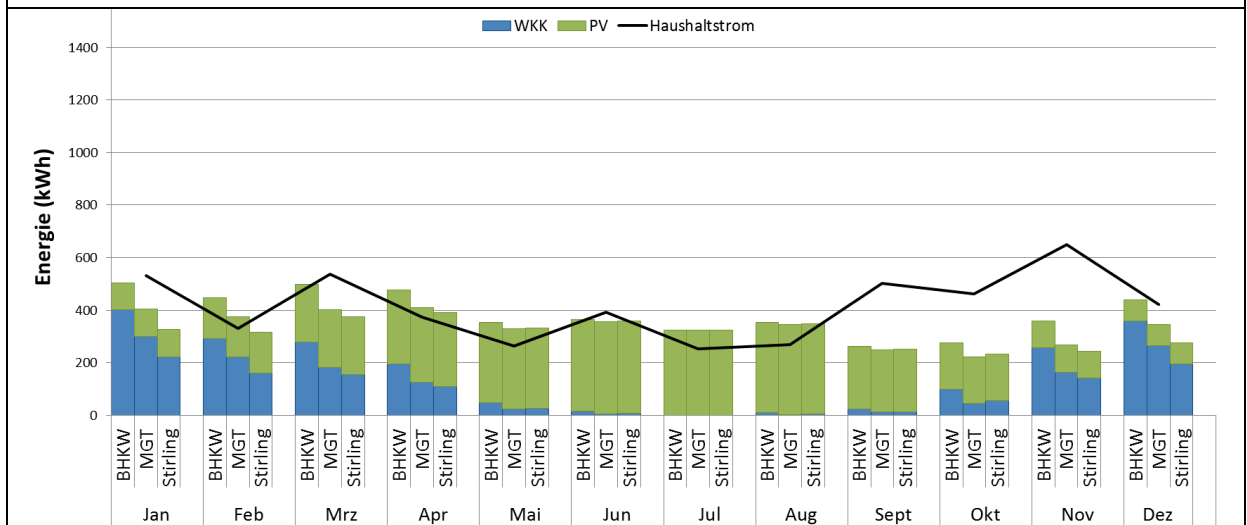


Abbildung 16 Wohneinheit Minergie-P – Monatsprofil des Strombedarfs und der Stromerzeugung verschiedener Anlagevarianten des Szenarios 'Polyvalente Energiesysteme'.

Der hohe Wärmebedarf führt bei der Wohneinheit 'Bestand 1980' (Abbildung 14) zu einer Stromnettoproduktion (PV+WKK) über das Jahr. Dabei ist die Stromproduktion im Winter (Oktober-März) im Schnitt gut um den Faktor 2 höher als im Sommer.

Bei der 'MuKE'n'-Wohneinheit kann der Haushalt-Strombedarf über das ganze Jahr bilanziert gerade gedeckt werden (Abbildung 12). Die monatliche Auflösung der Energieproduktion zeigt jedoch ein Strommanko in der Zeit von September bis November (Abbildung 15). Die verminderte PV-Stromproduktion kann in dieser Periode noch nicht von der wärmegeführten WKK-Anlage aufgefangen werden. Das Strommanko wird in den Monaten Dezember bis Februar von der WKK-Anlage und in den Sommermonaten von der PV-Anlage kompensiert.

Dieser Effekt verstärkt sich beim Gebäudestandard 'Minergie-P' (Abbildung 16). Die Gesamtstromproduktion reicht hier, bedingt durch den geringen Heizwärmebedarf und damit kürzeren WKK-Betriebszeiten (Tabelle 15), im Winter nicht für die Deckung des Haushaltstrombedarfs aus. Das Manko in den Herbstmonaten ist ausgeprägt und erreicht ca. 50%.

Gesamthaft verringert sich die Stromproduktion gemittelt für die WKK-Anlagen von der Wohneinheit 'Bestand 1980' (14'580 kWh) auf 'MuKE'n' (5'030 kWh) um 65% und von 'MuKE'n' auf 'Minergie-P' (4'150 kWh) um weitere 18%.

Tabelle 15 Betriebsstunden der Wärmeerzeuger in den Wohneinheiten 'Bestand 1980', 'MuKE'n' und 'Minergie-P'.

| Anlagesysteme | Szenario | Nutzenergie [kWh] | Geräteleistung [kW/WE] | Betriebsstunden [h] |
|---|--------------|----------------------|---------------------------|------------------------|
| Szenario 'Progressiv' | Minergie-P | 5'101 | 6 | 850 |
| | MuKE'n | 6'416 | 8 | 802 |
| | Bestand 1980 | 15'249 | 14 | 1'089 |
| Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' Gas-WKK-Anlage | Minergie-P | 7'300 | 19 | 384 |
| | MuKE'n | 10'484 | 19 | 552 |
| | Bestand 1980 | 23'593 | 25 | 944 |
| Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' MGT-WKK-Anlage | Minergie-P | 5'600 | 6.1 | 918 |
| | MuKE'n | 11'173 | 12.2 | 916 |
| | Bestand 1980 | 22'073 | 20.3 | 1'086 |
| Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' Stirling-WKK-Anlage | Minergie-P | 7'113 | 19 | 374 |
| | MuKE'n | 10'132 | 19 | 533 |
| | Bestand 1980 | 23'943 | 19 | 1'260 |

10.5 Elektrische Eigenbedarfsdeckung

Ein Aspekt, der bei einer hohen Anzahl dezentraler Stromerzeugungsanlagen beachtet werden muss, ist die Netzbelastung. Die Netzbetreiber interessiert, ob mit dezentralen Eigenerzeugungsanlagen die Lastspitzen im Verteilnetz erhöht oder geglättet werden. Die Berechnung der Eigenbedarfsdeckung basiert auf nach Stunden aufgelöster Bilanzierung von Stromerzeugung und -bedarf. Im Idealfall liegt die Eigenbedarfsdeckung bei 100%. Abbildung 17 zeigt, dass die Deckung des eigenen Stromverbrauchs, bedingt durch die Verschiebung von Bedarf und Ertrag, im Mittel jedoch nur bei 34% liegt. Der Wert ist mit der von Karten Voss in [Voss K., Musall E., 2011] publizierten Eigenbedarfsdeckung von 30% vergleichbar.

Der Anteil ins Netz gespiesener Elektrizität liegt mit 67% in der Höhe des Anteils bezogenen Stroms (66%).

Die Eigenbedarfsdeckung steigt mit besserem Gebäudestandard zwischen 'Bestand 1980' und 'Minergie-P' im Mittel um 16%. Wobei die grösste Zunahme von 10% zwischen der

Wohneinheit 'Bestand 1980' und 'MuKEn' ausgemacht werden kann. Die höchste Eigenbedarfsdeckung wird mit 44% bei der mit MGT-WKK-Anlage versorgten Wohneinheit 'Minergie-P' erreicht. Die geringste Eigenbedarfsdeckung von 21% erzielt die mit Gas-WKK-Anlage versorgte Wohneinheit 'Bestand 1980'.

Der Anteil bezogener Energie steigt von der Wohneinheit 'Bestand 1980' zur Wohneinheit 'MuKEn' im Mittel um 9%. Die eingespiesene elektrische Energie sinkt mit besserem Energiestandard bedingt durch den sinkenden Wärmebedarf.

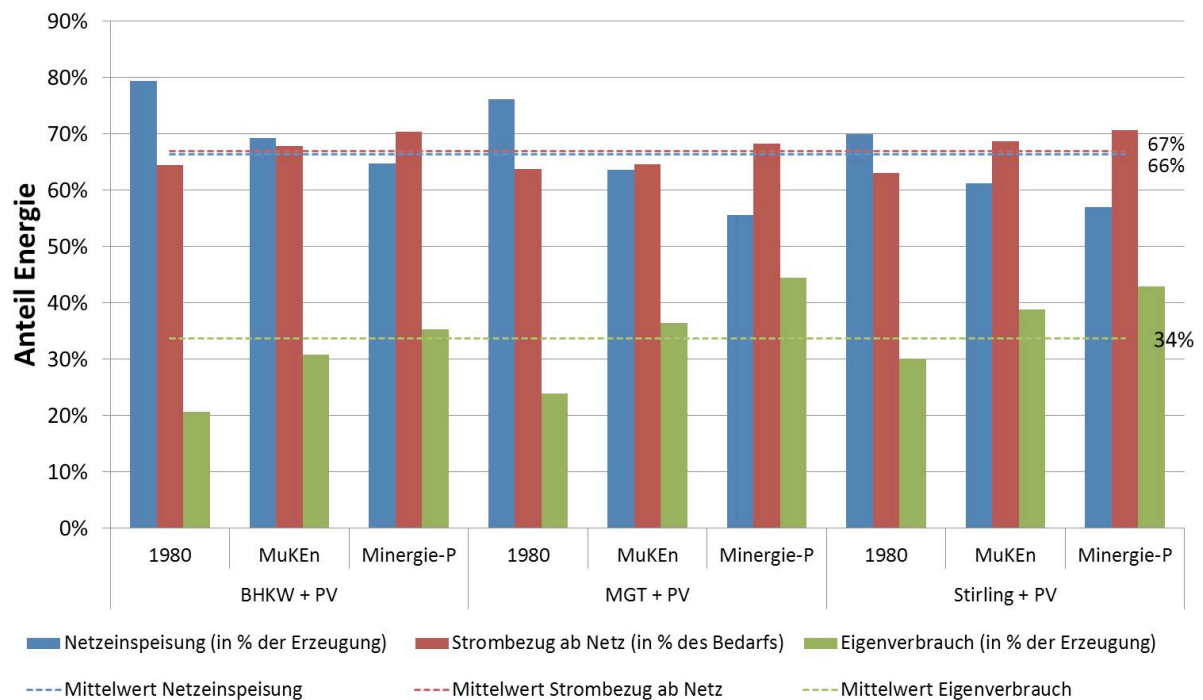


Abbildung 17 Bezug und Lieferung von Strom der verschiedenen Wohneinheiten bei verschiedenen Anlagevarianten des Szenarios 'Polyvalente Energiesysteme' – Verhältnis von eingespielter, bezogener und lokal gebrauchter elektrischer Energie.

Eine zunehmende Anzahl von Gebäuden mit Eigenerzeugungsanlagen führt bei niedrigem Eigenstrombedarf zu einer erhöhten Einspeisung ins Netz. Kommt es zu unausgebalancierten Produktions- und Bezugsprofilen, muss der Energieversorger den Ausgleich mittels redundanter Kraftwerke bewerkstelligen. Um den redundanten Kraftwerkpark minimal zu halten, ist bei dezentralen Energieanlagen anzustreben, die eingespieltere Energiemenge zu minimieren und den Eigenverbrauch zu maximieren.

10.6 Polyvalente Energiesysteme und Mobilität

In den folgenden Abschnitten wird neben der Auswirkung der Elektromobilität auf Primärenergiebedarf, CO₂-Emissionen und Umweltbelastungspunkte ihr Potenzial zur Optimierung der Eigenbedarfsdeckung untersucht.

10.6.1 Spezifische Fahrleistungen

Zur Ermittlung des Energiebedarfs für die Mobilität wurde eine jährliche Fahrleistung von 18'000 km pro Wohneinheit zugrunde gelegt. Diese Annahme basiert auf den in Tabelle 16 dargestellten Daten. Der spezifische Bedarf für ein Verbrennungsmotorfahrzeug wurde auf

70 kWh/100 km festgelegt. Der Bedarf für ein Elektroauto wurde mit 23 kWh/100 km [Meier-Eisenmann E. et al., 2001] angenommen.

Tabelle 16 Grundlagen zur Bestimmung der spezifischen Fahrleistung je Wohneinheit (WE).

| Parameter | Einheiten | Werte |
|-------------------|-------------|--------|
| Auto Fahrleistung | km/(d*p) | 25.5 |
| Anzahl Personen | p/WE | 3 |
| Autobelegung | p/Auto | 1.57 |
| Fahrleistung WE | km/(Auto*a) | 17'785 |

10.6.2 Herleitung von Fahrzeug-Ladeprofilen

Ausgehend von den Mikrozensus-Daten [Bundesamt für Statistik, 2005] wurde für das Elektroauto ein Wochenprofil für die Ladung des Fahrzeugs abgeleitet. Der Mikrozensus unterscheidet zwischen den Wegzwecken Arbeit, Ausbildung und Schule, Einkauf und Besorgungen, geschäftliche Tätigkeiten, Dienstfahrten, Freizeit, Service und Begleitwege, Rückkehr nach Hause und anderen (Abbildung 18).

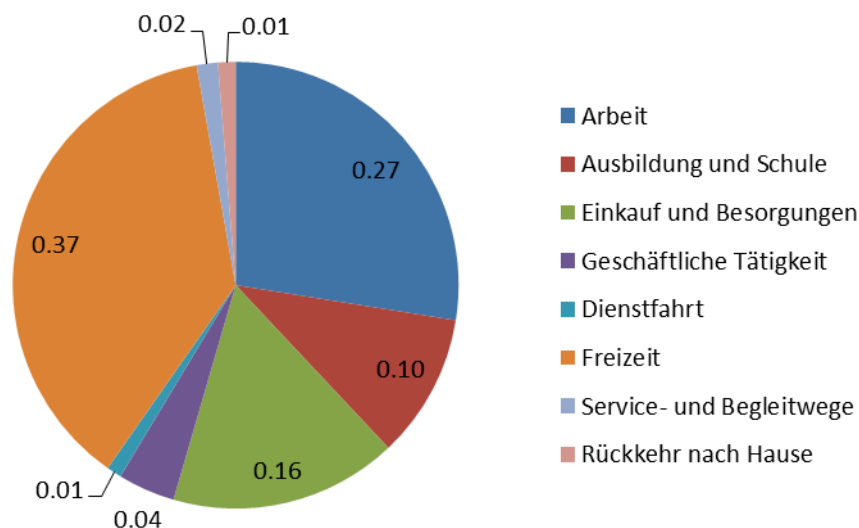


Abbildung 18 Durchschnittliches Schweizer Tagesprofil aufgegliedert nach den verschiedenen Wegzwecken eines Fahrzeuges [Bundesamt für Statistik, 2005].

Die Schwierigkeit besteht darin, dass es sich bei Mikrozensus um statistisch erhobene Daten handelt. Diese sind über das Verhalten einer grossen Anzahl Benutzer gemittelt. Die Daten lassen sich nicht direkt auf eine konkrete Situation übersetzen. Sie müssen so aufgearbeitet werden, dass ein Verteilschlüssel der Fahrzeiten und der Standzeiten abgeleitet werden kann, die für die Batterieladung wichtig sind. Dazu bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten an:

- Stochastische Auswertung: dabei gehen typische Verhaltensmuster wie z.B. das Pendeln verloren.
- Modifikation der Profile so, dass sowohl die statistische Verteilung als auch Verhaltensmuster erkennbar bleiben um den realen Fahrzeugbetrieb abzubilden.

Die Variante a) hätte bezüglich Aufwands die Möglichkeiten des Projekts gesprengt, es wurde daher nach der Methode b) gearbeitet.

Tabelle 17 Annahmen für die Ermittlung des Energieverbrauchs des Elektroautos

| Fahrleistung | Anzahl Personen | Autobeleugung | Fahrleistung Haushalt | Verbrauch | | |
|--------------|-----------------|---------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
| | | | | spez. Verbrauch: 23 kWh/100 km | | |
| km/(d*p) | p/Haushalt | p/Fahrzeug | km/(Fz*a) | kWh/(a*Haushalt) | kWh/(W*Haushalt) | kWh/(d*Haushalt) |
| 25.5 | 3 | 1.57 | 17'785 | 4'090 | 78.4 | 11.2 |

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die wochentagsabhängigen Tagesprofile aus den statistischen Daten. Bezüglich des in Abbildung 19 und Abbildung 20 ausgewiesenen Fahrzeugeinsatzes wurden die Annahmen gemäss Tabelle 17 getroffen:

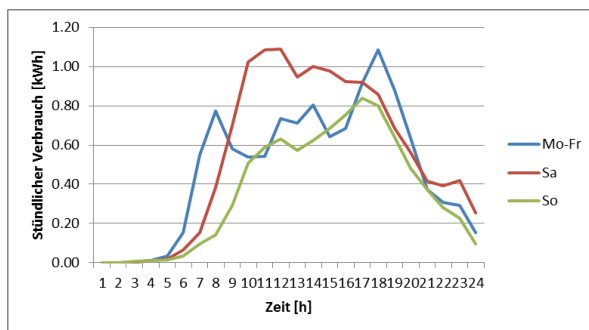


Abbildung 19 Statistische Tagesprofile des Fahrzeugeinsatzes über alle Wegzwecke

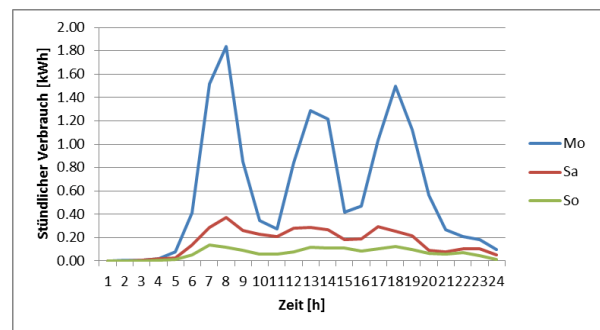


Abbildung 20 Statistische Tagesprofile des Fahrzeugeinsatzes für den Wegzweck Arbeit

In den Profilen der Abbildung 19 sind die für bestimmte Wegzwecke typischen Einsatzmuster nur schwach zu erkennen. Wird, wie in Abbildung 20 dargestellt, auf den einzelnen Wegzweck Bezug genommen, sind diese viel deutlicher erkennbar, aber nach wie vor statistisch so undeutlich, dass die auf das einzelne Fahrzeug bzw. die Wohneinheit bezogen benötigten Eigenschaften wie die zu erwartenden Standzeiten für das Laden nicht oder kaum auftreten. Selbst ein Fahrzeug, das nach dem Profil gemäss Abbildung 20 ausschliesslich für den Wegzweck Arbeit eingesetzt wird, kann nie oder nur während weniger Nachtstunden für die Batterieladung ans Netz angeschlossen werden.

Um ein für die Berücksichtigung in der Simulation verwendbares Profil zu erhalten, wurden die statistischen Daten wie folgt modifiziert:

- Aufteilung der Fahrleistung bzw. des stündlichen Verbrauchs gemäss Abbildung 19 auf zwei Fahrzeuge, wobei das eine für den Wegzweck 'Arbeit', das andere für die übrigen Wegzwecke eingesetzt wird.
- Vergrößerung der Profile durch Runden der Werte auf 1/30 der Tagessumme (Wert durch Versuche ermittelt).

Die so erhaltenen Verbrauchsprofile sind in Abbildung 21 dargestellt.

Unter der Annahme, dass die Fahrzeuge zu Beginn jeder Standzeit mit dem Netz verbunden werden und damit die in der davor liegenden Fahrphase verbrauchte Energie wieder geladen wird, führt zu den in Abbildung 22 dargestellten Fahrzeugladeprofilen. Dabei wurde von einer Ladung an einer normalen, mit 16 A abgesicherten Haushaltsteckdose mit einer Ladeleistung von 3.68 kW ausgegangen. Schnellladestationen haben kürzere Ladezeiten, führen

aber zu höheren Netzbelastungen. Eine 10 A-Steckdose genügt dem Anspruch nicht, die Batterieladung in zumutbarer Zeit zu laden.

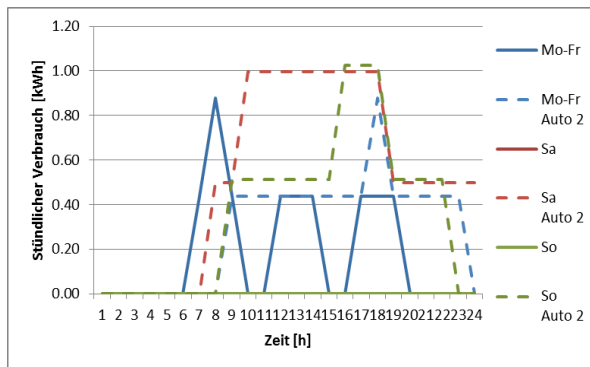


Abbildung 21 Für die Simulation modifizierte Profile des Fahrzeugeinsatzes.

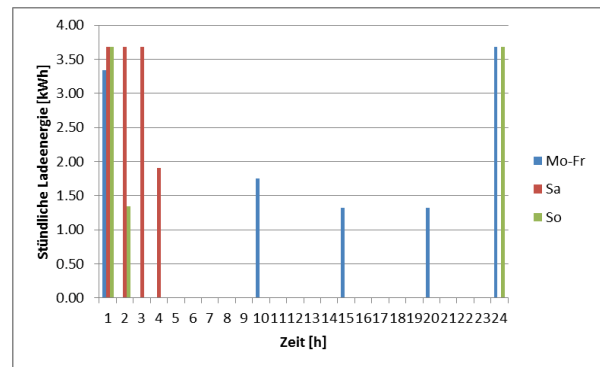


Abbildung 22 Aus den modifizierten Mustern des Fahrzeugeinsatzes abgeleitete Ladeprofile.

Bei den Ladeprofilen gemäss Abbildung 22 wurde davon ausgegangen, dass das als Pendlerfahrzeug verwendete Elektroauto während den Standzeiten tagsüber auch ans Netz geht. Dabei ist festzuhalten, dass die entsprechende Ladeenergie natürlich nicht am Standort der simulierten Wohneinheit konsumiert wird. Insgesamt konzentrieren sich jedoch die Hauptladezeiten klar auf die späten Abend- und Nachtstunden.

10.6.3 Berücksichtigung der Fahrzeugladeprofile bei der Simulation

Die Gegenüberstellung der für das Elektroauto benötigten Ladeenergie in ihrem zeitlichen Verlauf und der durch die WKK-Anlage erzeugten elektrischen Energie basiert auf dem im Kapitel 10.6.2 beschriebenen Ladeprofil. Die Simulation wurde für die 'MuKen'-Wohneinheit mit dem Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' (WKK-Anlage mit PV) durchgespielt. Ziel der Untersuchung ist, die Ungleichzeitigkeit der Verbrauchs- und Produktionsprofile aufzuzeigen. Die Ergebnisse sind Basis für eine Optimierung der möglichst hohen Gleichzeitigkeit von Stromerzeugung und -verbrauch, um eine geringe Netzbelastung zu erreichen.

Abbildung 23 zeigt die in der Simulation verwendeten Fahrzeug-Ladeprofile auf der Basis des Ladeprofils in Abbildung 22.

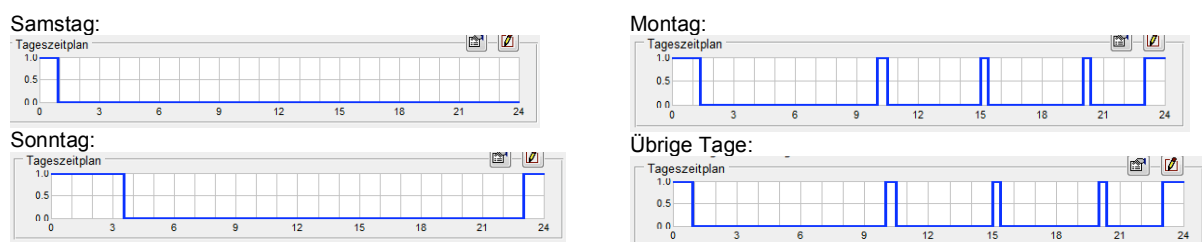


Abbildung 23 In der Simulation verwendete Fahrzeug-Ladeprofile.

10.6.4 Energie- und Umweltbewertung der Systemszenarien mit Einbezug der Mobilität

Abbildung 24 bis Abbildung 26 zeigen die Bewertung der Szenarien nach Primärenergieeinsatz, Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkten differenziert nach energetischem Gebäudestandard 'Bestand 1980', 'MuKE' und 'Minergie-P'.

Der höchste Primärenergiebedarf ist erwartungsgemäss beim Anlagesystemszenario 'Konservativ' (Gaskessel, Benzinfahrzeug) für die Wohneinheit mit dem Gebäudestandard 'Bestand 1980' auszumachen (Abbildung 24). Diese Variante hat auch den höchsten Treibhausgasausstoss (Abbildung 25) und weist die meisten Umweltbelastungspunkte (Abbildung 26) auf.

Der geringste Primärenergiebedarf wird mit dem Anlagesystemszenario 'Polyvalente Energiesystem' in der 'MuKE'-Wohneinheit erreicht. Der gegenüber dem Energiestandard 'Minergie-P' leicht höhere Bedarf wird durch die höhere Stromerzeugung leicht überkompensiert. Allerdings liegen die Primärenergiewerte für die Gebäudestandards 'MuKE' und 'Minergie-P' bei allen Systemvarianten 'Polyvalente Energiesysteme' sehr nahe beieinander. Auch das Referenzszenario 'Progressiv' weist für beiden Gebäudestandards ähnliche Wert wie das Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' auf. Grund dafür ist, dass der leicht verringerte Bedarf an elektrischer Energie für die Wärmepumpe bei der Wohneinheit 'Minergie-P', der allerdings am gesamten Strombedarf nur einen geringen Anteil ausmacht, durch den höheren Energiebedarf der Lüftungsanlage wieder kompensiert wird.

Bei der Wohneinheit 'Bestand 1980' wird bei den polyvalenten Energiesystemen 'BHKW' und 'MGT' mit dem hohen Brennstoffbedarf für die Heizwärme übers Jahr bilanziert fast die gesamte elektrische Energie selber erzeugt. Der zeitliche Verlauf von Stromerzeugung und Stromverbrauch wird im Kapitel 10.6.5 untersucht.

Das Referenzszenario 'Progressiv' schneidet mit den geringsten Treibhausgasemissionen (Abbildung 25) am besten ab. Der Schritt vom Referenzszenario 'Konservativ' zum Referenzszenario 'Progressiv' vermindert die Treibhausgasemissionen um fast 80%. Die Gas-WKK-Anlagen im Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' reduzieren die CO₂-Emissionen um ca. 50%. Um diesen Wert noch mehr zu senken, können anstelle von Erdgas biogene Brennstoffe verwendet werden (Abbildung 28).

Die Bewertung nach Umweltbelastungspunkten in Abbildung 26 ergibt ein ähnliches Bild wie die der Bewertung nach Primärenergie. Interessanterweise erreicht hier das polyvalente Energiesystem 'BHKW' mit dem Gebäudestandard 'Bestand 1980' den gleichen Tiefstwert wie mit dem Standard 'MuKE'. Der Grund ist die im Vergleich zur elektrischen Energie etwas günstigere Bewertung des Erdgases.

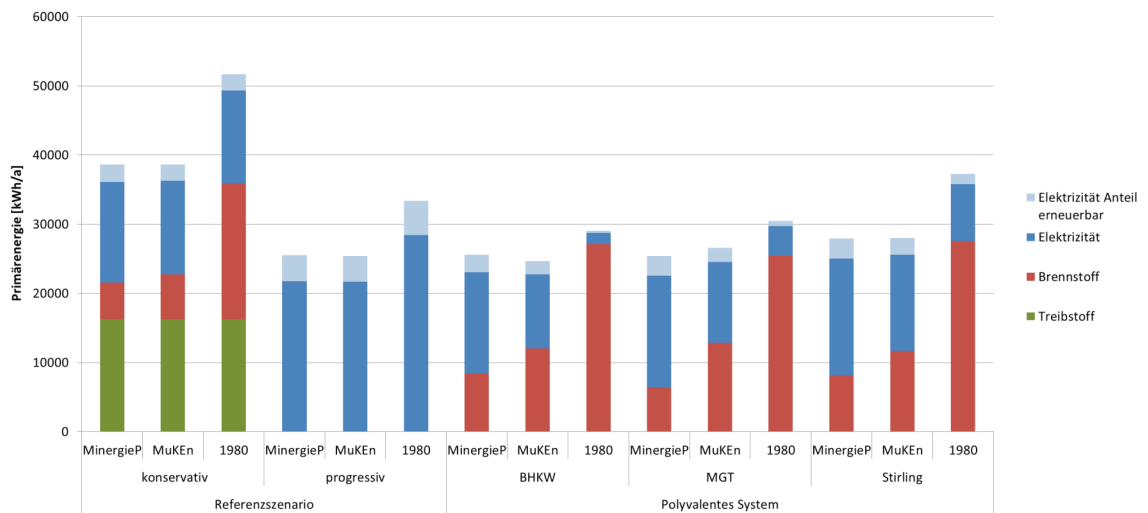


Abbildung 24 Primärenergieverbrauch für Heizung, Warmwasser, Strom und Mobilität, differenziert nach den verschiedenen Gebäudestandards (CH-Stromverbrauchermix / Erdgas).

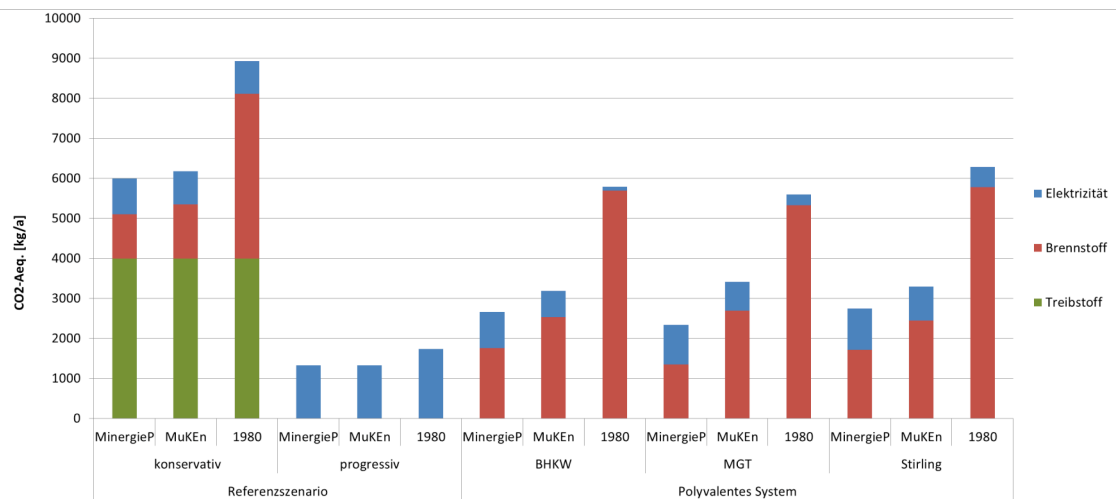


Abbildung 25 Treibhausgasemissionen für Heizung, Warmwasser, Strom und Mobilität differenziert nach den verschiedenen Gebäudestandards (CH-Stromverbrauchermix / Erdgas).

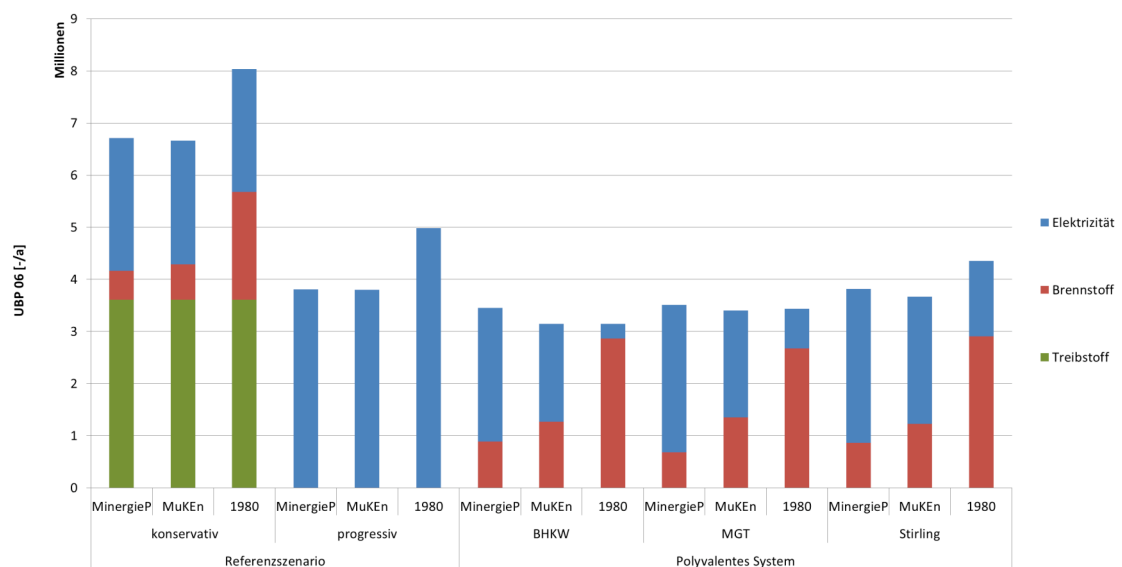


Abbildung 26 Umweltbelastungspunkte für Heizung, Warmwasser, Strom und Mobilität differenziert nach den verschiedenen Gebäudestandards (CH-Stromverbrauchermix / Erdgas).

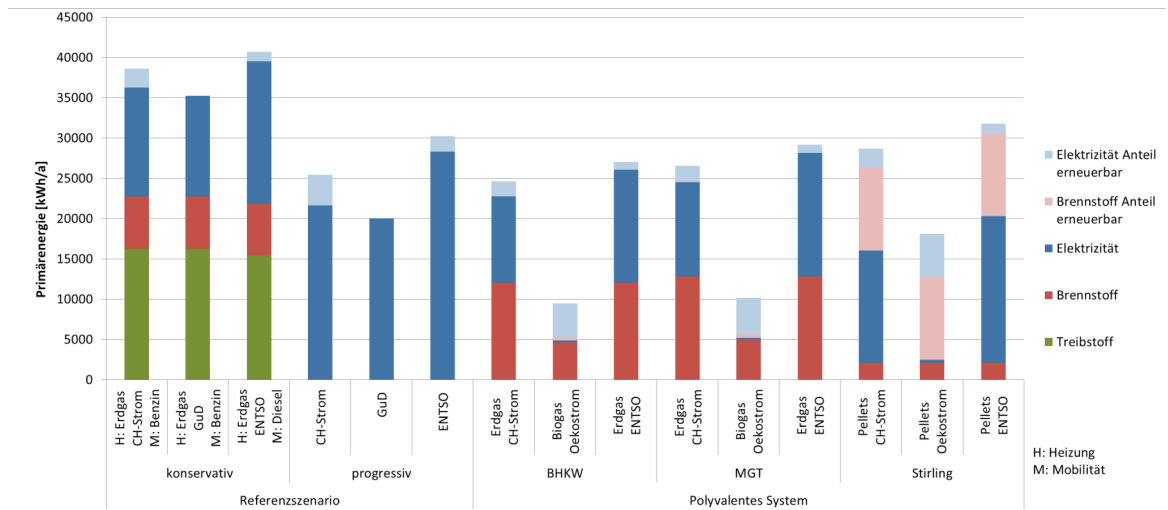


Abbildung 27 Primärenergieeinsatz nach Energieträger für den Gebäudestandard 'MuKen'.

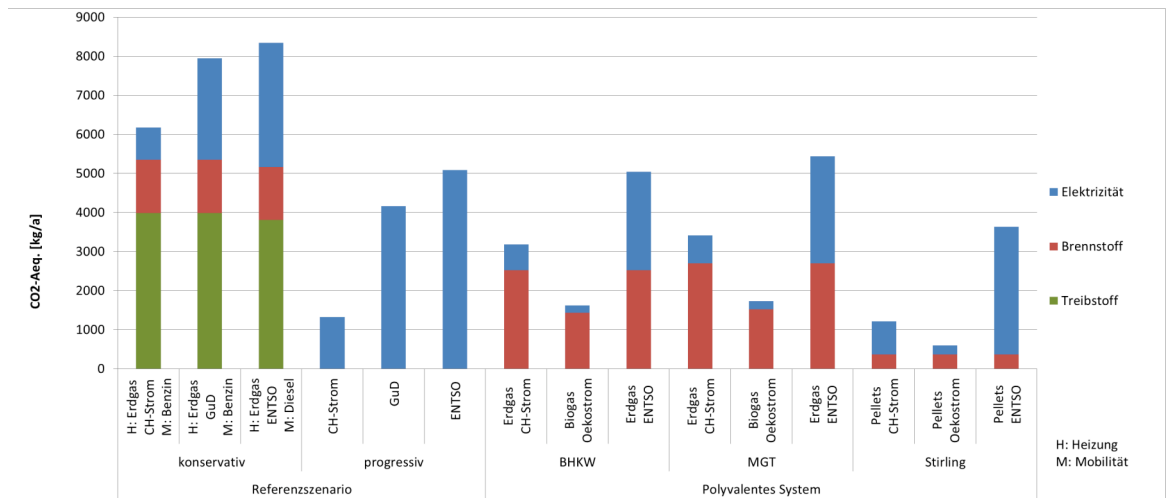


Abbildung 28 CO₂-Emissionen nach Energieträger für den Gebäudestandard 'MuKen'.

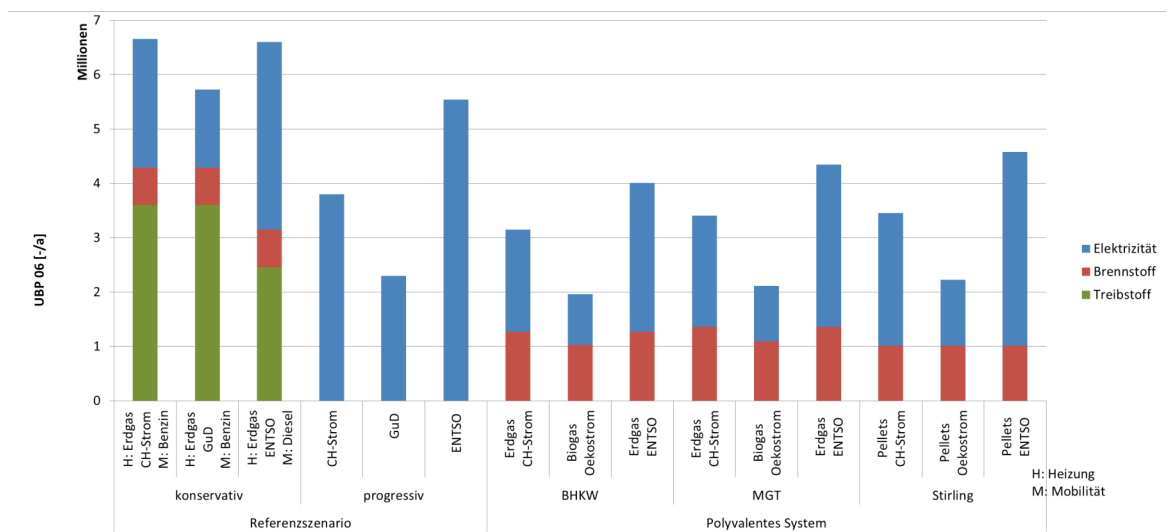


Abbildung 29 Umweltbelastungspunkte nach Energieträger für den Gebäudestandard 'MuKen'.

Abbildung 27 bis Abbildung 29 zeigen die Bewertung der Szenarien nach Primärenergieeinsatz, Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkten, differenziert nach verschiedenen Energieträgern für eine 'MuKE'-Wohneinheit.

Abbildung 27 zeigt, dass die mit Biogas betriebenen polyvalenten Energiesysteme mit einer Deckung des Restbedarfs an elektrischer Energie durch Ökostrom (Mix aus 80% Wasserkraft, 2% PV und 18% Biogas-BHKW) den weitaus geringsten Primärenergieeinsatz aufweisen.

Bei den Treibhausgasemissionen (Abbildung 28) weist die Variante mit Pellets-gefeuerter Stirling-WKK und Restdeckung durch Ökostrom einen extrem tiefen Wert auf. Ebenfalls tiefe CO₂-Werte, aber bereits doppelt so hoch, weisen die Varianten mit Pellets-gefeuerter Stirling-WKK und Restdeckung durch CH-Strom und das Referenzszenario 'Progressiv' mit CH-Strom auf. Hohe Emissionen sind für alle Energieträger in Kombination mit einem Gaskessel und für alle Szenarien in Kombination mit dem europäischen ENTSO-Strommix erkennbar.

Bei der Bewertung der Szenarien mit Umweltbelastungspunkten (Abbildung 29) sind die Biogas- und Pellets-gefeuerten Varianten in etwa gleichwertig. Interessanterweise erreicht hier das Referenzszenario 'Progressiv' mit Strom aus einem GUD-Kraftwerk einen annähernd gleich guten Wert.

10.6.5 Untersuchung der Gleichzeitigkeit von Stromerzeugung und Fahrzeugbatterieladung

Für die folgende Betrachtung wurden für das Anlagensystem 'Polyvalente Energiesysteme' mit WKK-Anlage drei Fälle betrachtet:

1. Basisfall: wärmegeführte WKK-Anlage
WKK-Anlage schaltet ein, wenn Speichertemperatur auf 2 m Höhe < 60°C;
WKK-Anlage schaltet aus, wenn Speichertemperatur auf 0.2 m Höhe > 60°C;
WKK-Anlage ist nur im Zeitraum von 21:00 bis 06:00 Uhr bei Aussentemperaturen von unter 13°C in Betriebsbereitschaft.
2. Uneingeschränkte WKK-Anlage-Betriebsbereitschaft
wie Basisfall; Betrieb bei Bedarf rund um die Uhr möglich.
3. WKK-Anlage-Betriebsbereitschaft und Elektroautoladung synchronisiert:
Freigabe nach Ladeprofil des Elektroautos (siehe Abbildung 22). Da die täglichen Ladezeiten in Spitzenlast-Situationen etwas zu kurz sind, führt das dann zu einem stromgeführten Betrieb. Aus den kleinen Differenzen der produzierten elektrischen Energie kann jedoch geschlossen werden, dass dies nur kurzzeitig der Fall ist. Im Übrigen handelt es sich um einen stark eingeschränkt wärmegeführten Betrieb. Diese Variante kann auch als WKK-Betrieb eines Range Extenders aufgefasst werden.

Abbildung 30 bis Abbildung 32 zeigen die Verläufe des Gebäudestromverbrauchs und der Fahrzeugbatterieladung sowie die erzeugte elektrische Energie durch die WKK-Anlage und die PV-Anlage für jeweils eine Woche in der Variante des Basisfalls.

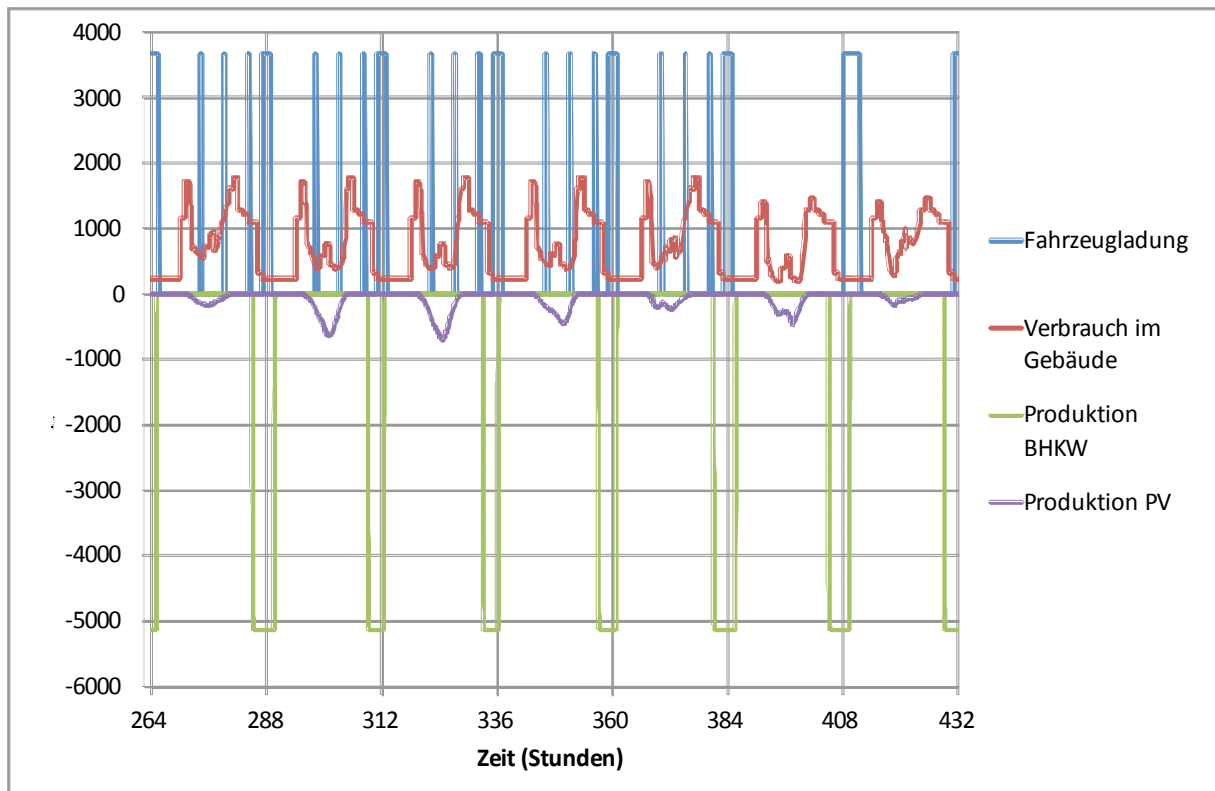


Abbildung 30 Verlauf von Gebäudestromverbrauch, Fahrzeugbatterieladung und Stromerzeugung in einer Januarwoche (WKK-Betrieb limitiert auf Zeitraum von 21:00 - 06:00 Uhr).

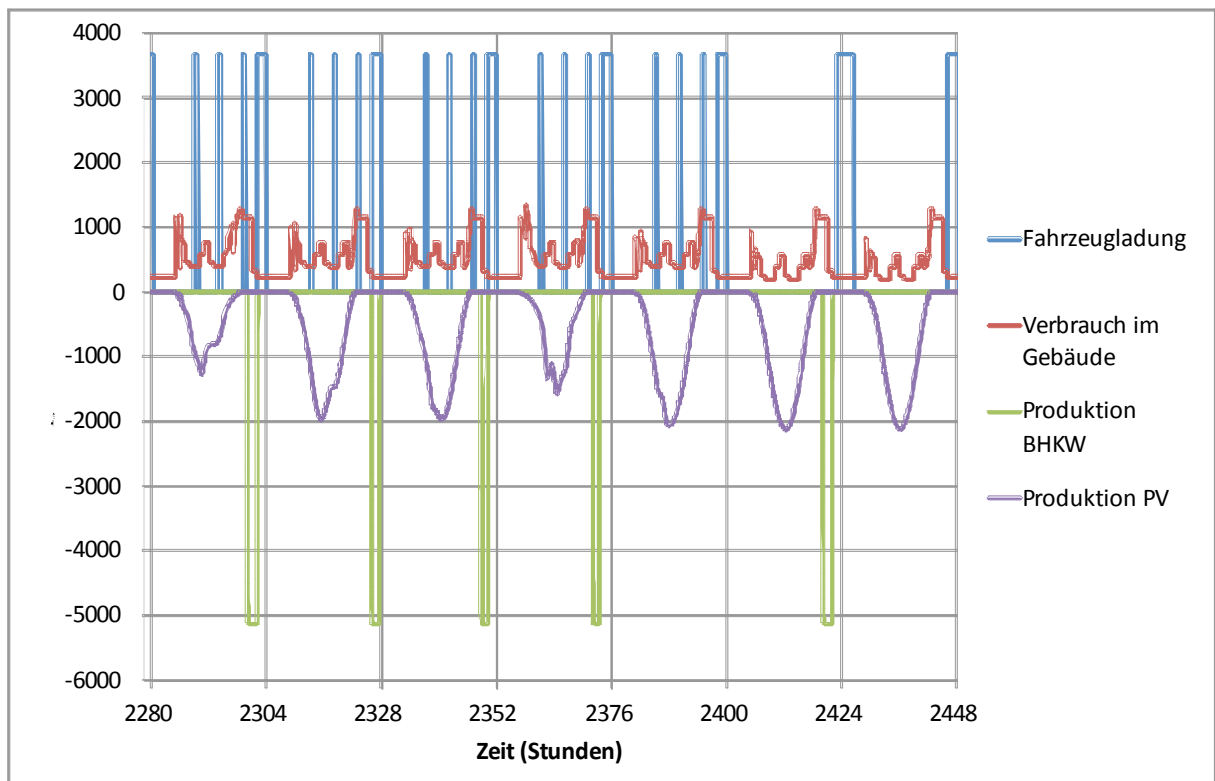


Abbildung 31 Verlauf von Gebäudestromverbrauch, Fahrzeugbatterieladung und Stromerzeugung in einer Aprilwoche (WKK-Betrieb limitiert auf Zeitraum von 21:00 - 06:00 Uhr).

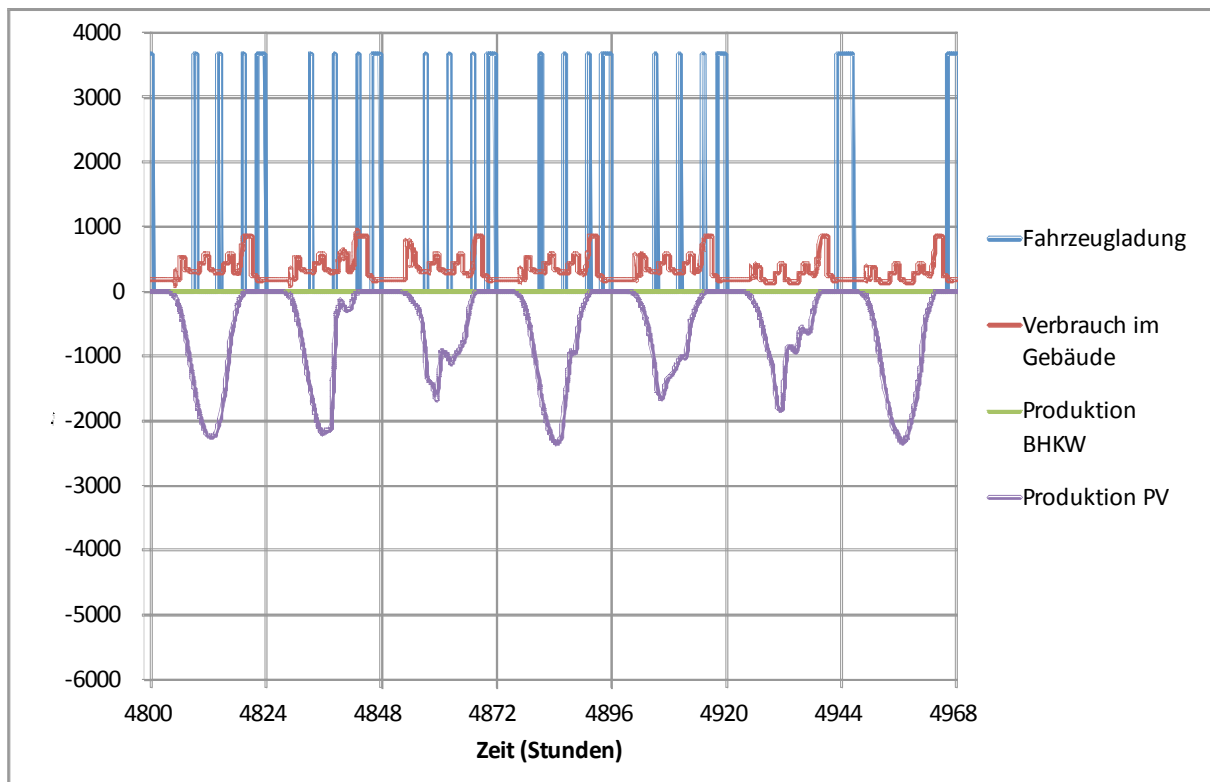


Abbildung 32 Verlauf von Gebäudestromverbrauch, Fahrzeugbatterieladung und Stromerzeugung in einer Juliwoche.

Die Abbildung 30 zeigt eine Januarwoche mit hohem Heizenergiebedarf. Entsprechend hoch ist die Stromproduktion der WKK-Anlage. Die PV-Anlage verzeichnet eine geringe Produktion.

In der Übergangszeit (Abbildung 31) ist der Heizenergiebedarf und damit die Produktion von WKK-Strom geringer, dafür steigt die PV-Produktion. Der fehlende WKK-Strom in der Juliwoche (Abbildung 32) kann durch die PV-Stromproduktion kompensiert werden.

Die in Abbildung 30 bis Abbildung 32 dargestellten Resultate zeigen folgende Erkenntnisse:

- Da der Betrieb der WKK-Anlage bei der Grundvariante auf die Zeit zwischen 21:00 und 06:00 Uhr limitiert ist, ergibt sich ein regelmässiger WKK-Betrieb. Die Batterieladezeiten des Elektroautos beginnen jeweils um 21 Uhr und dauern je nach Verbrauch bis zu maximal 4.5 Stunden. Dieser Wert ist direkt abhängig von der thermischen Leistung der WKK-Anlage und der Grösse des thermischen Speichers, sowie von den eingestellten Regelparametern (Lage und Sollwerte der Temperaturen im Speicher).
- Auf eine Ladephase für das Pendlerfahrzeug am Arbeitsplatz kann bei den berechneten Ladezyklen und den angenommenen Fahrleistungen verzichtet werden. Die WKK-Stromproduktion kann den Ladebedarf nach der Heimkehr abends problemlos auffangen.
- Die Resultate zeigen zudem, dass die Anzahl Betriebszyklen der WKK-Anlage mit einer Speicherladung pro Tag gering ist. Trotzdem liegt die jährliche Betriebszeit der WKK-Anlage bei weitem nicht in einem ökonomisch vertretbaren Bereich.
- Es zeigt sich die gute Ergänzung der WKK- und PV-Anlage: wenn während der Übergangszeit der Heizenergiebedarf und damit die WKK-Stromproduktion sinkt, steigt die PV-Produktion. Im Sommer wird bei ausgeschalteter WKK-Anlage die Brauchwarmwasser-Erwärmung durch einen Wärmepumpen-Boiler bewerkstelligt. Der Wärmepumpenstrom kann durch die PV-Anlage gedeckt werden.

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Verläufe während der Aprilwoche für die Regelfälle mit uneingeschränktem und mit voll synchronisiertem Betrieb.

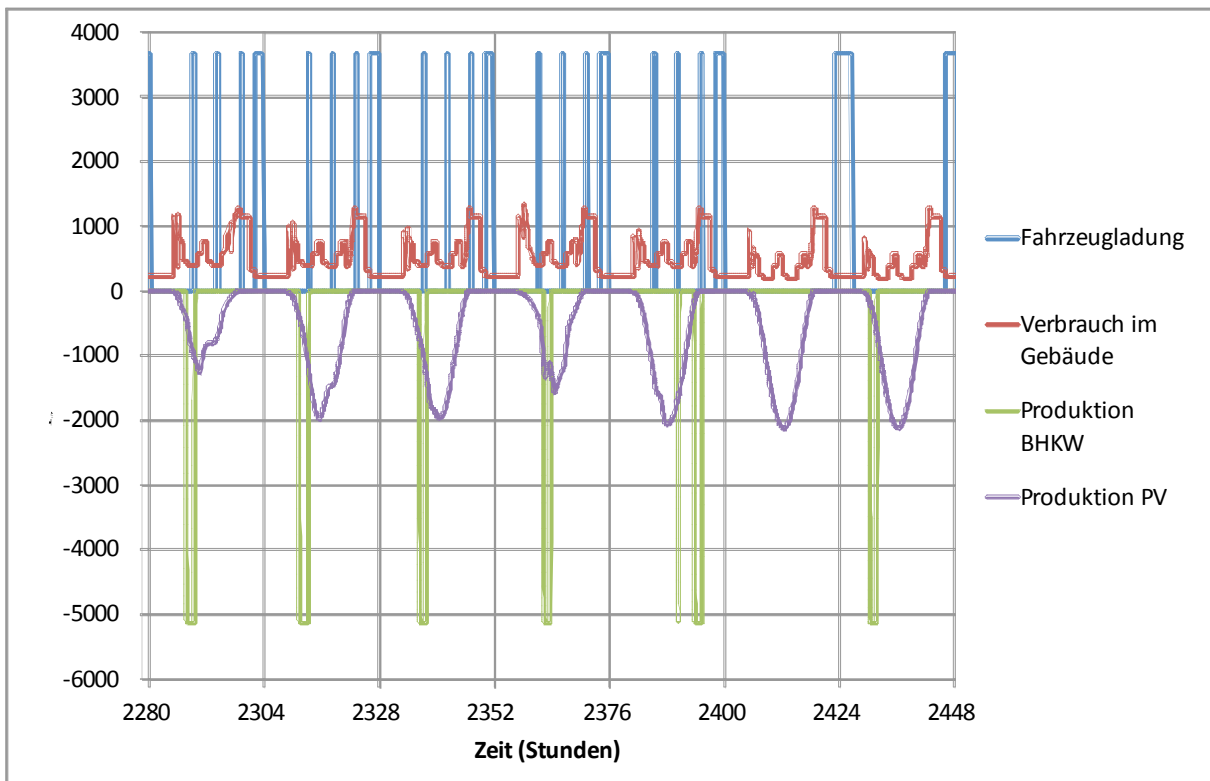


Abbildung 33 Verlauf von Gebäudestromverbrauch, Fahrzeugbatterieladung und Stromerzeugung in einer Aprilwoche mit einem uneingeschränkten WKK-Betrieb.

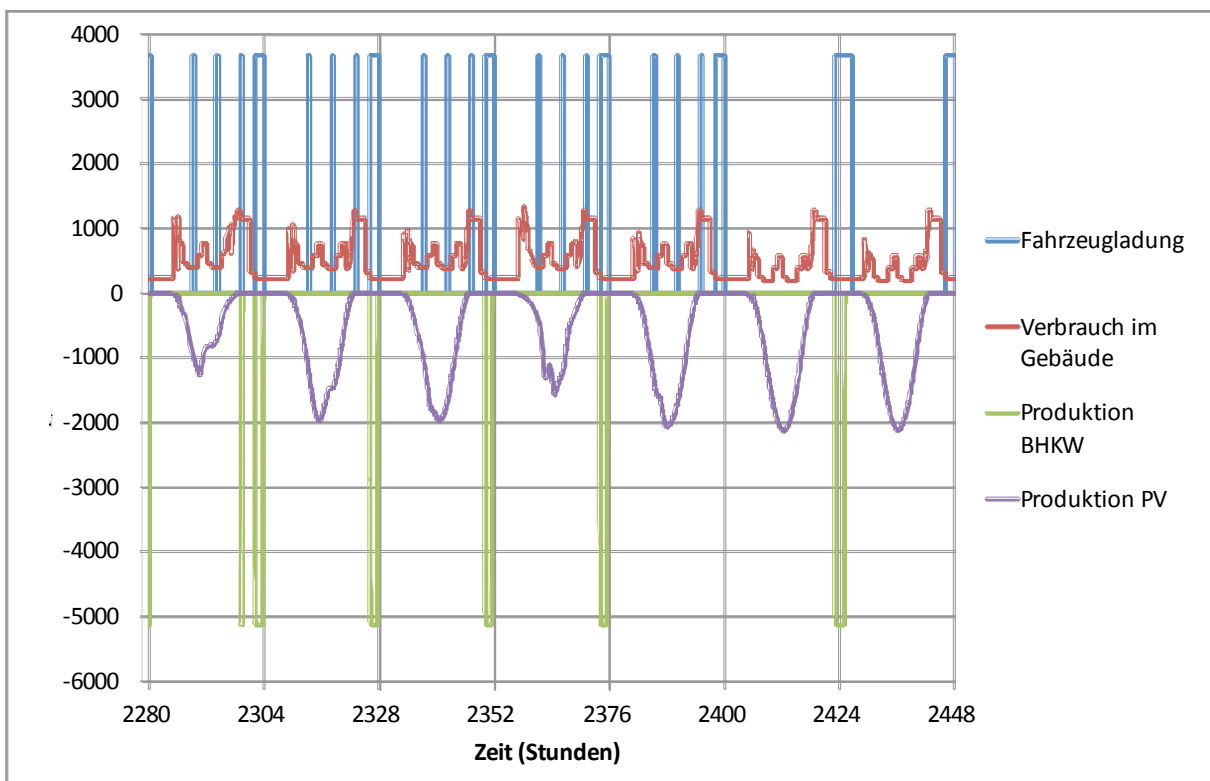


Abbildung 34 Verlauf von Gebäudestromverbrauch, Fahrzeugbatterieladung und Stromerzeugung in einer Aprilwoche für den synchronisierten Betrieb zwischen WKK-Betrieb und Fahrzeugbatterieladung.

Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen folgende Resultate:

- Bei zeitlich uneingeschränktem WKK-Anlagebetrieb sind die Batterieladezeiten nicht mit dem WKK-Betrieb synchron. Zeitgleiche Batterieladung und WKK-Betrieb erfolgen nur zufällig.
- Ein thermischer Tagesspeicher erlaubt die Synchronisation des Batterieladebetriebes mit der WKK-Anlage. Die WKK-Anlage muss so bemessen sein, dass sie den Tageswärmebedarf während der Ladezeiten des Fahrzeugs auch bei Spitzenheizlasten decken kann.

10.6.6 Auswirkung der Elektromobilität auf die elektrische Eigenbedarfsdeckung

Mit Hilfe der im vorangehenden Abschnitt dargestellten Ladeprofile lässt sich der Einfluss der Elektromobilität auf die elektrische Eigenbedarfsdeckung ermitteln. Bei der angenommenen Fahrleistung von 18'000 km/a je Wohneinheit (Tabelle 7), resultiert bei einem spezifischen Elektrofahrzeug-Verbrauch von 23 kWh/100 km ein jährlicher elektrischer Energieverbrauch von 4'140 kWh.

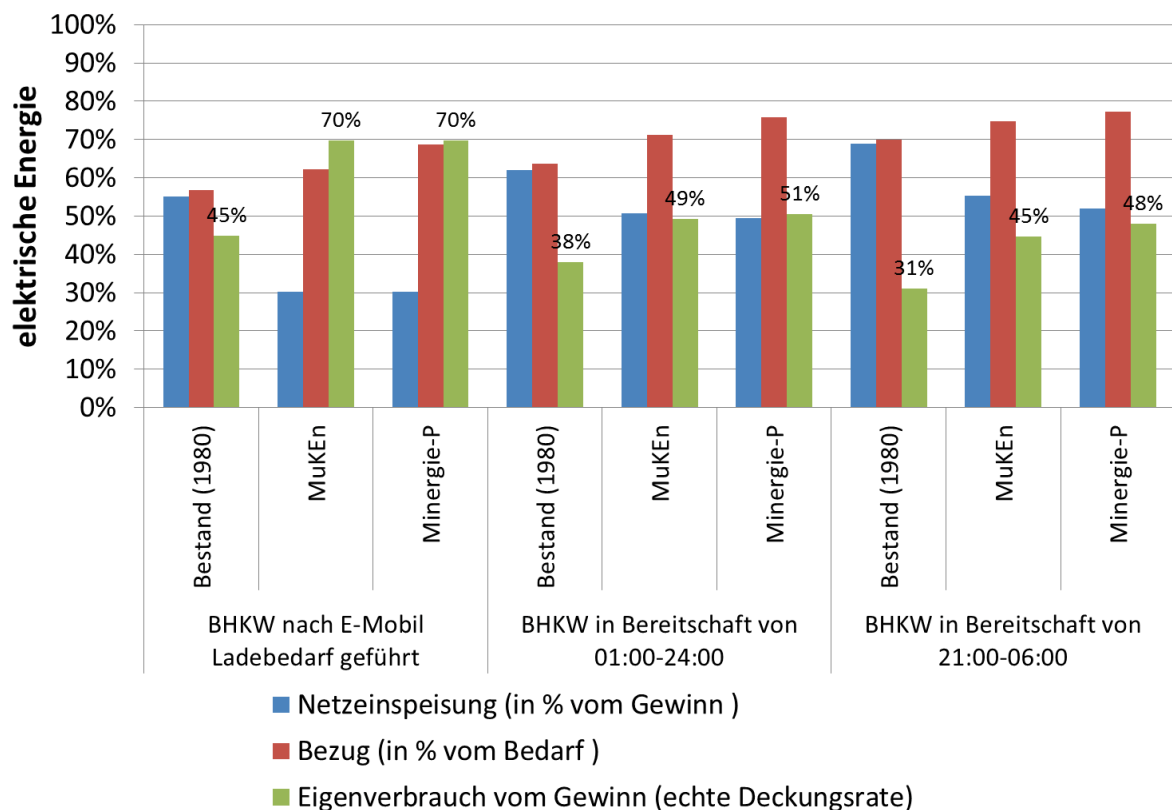


Abbildung 35 Netzbelastung durch die polyvalente Energieversorgung einschliesslich der Elektromobilität: Anteile von eingespielter, bezogener und lokal gebrauchter elektrischer Energie.

Die Ergebnisse in Abbildung 35 zeigen eine deutliche Erhöhung des Eigenstromverbrauchs durch den Batterieladebedarf des Elektroautos. Die Spitzenwerte des Eigenstromverbrauchs erreichen beim synchronisierten WKK-Anlage/Batterieladebetrieb 70%. Eine Ausweitung der Betriebsbereitschaft der WKK-Anlage von 9 Stunden auf 24 Stunden mit Pufferung der Wärme in einem Speicher hat keinen signifikanten Einfluss auf die Eigenbedarfsdeckung,

weil die WKK-Laufzeiten und damit die Batterieladezeiten beim eingeschränkten Betrieb lang genug sind.

Die synchronisierte Regelung der WKK-Anlage nach dem Batterieladebedarf des Elektroautos erlaubt eine Reduktion der Einspeisung der generierten Elektrizität auf 30% je Wohneinheit. Ein weiterer Schritt, der sowohl die Eigendeckung steigern als auch den Netzbezug reduzieren würde, ist das Elektrolastmanagement mit markanten Elektroverbrauchern im Haus wie Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser sowie Elektroauto.

10.7 Elektroauto als Verbraucher und Versorger

Im Rahmen einer Bachelor-Diplomarbeit an der Hochschule Luzern wurde durch zwei Studenten aus den Bereichen Gebäude-Elektro- und Gebäude-Klima-Engineering die optionale Nutzung von Range Extendern (RE) von Elektroautos als WKK-Anlage untersucht [Klauz S., Peinsold M., 2011].

Der Range Extender ist ein kleiner Verbrennungsmotor, der mit einem Elektrogenerator gekoppelt ist. Der Range Extender erhöht die Reichweiten eines Elektroautos und lässt die gängige Betankung des Autos mit Treibstoff zu. In konventionellen Fahrzeugen wird die Abwärme des Verbrennungsmotors ungenutzt über den Motorkühler und die Abgase an die Umwelt abgegeben. Mit dieser Abwärme geht ein beachtliches Potenzial an Energie verloren, mit der beispielsweise Gebäude beheizt werden könnten. Auch der Range Extender-Motor verliert im Fahrbetrieb seine Abwärme an die Umwelt. Um den Range Extender effizienter zu machen, liegt die Idee nahe, ihn auch zur Abwärmenutzung im Gebäude zu nutzen, wenn das Elektroauto in der Garage steht. Das Elektrofahrzeug mit Range Extender muss dafür mit den erforderlichen Anschlüssen versehen sein, damit es an die Gebäudeinfrastruktur gekoppelt werden kann. Bestehen diese Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Gebäude, kann die generierte Abwärme und die produzierte elektrische Energie in dieser stationären Anwendung des Range Extenders genutzt werden.

Basierend auf den Szenarien, wie sie in Kapitel 7.2 definiert sind, wurden die Betriebs-szenarien des Range Extenders als stationäre WKK-Anlage untersucht. Mit dem Simulationsprogramm IDA ICE wurden für die Wohneinheiten mit den verschiedenen Energie-standards Energieverbräuche und Lastkurven simuliert und mit den Referenzszenarien verglichen.

Recherchen bei Herstellern und Lieferanten von Haustechnikprodukten führten zu Lösungen für eine einfache und unkomplizierte technische Anbindung des Fahrzeugs mit Range Extender an das Gebäude. Damit konnte die Machbarkeit einer technischen Anbindung aufgezeigt werden. Voraussetzung ist, dass Range Extender die Anforderungen für die Gebäudeanbindung wie Wärmetauscher und das Bereitstellen der Netzspannung erfüllen.

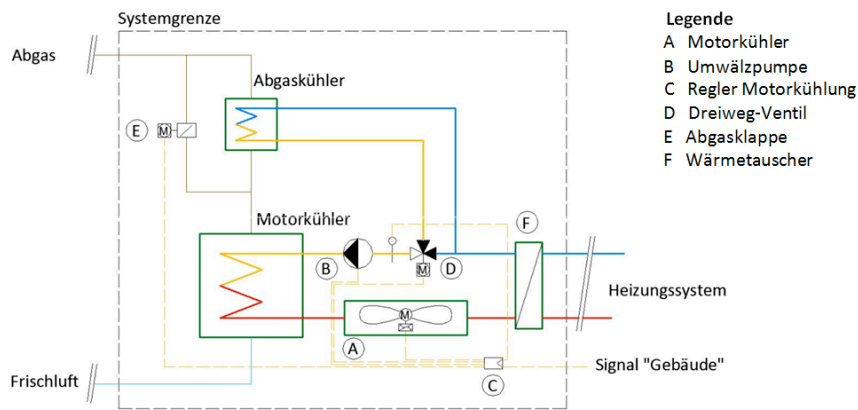


Abbildung 36 Elektroautos mit Range Extender: Anbindung des Range Extenders als WKK-Anlage an die technische Gebäudeinfrastruktur.

In Abbildung 36 ist das Prinzipschema der vorgeschlagenen technischen Anbindung dargestellt. Für die technische Umsetzung wurden die Anforderungen analysiert und darauf aufbauend eine Gesamtlösung skizziert. Die Abgasabsaugung ist mit marktgängigen Produkten gelöst (Abbildung 37). Alle notwendigen Verbindungen lassen sich mit einem Handgriff ("plug & play") auch durch technisch nicht versierte Personen herstellen.

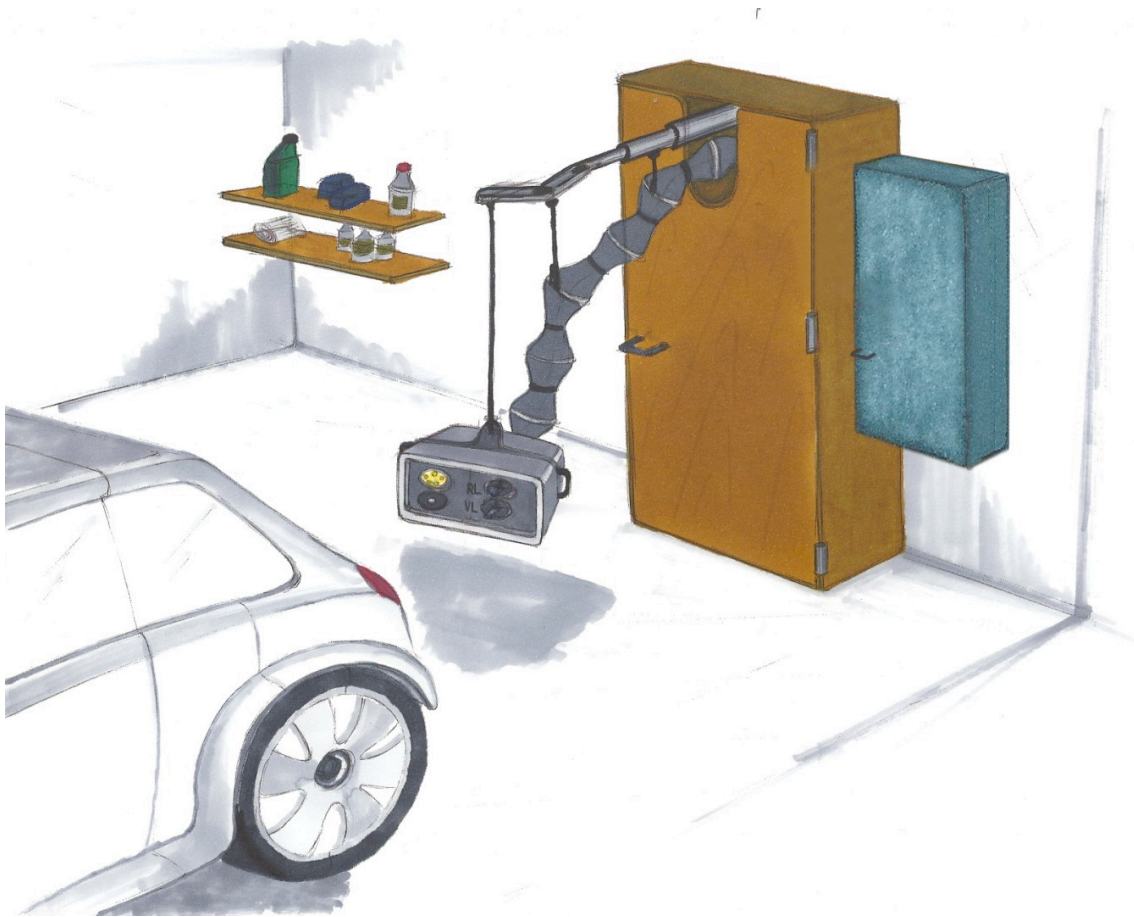


Abbildung 37 Plug & play-Lösung zur Anbindung des Elektroautos mit Range Extender an die Haus-technik.

In einem ausführlichen Funktionsbeschrieb wurden sämtliche beim An- und Abdocken notwendigen Aktionen und Signalflüsse erfasst und in einer Zustandsmatrix dokumentiert.

Die Anlagesystems Simulationen zeigen, dass das Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' mit Range Extender bezüglich Primärenergieeffizienz den Referenzszenarien 'Konservativ' und 'Progressiv' überlegen ist (Abbildung 38).

Bezüglich CO₂-Emissionen schneidet das Referenzszenario 'Progressiv' im Durchschnitt besser ab (Abbildung 39).

Bei den Kosten liegt die Variante Range Extender über dem Szenario 'Konservativ'. Die eruierten Kosten des Referenzsystem 'Progressiv' mit einer Erdsonden-Wärmepumpe liegen über dem Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' mit Range Extender (Abbildung 40).

Primärenergie Total
nach Gebäudestandard / CH-Strom / Erdgas

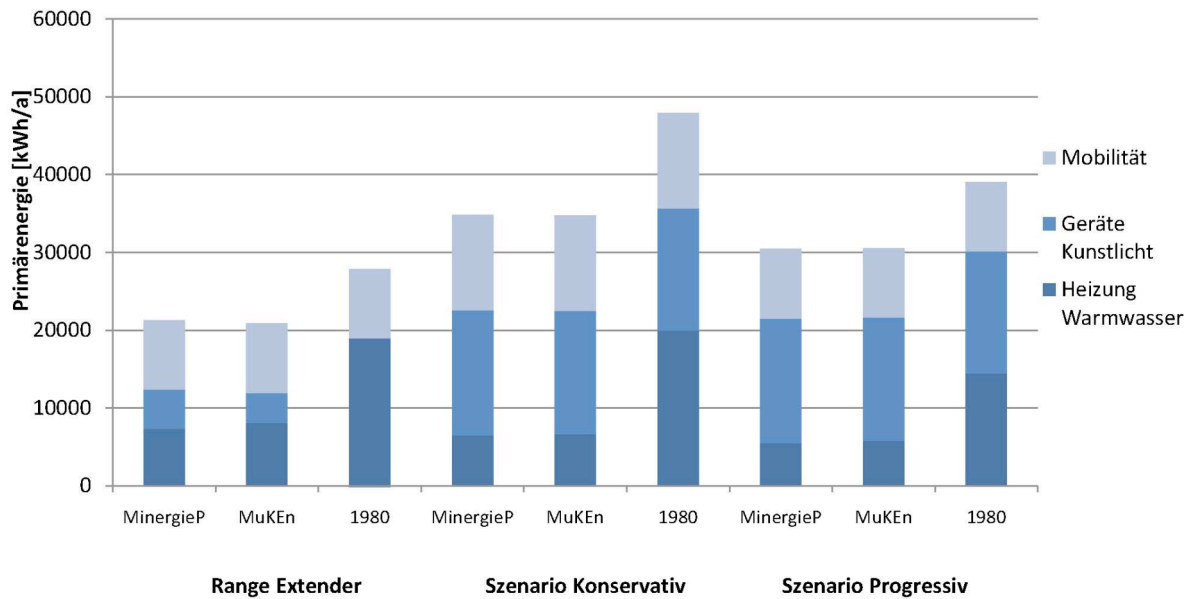


Abbildung 38 Vergleich des Range Extenders mit den Referenzszenarien bezüglich Primärenergiebedarf.

Kohlendioxid CO₂ Total
nach Gebäudestandard / CH-Strom / Erdgas

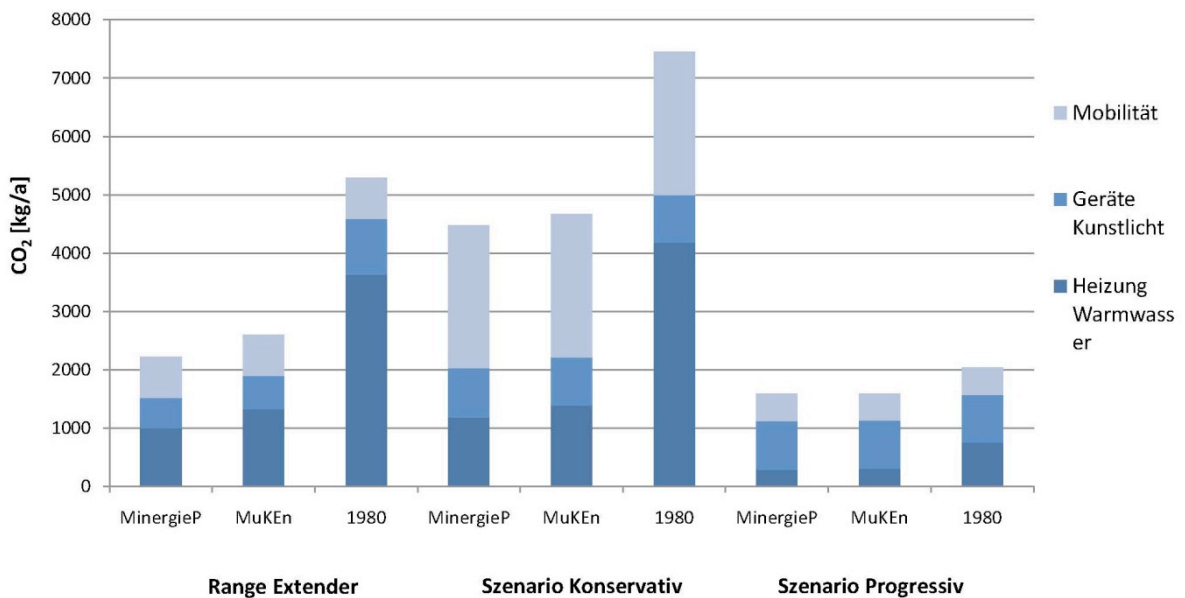


Abbildung 39 Vergleich des Range Extenders mit den Referenzszenarien bezüglich Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalent).

Übersicht jährliche Kosten Variante MinergieP / Garage

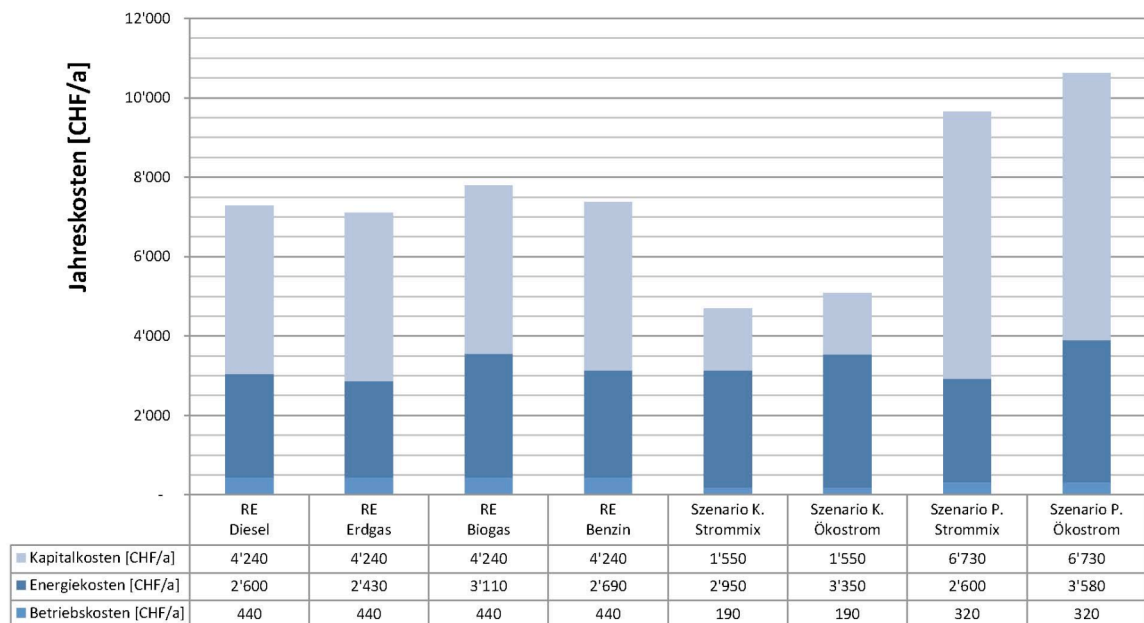


Abbildung 40 Vergleich des Range Extenders mit den Referenzszenarien bezüglich Wirtschaftlichkeit.

Die Simulationen ergaben, dass der Range Extender genügend Energie für das Beheizen des Gebäudes und für die Produktion von Warmwasser liefern kann. Es hat sich gezeigt, dass selbst der kleine Verbrennungsmotor im Range Extender für die definierten Wohneinheiten überdimensioniert ist. Die Betriebszeit liegt unter einer Stunde pro Tag. Die Rahmenbedingungen für diese Betriebszeit sind eine kalte Winterwoche in einem entsprechend gut isolierten Gebäude. Die Umsetzung des Szenarios 'Polyvalente Energiesysteme' mit Range Extender hängt nicht nur von ökologischen und wirtschaftlichen Faktoren ab, sondern auch von der Akzeptanz des Benutzers. Diese ist schwer vorauszusagen. Sie hat jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Umsetzung des Konzeptes.

11 Schlussfolgerung

11.1 Systemszenarien und -modellierung

Das entwickelte Simulationsmodell macht es möglich, polyvalente Energieanlagesysteme in Gebäuden, die nach unterschiedlichen Gebäudestandards gebaut sind, zu untersuchen. Mit dem Simulationsmodell lassen sich Energieanlagekonfigurationen optimal auf die unterschiedlichen Gebäudetypen abstimmen. Um einen relevanten Querschnitt des Schweizer Gebäudeparks abzubilden, wurde die Simulationsumgebung auf die drei Gebäudevarianten Bestand der Gebäude 1980 ('Bestand1980'), Mustervorschrift der Kantone ('MuKE') und 'Minergie-P' angewendet.

Die Simulationsumgebung IDA ICE wurde mit dynamischen Modellen von WKK-Anlagen erweitert. Das erweiterte Simulationsmodell ist mit Daten von realen WKK-Anlagen kalibriert. Die fehlende Betriebscharakteristik von Mikroturbinen wurde im Rahmen des Projektes entwickelt und im Simulationsmodell implementiert.

Der Einbezug der Mobilität in die Gebäudeenergieversorgung ist ein zentraler Punkt des neu entwickelten Systemmodells. Dies folgt der Logik, dass Gebäude Individualmobilität induzieren, was mit in der Gebäudeenergieversorgung zu berücksichtigen ist. Mit der Substitution von Verbrennungsmotorfahrzeugen durch Elektroautos werden Fragen nach der Energieresourceneffizienz und der Umweltbelastung aufgeworfen. Im vorliegenden Projekt wurde durch die Systemmodelle die Möglichkeit geschaffen, fundierte Antworten auf diese Fragen zu erhalten. Die erweiterten Systemmodelle decken neu die Ressourcen- und Umweltauswirkungen von gebäudeintegrierter, polyvalenter Energieversorgung in Kombination mit Elektrofahrzeugen ab.

11.2 Elektroauto und gebäudeintegrierte, polyvalente Anlagesysteme

Gebäudeintegrierte, polyvalente Anlagesysteme haben das Potenzial, ein Gebäude mit Strom und Wärme zu versorgen. Die Kombination von Photovoltaik (PV) und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) können nicht nur den Hausenergiebedarf, sondern auch den Mobilitätsbedarf abdecken.

WKK-Anlagen werden derzeit vor allem in den Ländern angeboten, die Strom in thermischen Kraftwerken erzeugen. Rund ein Dutzend Firmen führen Mikro-WKK-Anlagen in ihrem Angebot als stromerzeugende Gasheizung. Eine Firma steht in der Phase der Felderprobung einer Pellet-befeuerten WKK-Anlage mit Mikro-Dampfmaschine.

Die Betriebsstunden von WKK-Anlagen werden durch den Energiestandard des Gebäudes geprägt. Ein geringer Wärmebedarf des Gebäudes reduziert die Betriebszeit einer WKK-Anlage. In der Wohneinheit 'Bestand 1980' zeigt das Stromerzeugungsprofil im Winter (WKK-Anlage) eine um den Faktor 2 höhere Stromproduktion als im Sommer (PV). In der besser isolierten Wohneinheit 'MuKE' kann der Strombedarf in der Übergangssaison (September bis November und März) aufgrund der kürzeren WKK-Betriebszeiten nicht vollständig gedeckt werden. Noch deutlicher ist die Stromunterdeckung bei der gut gedämmten Wohneinheit 'Minergie-P'. In dieser Wohneinheit vermögen die hauseigenen Stromerzeugungsanlagen in den Monaten September bis Januar wegen den geringen Laufzeiten der WKK-Anlage den Strombedarf für Haus und Elektrofahrzeug nicht vollständig zu decken.

Das Elektroauto ergänzt das Gebäude-Stromlastmanagement als stromspeichernder Verbraucher ideal. Die optimierte Synchronisation von Stromeigenerzeugung und Batterieladung kann sowohl auf den Betrieb der WKK-Anlage wie auch das Brechen von Produktionsspitzen von PV-Anlagen (Peak shaving) angewendet werden. Die Untersuchungen ergaben eine Gleichzeitigkeit von Eigenstromerzeugung und eigenem Strombedarf von ca. einem Drittel. Zwei Drittel der Stromproduktion muss bei fehlendem Lastmanagement über das Netz

ausgeglichen werden. Der Einbezug des Elektroautos als Verbraucher mit eigenem Elektro-speicher kann die Gleichzeitigkeit von Stromerzeugung und -verbrauch von 34% auf bis zu 70% erhöhen. Voraussetzung dazu ist die Synchronisation der Wärme- und Stromproduktion der WKK-Anlage mit der Batterieladung des Elektroautos. Anlagentechnisch bedingt die Lade-synchronisation einen thermischen Speicher im Gebäude mit der Wärmekapazität eines Tagesbedarfs. Die aktuell verwendeten Fahrzeugbatterien eignen sich nicht für den Einsatz als Strompufferspeicher im Verbund mit dem Netz (Vehicle to Grid, V2G). Die zusätzlichen Speicherladezyklen vermindern die Lebensdauer der teuren Fahrzeugbatterien.

Die Option der dualen Nutzung des Verbrennungsmotors im Hybrid-Elektroauto (Plug in Hybrid) als Range Extender und WKK-Anlage wurde untersucht. Die technische Einbindung des Range Extenders ins Haustechniksystem ist mit heute verfügbarer Technologie mach-bar. Range Extender und Haustechnik müssten über die notwendigen einheitlichen Schnitt-stellen verfügen. Von der Infrastruktur her müsste die Haustechnik auch mit einem ther-mischen Speicher mit der Wärmekapazität eines Tagesbedarfs ausgerüstet sein.

11.3 Energie

Der Nutzenergiebedarf für Raumwärme reduziert sich durch verbesserte Energiestandards im Beispiel der Wohneinheit 'Minergie-P' gegenüber der Wohneinheit 'Bestand 1980' um 70%. Die Substitution des Verbrennungsmotorfahrzeuges durch ein Elektroauto senkt den Primärenergieverbrauch im Referenzszenario 'Konservativ' im Vergleich zum Referenz-szenario 'Progressiv' um ca. einen Drittel. Die Kombination von Elektroauto und Gas-WKK-Anlage im Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' erhöht den Primärenergiebedarf gegen-über dem Referenzszenario 'Progressiv' nicht. Gleichzeitig wird aber je nach Gebäudestan-dard 30% bis 90% des Strombedarfs selbst produziert. Aus Sicht der winterlichen Stromver-sorgung ist eine WKK-Anlage interessant, da sie im Jahresgang die PV-Anlagen ideal er-gänzt. Wird die WKK-Anlage statt mit Gas mit Pellets betrieben, kann sowohl der Treibstoff (Fahrstrom) wie der Brennstoff mit erneuerbaren Energien substituiert werden. Im Winter fährt man quasi ein Holzstrom-Elektroauto, im Sommer ein Sonnenstrom-Elektroauto. Eben-falls einen hohen Anteil erneuerbarer Energien weist die WKK-Anlage mit Biogas auf.

Die Kombination von Elektroauto und Gas-WKK-Anlage im Szenario 'Polyvalente Energie-systeme' weist im Gebäudestandard 'MuKEN' je nach eingesetzter Verbrennungsmaschine einen gleichen bis leicht geringeren Primärenergiebedarf gegenüber dem Gebäudestandard 'Minergie-P' auf, weil die Eigenstromproduktion höher ist.

Im Referenzszenario 'Progressiv' haben die Wohneinheiten mit dem Standard 'MuKEN' mit Strom aus Erdgas/Dampf-Kombikraftwerken (GuD) den geringeren Primärenergiebedarf als Erdgas-WKK-Anlagen in Kombination mit Strom aus dem Schweizer Verbrauchermix im Szenario 'Polyvalente Energiesysteme'. Von der Ressourcenökonomie her betrachtet, sind GuD-Kraftwerke und dezentrale, fossile WKK-Anlagen gleichwertige Optionen. In den beiden Optionen steht die hohe Stromeffizienz von GuD-Kraftwerken ohne Abwärmenutzung der tieferen Stromeffizienz kombiniert mit Abwärmenutzung von WKK-Anlagen gegenüber.

Die monatlichen Energiebilanzen von Produktion und Verbrauch lassen die gebäudeeigenen Stromerzeugungsanlagen auf ihre saisonale Versorgungscharakteristik analysieren. Das Schweizer Energieszenario 2050 sieht die Deckung des Energiebedarfs weitgehend durch erneuerbare Energien vor. Dazu sind die saisonalen Aspekte der Energieversorgung aus-schlaggebend. Die Rechnungen zeigen, dass die Photovoltaikanlage den Stromverbrauch im Sommer decken. Im Winter gilt es neue Strategien zur Versorgung der Gebäude mit erneuerbaren Energien zu entwickeln.

11.4 Umwelt

Das Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' mit Pellet- bzw. Biogas-WKK- und PV-Anlage erzielt die geringsten Treibhausgasemissionen (THG). Niedrige THG-Emissionen weist auch das Referenzszenario 'Progressiv' mit Elektroauto und Wärmepumpe mit Strom aus dem Schweizer Stromverbraucher mix auf. Die THG-Emissionen verringern sich gegenüber dem Referenzszenario 'Konservativ' um 80%. Der Einsatz von Erdgas-betriebenen WKK-Anlagen im Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' bringt eine Verbesserung der THG-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario 'Konservativ' von 50%.

Strom aus GuD-Kraftwerken im Referenzszenario 'Progressiv' führt gegenüber Erdgas-WKK- und PV-Anlagen im Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' zu ca. 30% höheren THG-Emissionen. Erdgas-betriebene WKK-Anlagen sind bezüglich der THG-Problematik im Vergleich zu GuD-Kraftwerken gleichwertig.

Nebst der THG-Problematik können mit Hilfe von Umweltbelastungspunkten (UBP) die Auswirkungen der untersuchten Szenarien auf die Umwelt bewertet werden. Strom aus GuD-Kraftwerken im Referenzszenario 'Progressiv' erzielt tiefere UBP-Werte als die Stromversorgung auf Basis des Schweizer Verbraucher mix im gleichen Referenzszenario. Das Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' mit Gas-WKK-Anlagen steht punkto Umweltbelastung günstiger da als die mit Schweizer Strom mix betriebenen Elektroautos und Elektrowärmepumpen (Szenario 'Progressiv'). Werden Elektroauto und Elektrowärmepumpe mit Strom aus dem europäischen Erzeuger mix versorgt, liegen die UBP deutlich über den Werten von GuD- und WKK-Anlagen. Bezüglich Umwelteffizienz von Elektroautos ist die Art der Stromerzeugung ausschlaggebend.

11.5 Fazit

Der Schritt von der gängigen Energieversorgung der Haushalte mit Netzstrom sowie fossilen Brenn- und Treibstoffen (Referenzszenario 'Konservativ') zur integralen Energieerzeugung und Elektromobilität schont Ressourcen und Umwelt. Das Szenario 'Polyvalente Energiesysteme' mit Mikro-WKK- und PV-Anlage zur Versorgung einer Wohneinheit mit Wärme, Elektrizität und Strom für das Elektroauto (Szenarios 'Polyvalente Energiesysteme') ist bezüglich Primärenergieeinsatz zur mit Netzstrom (CH-Stromverbraucher mix) versorgten Wohneinheit (Referenzszenario 'Progressiv') mit Wärmepumpe, PV-Anlage und Elektrofahrzeug gleichwertig. WKK-Anlagen mit Biogas oder Holzpellets als Energieträger stehen hinsichtlich Treibhausgasemissionen gegenüber dem Referenzszenario 'Progressiv' gleichwertig bis überlegen da.

Der Vergleich von Erdgas-Kombi-Kraftwerken (GuD) und Erdgas-WKK-Anlagen zeigt für GuD einen geringeren Primärenergiebedarf, höhere Treibhausgasemissionen und eine tiefere Punktezahl der Umweltbelastung als Gas-WKK.

WKK-Anlagen ergänzen im Jahresverlauf die Produktion von PV-Anlagen ideal. Ein hoher energetischer Gebäudestandard verringert die Eigenstromdeckung während der Heizsaison bedingt durch kürzere Laufzeiten der wärmegeführten WKK-Anlage.

Durch geeignete regelungstechnische Massnahmen, insbesondere durch Synchronisierung des WKK-Betriebs mit der Ladung des Elektroautos, kann die Eigenstromnutzung auf bis zu 70% erhöht werden. Dies reduziert die Netzbelastung durch die Einspeisung von dezentral erzeugtem Strom signifikant. Voraussetzung dazu ist ein Wärmespeicher von der Grösse eines maximalen Tagesbedarfs.

Der Ausbau der dezentralen Energieversorgung lässt sich mit moderatem Aufwand bewerkstelligen, da die Anlagen in die Gebäudestruktur integriert werden können. Es sind keine zeitaufwändigen Bewilligungsverfahren erforderlich. Im Vergleich zu Grosskraftwerken kann die dezentrale Energieversorgung mit weniger Stakeholdern angegangen werden. Dies ermöglicht die rasche Umsetzung von dezentralen Energieanlagen. Verschiedene dezentrale Anlagensysteme sind auf dem Markt verfügbar und können durch das Gewerbe installiert

werden. Dies fördert die Beschäftigung in den verschiedensten Branchen. Polyvalente Energieanlagen erhöhen die Versorgungssicherheit dank ihren redundanten Strukturen.

Mit den für die verschiedenen Wohneinheiten gewonnen Erkenntnissen im vorliegenden Projekt ist die Skalierung des Untersuchungsraumes auf ganze Gebäude oder Gebäudecluster mit unterschiedlichem Nutzerverhalten möglich. Denkbar sind beispielsweise Quartiere mit Einkaufszentren, Geschäfts- und Wohnbauten. Es können für die diversen Nutzerprofile des Geschäfts- und Wohnbereichs im Tagesgang das Vernetzungs- und Speicherverhalten simuliert und beispielsweise die Bewirtschaftung thermischer oder elektrischer Speicher optimiert werden. Mit solchen Simulationsmodellen lassen sich in einem solchen Gebäudecluster neue Erkenntnisse für das Zusammenspiel von Energieproduzenten und Energiekonsumenten im Verbund mit 'Smart Grids' gewinnen.

Um die Herausforderungen der Winterstromversorgung mit erneuerbaren Energien anzugehen, müssen weitere Szenarien unter Einbezug von saisonalen Speichermöglichkeiten (thermische Speicher) auf Ebene Gebäude entwickelt werden. Mit den saisonalen Aspekten der Energieversorgung ergeben sich beispielsweise Fragestellungen wie die der Optimierung von Wärmedämmung und Leistungsgrösse der hauseigenen PV-Anlagen unter Berücksichtigung der eingesetzten Grauen Energie.

12 Symbolverzeichnis

| Bezeichnung | Einheit | Beschreibung |
|---------------|--|--|
| Bestand 1980 | | Energiestandard des Gebäudebestandes 1980 |
| BWW | | Brauchwarmwasser |
| CO | $[\text{mg}/\text{m}_n^3 @ 13\% \text{O}_2]$ | Kohlenmonoxid |
| ENTSO-E | | European Network of Transmission System Operators for Electricity |
| GuD | | Gas/Dampf-Kombikraftwerke |
| HG | $[\text{°C}]$ | Heizgrenztemperatur |
| IDA ICE | | Gebäudesimulations-Software EQUA Solutions |
| LRV | | Schweizer Luftreinhalte-Verordnung |
| MGT | | Mikrogasturbine |
| Minergie-P | | Energiestandard für Minergie-P-Gebäude |
| MuKE | | Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich |
| NOx | $[\text{mg}/\text{m}_n^3 @ 13\% \text{O}_2]$ | Stickoxide |
| PME | $[\text{mg}/\text{m}_n^3 @ 13\% \text{O}_2]$ | Staubemissionen (Particulate Matter Emission) |
| PV | | Photovoltaik |
| RE | | Range Extender (Verbrennungsmotor mit Generator zur Stromerzeugung im Elektroauto (Plug in Hybrid)) |
| THG | | Treibhausgase |
| UBP | | Umweltbelastungspunkte |
| VL-Temperatur | $[\text{°C}]$ | Heizkreis-Vorlauftemperatur |
| WE | Grundfläche 160 m ² | Wohneinheit |
| WKK | | Wärme-Kraft-Kopplung |
| WKK-K | | Kälte/Wärme-Kraftkopplung |

13 Literaturverzeichnis

- [Baumgartner F., 2010] Baumgartner F., 2010. Perspektiven der Elektromobilität und Wachstumspotentiale in der Schweiz, Kongress Stadt-Energie-Verkehr, 18.6.2010
- [Beausoleil-Morrison I. (ed.), 2008] Beausoleil-Morrison I. (ed). 2008. An experimental and simulation-based investigation of the performance of small-scale fuel cell and combustion-based cogeneration devices serving residential buildings. Final Report of IEA/ECBCS Annex 42.
- [Bundesamt für Statistik, 2005] Bundesamt für Statistik (BFS), *Mikrozensus zum Verkehrsverhalten 2005*, 2005, Bundesamt für Statistik.
- [Crawley D. et al., 2009] Crawley D., Pless S. and Torcellini P., 2009. *Getting to Net Zero*. ASHRAE Journal, 2009. 51(9): p. 5.
- [Dorer V., 2007] Dorer V., 2007. Review on existing residential cogeneration systems evaluations. IEA/ECBCS Annex 42 Technical Report.
- [Dorer V., Weber A., 2008] Dorer V., Weber A., 2008. Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in Switzerland. IEA/ECBCS Annex 42 Report. ISBN No. 978-0-662-47718-1. Catalogue No.: M154-14/7-2008E-PDF.
- [Dorer V., Weber A., 2009] Dorer V., Weber A., 2009. Energy and CO₂ Emissions Performance Assessment of Residential Micro-Cogeneration Systems with Dynamic Whole-Building Simulation Programs. *Energy Conversion and Management* 50, 648–657
- [Dorer V., Weber R., 2004] Dorer V., Weber R., 2004. Nachhaltige Hausenergieversorgung mit Brennstoffzellen und erneuerbaren Energien. Schlussbericht novatlantis Vorprojekt. EMPA Dübendorf, Feb. 2004
- [EnDK, 2008] EnDK, 2008. *Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEi) - Ausgabe 2008*, K.K. Energiedirektoren, Editor 2008, Konferenz Kantonalen Energiedirektoren: Chur/ Switzerland. p. 171

- [Frischknecht R., Tuchschnid M., 2008] Frischknecht R., Tuchschnid M., 2008., *Primärenergiefaktoren von Energiesystemen, Version 1.4*, 2008, ESU-services GmbH, fair consulting in sustainability: Uster/ Switzerland.
- [Gaegauf C. et al., 2010] Gaegauf, C. et al., 2010. *Gebäude als Teil des virtuellen Kraftwerks*, 16. Status-Seminar (2010).
- [Keller T. et al., 2011] Keller T. et al., 2011. Application of an Up- and Downscaling-method to estimate the capability, 2011 of micro gas turbines for local energy supply of residential buildings. 21. Symposium Simulationstechnik (ASIM 2011).
- [Kirchner A., 2007] Kirchner A. et al., 2007. Die Energieperspektiven 2035 – Band 4 Exkurse. Bundesamt für Energie. 2007.
- [Klauz S., Peinsold M., 2011] Klauz S., Peinsold M., 2011. Range Extender als Mikro KWK Anlage. Bachelor-Diplomarbeit BDA_G_11_01, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Abt. Gebäudetechnik 2011
- [Koch M., 2008] Koch M., 2008. Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl in Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 2008, Universität Karlsruhe (TH): Karlsruhe. p. 264.
- [Krewitt W. et al., 2004] Krewitt W., Pehnt M., Fishedick M., Temming H.V. (Hrsg.). 2004. Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung. Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotentiale. Erich Schmidt Verlag, Berlin. Beiträge zur Umweltgestaltung, Band A 156; ISBN: 3-503-07870-3
- [Meier-Eisenmann E. et al., 2001] Meier-Eisenmann E. et al., 2001. *Begleituntersuchungen Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen (LEM) in Mendrisio; Detailbericht: Verbrauchsmessungen im Alltag und Umweltwirkungen*, 2001, Bundesamt für Energie: Zürich/ Bern, Schweiz. p. 90.
- [Notter D. A. et al., 2010] Notter D. A., Gauch M., Widmer R., Wäger P., Stamp A., Zah R., Althaus H. J., 2010. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles, Environmental Science & Technology, 9. August 2010
- [PolySMART WP 4, 2010] PolySMART WP 4, 2010. Technical Assessment & Design Guidelines, Report "Lessons learned and advice for the design of micro-trigeneration plants" Final report of EU PolySMART, siehe www.polysmart.org

- [PolySMART, 2010] PolySMART, 2010. Publishable final activity report. Final report of EU PolySMART, siehe www.polysmart.org
- [Ragonesi M. et al., 2008] Ragonesi M. et al., 2008. *Minergie-P, Das Passivhaus nach Schweizer Art*. 1 ed 2008: Faktor Verlag. 269.
- [SIA, 2010] 2044, S.M., Klimatisierte Gebäude - Standard-Berechnungsverfahren für den Leistungs- und Energiebedarf, 2010, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA). p. 72.
- [Trcka M., 2008] Trcka M., 2008. *Co-simulation for performance prediction of innovative integrated mechanical energy systems in buildings in Unit Building Physics and Systems at the Faculty of Architecture, Building and Planning* 2008, Technische Universiteit Eindhoven: Eindhoven. p. 163.
- [Voss K., Musall E., 2011] Voss K., Musall E., 2011. *Nullenergie Gebäude - Internationale Projekte zum klimaneutralen Wohnen und Arbeiten*. 1 ed 2011, München: Detail Green Books 191.
- [Weber A., Dorer V., 2010] Weber A., Dorer V., 2010. System performance evaluation of SOFC based CHCP systems. Public final report of EU Projekt PolySMART, deliverable D5.5, siehe www.polysmart.org
- [www.lichtblick.de, 2012-03-15] Firma Lichtblick, DE
- [Zogg M., 1998] Zogg M., 1998. *Wann sind Kleinstblockheizkraftwerke energetisch sinnvoll?* Gas, Wasser, Abwasser 78(1998)12, 959/966

14 Anhang A – Materialisierung der Wohneinheit in Abhängigkeit vom Gebäudestandard

Für die Berechnung des statischen U-Wertes wird mit $R_{se} = 0.04 \text{ (m}^2\text{K/W)}$ und $R_{si} = 0.13 \text{ (m}^2\text{K/W)}$ gerechnet. Dies entspricht $h_i = 7.7$ und $h_e = 25$.

Aussenwand

Minergie-P

Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen.

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|---------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| | | | | |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Stahlbeton | 1.8 | 2'400 | 1'100 | 0.15 |
| Steinwolle | 0.036 | 60 | 600 | 0.27 |
| Aussenputz | 0.87 | 1'800 | 1'100 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.44 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 0.13 |

MuKEN 2008

Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen.

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|---------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| | | | | |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Stahlbeton | 1.8 | 2'400 | 1'100 | 0.15 |
| Steinwolle | 0.036 | 60 | 600 | 0.17 |
| Aussenputz | 0.87 | 1'800 | 1'100 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.34 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 0.20 |

Bestand 1980

Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen.

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|---------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| | | | | |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Stahlbeton | 1.8 | 2'400 | 1'100 | 0.15 |
| Steinwolle | 0.036 | 60 | 600 | 0.08 |
| Aussenputz | 0.87 | 1'800 | 1'100 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.25 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 0.40 |

Dach

Minergie-P

Der Aufbau erfolgt von aussen nach innen

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| | | | | |
| Holzfaserplatte | 0.08 | 650 | 2500 | 0.05 |
| Steinwolle zwischen Sparen | 0.036 | 60 | 600 | 0.2 |
| Steinwolle | 0.036 | 60 | 600 | 0.08 |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.35 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 0.14 |

MuKEN 2008

Der Aufbau erfolgt von aussen nach innen

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| | | | | |
| Holzfaserplatte | 0.08 | 650 | 2500 | 0.05 |
| Steinwolle zwischen Sparen | 0.036 | 60 | 600 | 0.12 |
| Steinwolle | 0.036 | 60 | 600 | 0.06 |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.24 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 0.20 |

Bestand 1980

Der Aufbau erfolgt von aussen nach innen

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| | | | | |
| Holzfaserplatte | 0.08 | 650 | 2500 | 0.05 |
| Steinwolle zwischen Sparen | 0.036 | 60 | 600 | 0.04 |
| Steinwolle | 0.036 | 60 | 600 | 0.03 |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.13 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 0.40 |

Boden gegen unbeheizt

Minergie-P

Der Aufbau erfolgt von oben nach unten

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------|--------------------|-------------------|---------|-------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| Bodenplatte | 1.3 | 2'300 | 840 | 0.01 |
| Unterlagsboden | 1.4 | 2'200 | 300 | 0.05 |
| Isolation PS | 0.032 | 80 | 1'190 | 0.02 |
| Isolation PUR | 0.028 | 30 | 1'400 | 0.10 |
| Stahlbeton | 1.8 | 2'400 | 1'100 | 0.24 |
| Summe | | | | 0.42 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m ² K | | | 0.22 |

MuKEN 2008

Der Aufbau erfolgt von oben nach unten

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------|--------------------|-------------------|---------|-------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| Bodenplatte | 1.3 | 2'300 | 840 | 0.01 |
| Unterlagsboden | 1.4 | 2'200 | 300 | 0.05 |
| Isolation PS | 0.032 | 80 | 1'190 | 0.04 |
| Isolation PUR | 0.028 | 30 | 1'400 | 0.06 |
| Stahlbeton | 1.8 | 2'400 | 1'100 | 0.24 |
| Summe | | | | 0.40 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m ² K | | | 0.28 |

Bestand 1980

Der Aufbau erfolgt von oben nach unten

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------|--------------------|-------------------|---------|-------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| | | | | |
| Bodenplatte | 1.3 | 2'300 | 840 | 0.01 |
| Unterlagsboden | 1.4 | 2'200 | 300 | 0.05 |
| Isolation PS | 0.032 | 80 | 1'190 | 0.05 |
| Stahlbeton | 1.8 | 2'400 | 1'100 | 0.24 |
| Summe | | | | 0.35 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m ² K | | | 0.50 |

Geschosszwischendecke

Der Aufbau erfolgt von oben nach unten

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| Parkett | 0.21 | 750 | 2'200 | 0.01 |
| Unterlagsboden | 1.4 | 2'200 | 300 | 0.05 |
| Isolation PS | 0.032 | 80 | 1'190 | 0.02 |
| Stahlbeton | 1.8 | 2'400 | 1'100 | 0.24 |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.33 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 0.97 |

Diese Geschosszwischendecke wird in jeder Variante verwendet.

Innenwände

Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen

| Bezeichnung | λ | Dichte | c_p | Dicke |
|----------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------|
| | W/(mK) | kg/m ³ | J/(kgK) | m |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Modulbackstein | 0.44 | 1'100 | 900 | 0.15 |
| Innenputz | 0.7 | 1'400 | 900 | 0.01 |
| Summe | | | | 0.17 |
| | | | | |
| U-Wert | W/m²K | | | 1.85 |

Diese Innenwand wird in jeder Variante verwendet.

Fenster

Minergie-P

SIA Dreifach-Wärmeschutzglas

| Bezeichnung | Wert | Einheit |
|--|------|----------------------|
| U-Wert Glas | 0.5 | W/(m ² K) |
| U-Wert Rahmen (inkl. allen Wärmebrücken) | 1.3 | W/(m ² K) |
| Rahmenanteil | 25 | % |
| g-Wert | 0.47 | - |
| τ -solar | 0.36 | - |

MuKE 2007

SIA Zweifach-Wärmeschutzglas

| Bezeichnung | Wert | Einheit |
|--|------|----------------------|
| U-Wert Glas | 1.0 | W/(m ² K) |
| U-Wert Rahmen (inkl. allen Wärmebrücken) | 2.0 | W/(m ² K) |
| Rahmenanteil | 25 | % |
| g-Wert | 0.57 | - |
| τ -solar | 0.45 | - |

Bestand 1980

SIA Zweifach-Glas normal

| Bezeichnung | Wert | Einheit |
|--|------|----------------------|
| U-Wert Glas | 2.9 | W/(m ² K) |
| U-Wert Rahmen (inkl. allen Wärmebrücken) | 4.0 | W/(m ² K) |
| Rahmenanteil | 25 | % |
| g-Wert | 0.77 | - |
| τ -solar | 0.73 | - |

Quelle Fenster: gemäss SIA [SIA, 2010]

Türen

| | MinergieP | MuKEN 2007 | 1980 |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| OSB Platte | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Steinwolle | 0.05 | 0.03 | 0.01 |
| OSB Platte | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | | | |
| U-Wert W/(m²K) | 0.58 | 0.86 | 1.66 |

Sonnenschutz

Es wird von einer aussen liegenden Storen-Beschattung ausgegangen. Der Reduktionswert für den g-Wert beträgt 0.33, der für τ_{solar} 0.3.

Wärmebrücken

| Minergie-P | MuKEN 2007 | 1980 |
|------------|------------|------|
| keine | wenig | viel |

15 Anhang B – Bewertung des Modelldetaillierungsgrades

Performance Maps

Eine Performance Map ist eine Serie von parametrisierten Formeln, die den Modell-Input mit dem Modell-Output verbindet. Die Koeffizienten der Formeln wurden durch Messungen und Tests der abzubildenden Anlage ermittelt und kalibriert. Die Vor- und Nachteile des Verfahrens sind in Tabelle B1 zusammengefasst.

Tabelle B1 Performance-Maps Vor- und Nachteile

| Vorteile | Nachteile |
|---|---|
| Geringer Aufwand für die Kalibrierung | Risiko für numerische Probleme bei der Simulation |
| Erwarteter geringer Aufwand für die Implementierung | Dynamische Effekte werden nicht mitberücksichtigt |
| | Begrenzt einsetzbar für Parameterstudien |

Volle IEA Annex 42 Modell-Implementierung

Die Modelle der verbrennungsmotorbasierten WKK-Anlagen kombinieren Performance Maps mit physikalischen Modellen.

Tabelle B2 Volle Implementierung der IEA Annex 42 Modelle; Vor- und Nachteile

| Vorteile | Nachteile |
|---|--|
| Aufbau auf den aktuellen Stand der Wissenschaft und Weiterführung | Erwarteter grosser Aufwand für Modellimplementierung ist nicht Ziel des Projektes. |
| Maximale Einsetzbarkeit für Parameterstudien | Aufwendige Modellkalibrierung nötig |
| | Messdaten für Kalibrierung müssen instationären Anlagenbetrieb repräsentieren |

Teil-Implementierung

Die Teil-Implementierung sieht die Implementierung der wesentlichen Bestandteile der IEA Annex 42 Modelle vor. Die Kalibrierung wird auf wesentliche Parameter reduziert, welche die instationären Eigenschaften repräsentieren und für die auch Messergebnisse vorliegen.

Tabelle B3 Vor- und Nachteile der Teil-Implementierung

| Vorteile | Nachteil |
|--|---|
| Baut auf IEA Annex 42 | Restrisiko der zur erfolgenden Kalibrierung |
| Beschränkt die Nachteile der Kalibrierung | |
| Eignet sich zur Betrachtung der instationären Effekte | |
| Koeffizienten bei Polynomansatz für Kalibrierung werden reduziert gegenüber voller Implementierung | |
| Nur begrenzte Parameterstudien nötig | |