

Detaillierte Modellierung des Haushaltsstromverbrauchs zur Untersuchung von Demand Side Management

Franz ZEILINGER, Christoph GROISS*, Andreas SCHUSTER

Technische Universität Wien – Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe,
Gußhausstraße 25 / 370-1, T: +43 1 58801 370 127, F: +43 1 58801 370 199,
{zeilinger, groiss, schuster}@ea.tuwien.ac.at, www.ea.tuwien.ac.at

Kurzfassung: Um das Potential eines aktiven Demand-Side-Management-Systems zu untersuchen, das auch Wetterprognose berücksichtigt, wurde im Rahmen des Projekts „aDSM - Aktives Demand-Side-Management durch Einspeiseprognose“ eine detaillierte Modellsiedlung erstellt, welche die Situation in Österreich in kleinem Maßstab widerspiegelt. Um einen möglichst hohen Detailgrad zu erreichen, musste auch die Leistungsaufnahme auf Haushaltsebene definiert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Modell entwickelt, das die Leistungsaufnahme von Geräten im Haushaltsbereich simulieren kann. Mit diesem Modell wurde die Leistungsaufnahme der gesamten Modellsiedlung in Minutenauflösung für ein ganzes Jahr auf Einzelgeräteebene generiert.

In diesem Beitrag werden auf die Anforderungen an solch eine Simulation eingegangen, die Struktur des erstellten Modells und dessen Parametrierung vorgestellt und abschließend Ergebnisse der Simulation präsentiert.

Keywords: Demand Side Management, Lastmodellierung, Gerätemodelle, Synthetische Lastprofile, Haushaltslasten

1 Einleitung

Um die anvisierten Einsparungsziele bei CO₂-Emissionen zu erreichen, ist der Aufbau einer nachhaltigen elektrischen Energieerzeugung notwendig. Dies wird zusätzlich noch verschärft, da viele Anwendungen ihre Energiequelle auf elektrische Energie umgestellt haben bzw. in absehbarer Zeit umstellen werden, wie z.B. Elektromobilität. Der Einsatz von Photovoltaik(PV)-Anlagen nimmt vor diesem Hintergrund ständig zu, auch teilweise bedingt durch den starken Preisverfall in diesem Bereich. PV-Anlagen werden zumeist im Niederspannungsnetzbereich installiert, wodurch bedingt durch die geringe Volllaststundenzahl dieser Anlagen sowie der hohen Gleichzeitigkeit des Leistungsaufkommens die Verteilnetze stark belastet werden.

Auf der einen Seite wird angenommen, dass ungünstige Auswirkungen auf das Verteilnetz durch Demand Side Management (DSM) reduziert werden können [1]. Auf der anderen Seite würde DSM durch eine Erhöhung der Eigennutzung die Abschreibung der Investments der eigene Erzeugungsanlage bei niedrigen Einspeisetarifen beschleunigen.

Im Forschungsprojekt „aDSM - Aktives Demand-Side-Management durch Einspeiseprognose“¹ ist es das Ziel, das Potential von DSM in Hinblick auf die geschilderten Auswirkungen im Haushalts- und Wohnsiedlungsbereich in Österreich zu analysieren. Dies erfolgte unter Berücksichtigung von volatilen erneuerbaren Energiequellen in Form von PV-Anlagen und hohem Anteil an Elektrofahrzeugen im Siedlungsbereich. Das entwickelte und untersuchte DSM-System nutzt auch Daten zur Wetterprognose, um eine bessere operationale Planung des Geräteeinsatzes zu erreichen [2]. Um die Untersuchung eines solchen Systems zu ermöglichen, wurde ein „typisches“ Niederspannungsnetz in Form einer Modellsiedlung definiert [3]. Um den Einfluss von DSM innerhalb dieser Modellsiedlung detailliert darstellen zu können, müssen auch die Profile der Leistungsaufnahme jedes Haushalts in der Siedlung auf Geräteebene modelliert werden. Da hierfür reale Daten nicht ausreichend zur Verfügung stehen, wird die Leistungsaufnahme synthetisch erzeugt. Dieser Beitrag geht auf das dafür entwickelte Simulationsmodell ein.

Dazu wird im folgenden Abschnitt kurz die definierte Modellsiedlung vorgestellt sowie die Anforderungen an die Simulation der Haushaltsleistungsaufnahme für das Projekt „aDSM“ zusammengefasst. Abschnitt 3 zeigt, wie diese Anforderungen durch das entwickelte Modell und deren Simulation erfüllt werden. Neben der Struktur wird auch auf die Abfolge bei der Erzeugung der synthetischen Geräteprofile sowie auf die dafür verwendeten Parameter eingegangen. Abschnitt 4 präsentiert und diskutiert die erzeugten Profile. Abgeschlossen wird dieser Beitrag mit einer Zusammenfassung die zeigt, wie die erzeugten Profile innerhalb des Projektes aDSM eingesetzt werden.

2 Anforderungen an synthetische Lastprofile

In [3] wurde, basierend auf einer Gebäude- und Wohnungszählung [4], die Situation in Österreich in Bezug auf „Anzahl Haushalte pro Gebäude“ und „Anzahl an Personen pro Haushalt“ auf eine Modellsiedlung mit 300 Bewohnern in 126 Haushalten und 60 Gebäuden umgelegt. Abbildung 1 fasst diese definierte Siedlung zusammen. Zusätzlich zur Definition der Gebäude wurde auch die geographische Verteilung dieser zusammen mit einem „typischen“ Niederspannungsnetz festgelegt, welches die unterschiedlichen Situationen in ruralen und urbanen Netzen widerspiegelt [5].

Innerhalb des Projekts „aDSM“ wurden acht unterschiedliche Typen von Haushalten verwendet, die auf einer ähnlichen Einteilung einer anderen Statistik beruhen [6]. Diese Haushaltstypen lassen sich durch die Wohnsituation in einem „Haus“ oder einer „Wohnung“ sowie der Anzahl an Haushaltsmitgliedern charakterisieren (vergl. Tabelle 1). [6] liefert auch Daten zum jährlichen Energieverbrauch der einzelnen dieser Haushaltstypen sowie Informationen über den jährlichen Energieverbrauch verschiedener Gerätesektoren wie „Beleuchtung“, „Geschirrspüler“, „Küchengeräte“, usw.

¹ Das Forschungsprojekt „aDSM – Aktives Demand-Side-Management durch Einspeiseprognose“ wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert (FFG-Projekt Nr.: 834612) und im Rahmen des Programms „Neue Energien 2020“ durchgeführt.

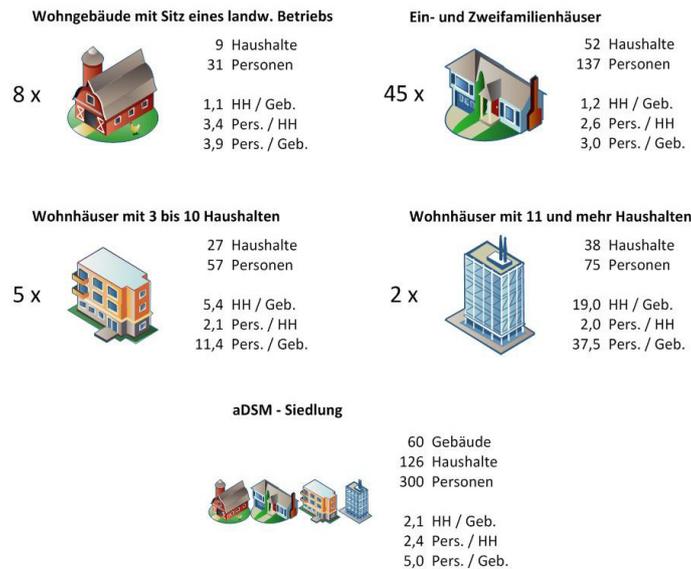


Abbildung 1: Österreichische Wohnverhältnisse umgelegt auf eine Siedlung mit 300 Einwohnern [3]

Die Umfrage [7] erob den Ausstattungsgrad mit Haushaltsgeräten österreichischer Haushalte zusammen mit der Information über die Wohnverhältnisse und Haushaltsgröße. Mit Hilfe dieser Umfrage konnte der Ausstattungsgrad der einzelnen Haushaltstypen mit üblichen Haushaltsgeräten abgeleitet werden, zusammengefasst in Tabelle 1.

Tabelle 1: Geräte-Ausstattungsgrade der Haushaltstypen in der Modellsiedlung in Geräten pro Haushalt [3]

Gerätetyp ↓	Haushaltstyp →	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4+	Wohnung 1	Wohnung 2	Wohnung 3	Wohnung 4+	Gesamt
		Anzahl ^b	13	17	12	19	29	19	9	8
Kühlschrank		1.06	1.58	1.83	1.87	1.09	1.25	1.23	1.35	1.39
Gefriergerät		0.60	0.97	1.11	1.20	0.26	0.54	0.48	0.56	0.69
Waschmaschine		0.91	0.94	0.92	0.91	0.83	0.86	0.91	0.87	0.89
Wäschetrockner		0.12	0.36	0.42	0.44	0.09	0.12	0.20	0.26	0.24
Geschirrspüler		0.50	0.81	0.81	0.87	0.05	0.69	0.78	0.77	0.69
TV-Gerät		1.62	2.00	2.82	2.62	1.11	1.55	1.88	2.06	1.85
PC		0.48	0.85	1.62	2.12	0.70	1.17	1.77	2.06	1.23
Wärmepumpe		0.00	0.05	0.05	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
el. Heizung		0.13	0.03	0.14	0.05	0.13	0.08	0.00	0.00	0.08
Umwälzpumpe		0.69	0.86	0.72	0.85	0.20	0.40	0.36	0.21	0.53
Wasserboiler		0.29	0.22	0.44	0.30	0.46	0.41	0.44	0.67	0.39
Durchlauferhitzer		0.08	0.03	0.04	0.03	0.08	0.03	0.00	0.07	0.05

^a "Haus" = Ein- oder Zweifamilienhaus; die Zahlen geben die Anzahl an Haushaltsmitgliedern an; "4+" = vier oder mehr Personen

^b Anzahl dieser Haushalte in der aDSM-Modellsiedlung

Z.B. ergibt sich, dass jeder Haushalt zumindest einen Kühlschrank besitzt (Ausstattungsgrad immer größer 1) oder dass das Vorhandensein eines Wäschetrockners sehr stark vom Typ des Haushalts abhängt (je mehr Mitglieder desto wahrscheinlicher, in Ein- und Zweifamilienhäusern wahrscheinlicher als in Wohnungen).

Unter Verwendung der erwähnten Studien und Umfragen, ist die Modellsiedlung mit ihrem jährlichen elektrischen Energieverbrauch sowie den Ausstattungsgrad mit Haushaltsgeräten vollständig definiert. Um die hohe Volatilität der Haushaltslasten und der photovoltaischen Energieerzeugung zu berücksichtigen, sind jedoch Jahresreihen der Leistungsaufnahme und Einspeisung mit einer höheren zeitlichen Auflösung notwendig. Im Projekt „aDSM“ wurde eine Zeitbasis von einer Minute für die Profildaten sowie für die Lastverschiebungsoperationen festgelegt. Auch sollen die entwickelten DSM-Systeme in der Lage sein, die Leistungsaufnahme bis auf Einzel-Geräteebene zu beeinflussen. Daher muss der Betrieb jedes einzelnen Geräts in der gesamten Siedlung bekannt sein. Diese hochauflösenden Daten stehen aus realen Messkampagnen (z.B. [7]) nicht bzw. nur lückenhaft zur Verfügung.

Eine Lösung, um den erforderlichen hohen Detailgrad der Daten zu erhalten, ist die Verwendung von synthetischen Lastprofilen, welche dann ebenfalls als Teil der Siedlungsdefinition der aDSM-Modellsiedlung gesehen werden können. Die synthetischen Lastprofile für das Projekt aDSM müssen daher folgende Anforderungen erfüllen:

- Nachbildung der Leistungsaufnahme der Haushalte in Minutenauflösung und auf Einzelgeräteebene
- Lieferung zusätzlicher detaillierter Informationen auf Geräte- (Start- und Endzeitpunkte des Betriebs, aktuelle Leistungsaufnahme) und Haushaltsebene (Zuordnung der einzelnen Geräte zu individuellen Haushalten, Ausstattung der Haushalte), auf die ein aufgesetztes DSM-System zurückgreifen kann
- Erstellung dieser Profile als Zeitreihe über ein ganzes Jahr unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wochentage (Werk-, Samstag und Sonntag) und Jahreszeiten (Sommer, Übergangszeit, Winter) für die definierten Haushalte

Das entwickelte und in dieser Arbeit vorgestellte Modell ist in der Lage, die gewünschten Profile und Informationen zu generieren. Daher vervollständigt es die Definition der aDSM-Modellsiedlung.

3 Struktur des verwendeten Modells

3.1 Datengrundlage für das Modell und frühere Entwicklungen

In [7] wurde eine Messkampagne durchgeführt, in welcher der Betrieb und die Leistungsaufnahme unterschiedlicher Geräte im Haushaltsbereich über mehrere Tage hinweg (bis zu zwei Wochen) und während unterschiedlicher Jahreszeiten (Sommer und Winter) aufgenommen wurde. In [8] wurden diese Messungen verwendet, um Einsatzverteilungen für diese Geräte zu ermitteln. Diese Einsatzverteilungen beschreiben die durchschnittliche Leistungsaufnahme für einen gewissen Gerätesektor (z.B. Audio-Video-Geräte) über 24h für unterschiedliche Tagestypen (z.B. einen Sommer Samstag). Fehlende Einsatzverteilungen bzw. Informationen zum Geräteeinsatz wurden aus anderen Erhebungen zusammengetragen [9–12]. Schließlich wurden diese Verteilungen so angepasst, dass die jeweiligen Gerätesektoren den gleichen Jahresenergieverbrauch aufweisen, wie sie in [6] ermittelt wurden. Die so ermittelten Verteilungen waren die Basis für die Parametrierung des Modells (siehe Abschnitt 3.3).

einen elektro-thermischen Wandler) durch eine Instanz der Klasse „Thermische Speicher“ modelliert. Diese Klasse enthält die Methoden, um die Leistungsaufnahme solcher Geräte zu beschreiben (z.B. die ausprogrammierte mathematische Formulierung des Speichers). Durch die verfügbaren Parameter kann das Verhalten spezifiziert werden (z.B. thermische Kapazität des Speicher, Wärmeübergangswiderstand der Isolierung, Wirkungsgrad der elektro-thermischen Wandlung). Kühlschränke, Gefriergeräte und Warmwasser-Boiler können mit Hilfe dieser Klasse modelliert werden, aber sie bilden drei unterschiedliche Gerätegruppen, da sie durch unterschiedliche Parametersätze beschrieben werden müssen (z.B. ist die Isolierung von Gefrierschränken stärker ausgeführt als jene von Kühlschränken, Warmwasser-Boiler müssen ihren Speicherinhalt erwärmen im Gegensatz zur Kühlungsaufgabe der beiden anderen Gerätegruppen, usw).

Der Parametersatz der Gerätegruppe „Kühlschränke“ besteht prinzipiell aus den Kennwerten eines „mittleren Kühlschranks“² (z.B. mittlerer thermischer Widerstand, mittlere thermische Kapazität, mittlere Anschlussleistung, mittlerer Wirkungsgrad des Kompressors, ...) sowie der Angabe zur Verteilung und Streuung dieser Parameter (Angaben dazu können z.B. in [11] gefunden werden), welche die Variabilität über alle Kühlschränke beschreiben. Wenn nun ein Kühlschrank innerhalb des Modells generiert wird, wird er als Instanz der Klasse „Thermische Speicher“ erzeugt und erhält einen konkreten Parametersatz, der zufällig aus der Verteilung der Parameter der Gerätegruppe „Kühlschränke“ erstellt wird und erhält so eine individuelle Charakteristik. Daher hat die Geräteinstanz „Kühlschrank 1“ eine andere Leistungsaufnahme als die Instanz „Kühlschrank 2“ usw. Für alle Arten von Geräten in einem Haushalt wurden solche Repräsentationen entwickelt, z.B. Klassen für Geräte mit stochastischem aber (tages)-zeitabhängigen Verhalten (für die Gerätegruppen „TV-Geräte“, „Beleuchtung“, ...) oder Klassen für Geräte, die ein Programm abarbeiten (für die Gerätegruppen „Waschmaschine“, „Geschirrspüler“, ...)

Alle erstellten Gerätegruppen können schließlich zu Gerätesektoren zusammengefasst werden (so z.B. die Gerätegruppen „TV-Geräte“, „Set-Top-Boxen“, „Spielkonsolen“, ... zum Gerätesektor „Audio-Video-Geräte“, oder die Gruppen „Kühlschränke“ und „Gefrierschränke“ zum Sektor „Kühlgeräte“). Für diese Gerätesektoren sind dann statistische und gemessene Daten verfügbar (wie z.B. in [6] oder [8]). Alle die für das Projekt aDSM erstellten Gerätegruppen und Gerätesektoren sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

3.3 Parametrisierung des Modells

Für die Erstellung der einzelnen Gerätegruppen mussten zunächst alle notwendigen Parameter sowie deren Verteilung ermittelt werden. Dazu wurden in einem ersten Schritt Untersuchungen und Erhebungen aus eigenen Messdaten und verschiedenen Literaturquellen und Statistiken vorgenommen, um z.B. Anschlussleistungen und Stand-By-Verbrauch und deren Verteilung zu erheben. Auch die mittlere Geräteausstattung der Haushalte war ein Ergebnis dieser Recherchen und Auswertungen, zusammengefasst in Tabelle 1.

² Mit mittleren Kühlschrank ist ein spezielles Konzept gemeint: Wenn die Energieaufnahme einer großen Anzahl von individuellen Kühlschränken betrachtet wird, würde die gleiche Anzahl an mittleren Kühlschränken den selben Energieverbrauch aufweisen, aber die mittleren Kühlschränke würden alle das gleiche Verhalten bei der Leistungsaufnahme zeigen (z.B. die gleiche Periodendauer der Ein- und Ausschaltzyklen).

Tabelle 2: Verteilung der implementierten Gerätegruppen über alle Gerätesektoren

Gerätesektor	Enthaltene Gerätegruppen in diesem Sektor ^a
Audio-Video-Geräte	TV-Geräte, Set-Top-Boxen, Video-Equipment, Spielkonsolen, Hi-Fi-Geräte, Radios
Beleuchtung	Verschieden Typen von Beleuchtungskörpern
Bürogeräte	PCs, Monitore, Notebooks, Laser- & Inkjet-Drucker, Diverse Bürogeräte
Diverse Geräte	Geräte mit unterschiedlichen Anschlussleistungen
Geschirrspüler	
Heizung	El. Heizungen, Wärmepumpen
Küchengeräte	Backrohr, E-Herd, Mikrowelle, Diverse Küchengeräte
Kühlgeräte	Kühlschränke, Gefriergeräte
Umwälzpumpen	
Warmwasser	Durchlauferhitzer, Warmwasserboiler
Wäschetrockner	
Waschmaschine	

^a Wenn ein Sektor nur eine Gerätegruppe enthält, dann ist dieser mit der Gruppe äquivalent

Mit Hilfe des mittleren Ausstattungsgrades ist es möglich einen „mittleren Benutzer“ zu modellieren, also einer Person, die die gleiche Anzahl an Geräten benutzt, wie sie in der letzten Spalte von Tabelle 1 angegeben sind, dividiert durch die mittlere Anzahl an Personen in einem Haushalt (für Österreich beträgt dieser Wert 2,38 Personen pro Haushalt). D.h. dass z.B. 238 dieser „mittleren Benutzer“ 139 Kühlschränke, 69 Gefriergeräte, 89 Waschmaschinen, 24 Wäschetrockner usw. verwenden.

Mit Hilfe der Daten aus [8] und [6] ist es möglich, Einsatzverteilungen für alle definierten Gerätesektoren für verschiedene Tagestypen (Werktag, Samstag, Sonntag) und Jahreszeiten (Sommer, Übergangszeit, Winter) anzugeben, ausgenommen für den Sektor Beleuchtung, hier stehen nur Daten für die einzelnen Jahreszeiten, welche aus [10] entnommen wurden, zur Verfügung. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen zwei Beispiele dieser Einsatzverteilungen. Diese sind in Form der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme pro Person für die einzelnen Sektoren dargestellt.

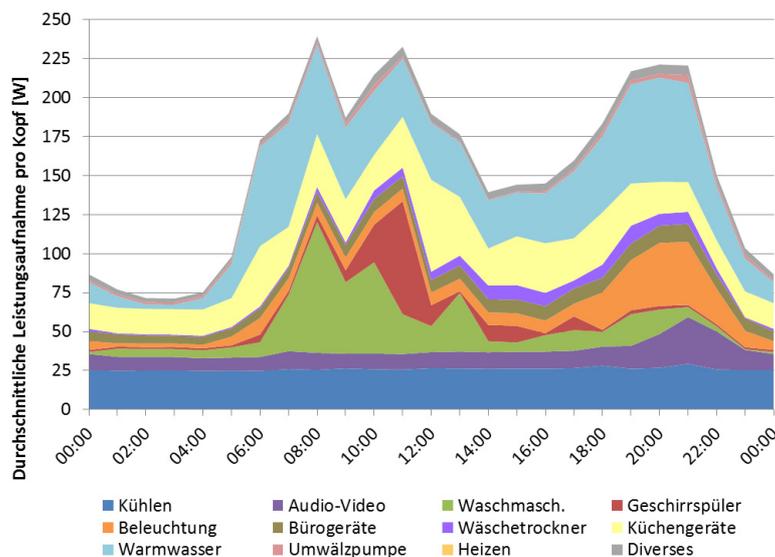


Abbildung 3: Einsatzverteilung aller Gerätesektoren für einen Sommer-Samstag (Auflösung: 1h)

So lässt sich ablesen, dass eine Einzelperson im Schnitt 25 W über den ganzen Tag für Kühlgeräte benötigt. Eine Spitze um 11 Uhr deutet auf Kochaktivitäten hin (Küchengeräte und Geschirrspüler). Waschmaschinen sind eher in den Morgenstunden aktiv (Einsatzspitze um 8 Uhr). Anhand dieser Daten lässt sich also das mittlere Benutzungsprofil für die einzelnen Gerätesektoren ableiten.

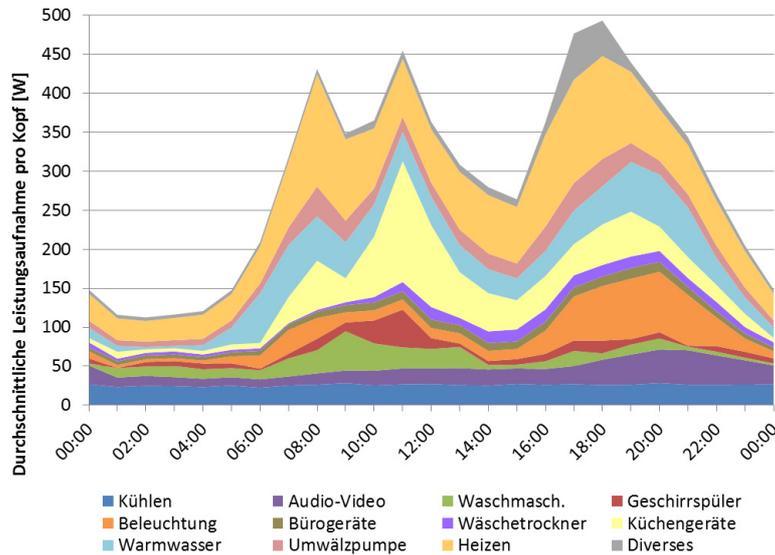


Abbildung 4: Einsatzverteilung aller Gerätesektoren für einen Winter-Samstag (Achtung andere Skalierung als in Abbildung 3!) (Auflösung: 1h)

Mit diesen Einsatzverteilungen und den bereits erhobenen Parametern (mittlere Ausstattungsgrad pro Kopf, Anschlussleistung, Stand-by-Verbrauch, Waschprogramme von Geschirrspülern und Waschmaschinen, ...) können nun die zeitabhängigen Parameter des Modells in einem zweiten Schritt ermittelt werden. Dieser Parameter beschreiben z.B. typische Startzeiten, Startwahrscheinlichkeiten zu diesen Zeiten, Verteilung der Startzeiten, typische Einschaltdauern, etc. Die Ermittlung dieser Parameter erfolgte in einer Sequenz, welche in Abbildung 5 dargestellt wird.

Zuerst wird ein Satz einer Vielzahl von Instanzen von Geräten eines bestimmten Sektors erzeugt, wie sie von einer großen Anzahl von Benutzer verwendet werden. Dies erfolgt basierend auf einem konkreten Parametersatz (roter und grauer Block in Abbildung 5). Von diesen Geräten wird die Leistungsaufnahme über einen Tag (z.B. einem Sommer Samstag) simuliert (blauer Block). Das Simulationsergebnis (z.B. Leistungsaufnahme aller Audio-Video-Geräte, welche von 10.000 Personen verwendet werden) spiegelt den durchschnittlichen Einsatz der Geräte basierend auf dem aktuellen Parametersatz durch den „mittleren Benutzer“ wieder und kann daher mit den gegebenen Einsatzverteilungen (z.B. Abbildung 3) des Gerätesektors verglichen werden (grauer Block). Basierend auf den Abweichungen zwischen dem Simulationsergebnis und der gegebenen Einsatzverteilung werden die Parameter adaptiert, um eine besser Übereinstimmung zu erzielen (rote Pfeile). Diese Sequenz wird so lange wiederholt, bis die simulierten Profile näherungsweise mit den Einsatzverteilungen übereinstimmen. Damit weisen beide „mittleren Geräte“ (jene der Einsatzverteilung und jene der Simulation) das gleiche Verhalten auf. Diese Parametrisierung wurde für alle 12 Gerätesektoren für die drei Tagestypen in den drei Jahreszeiten durchgeführt.

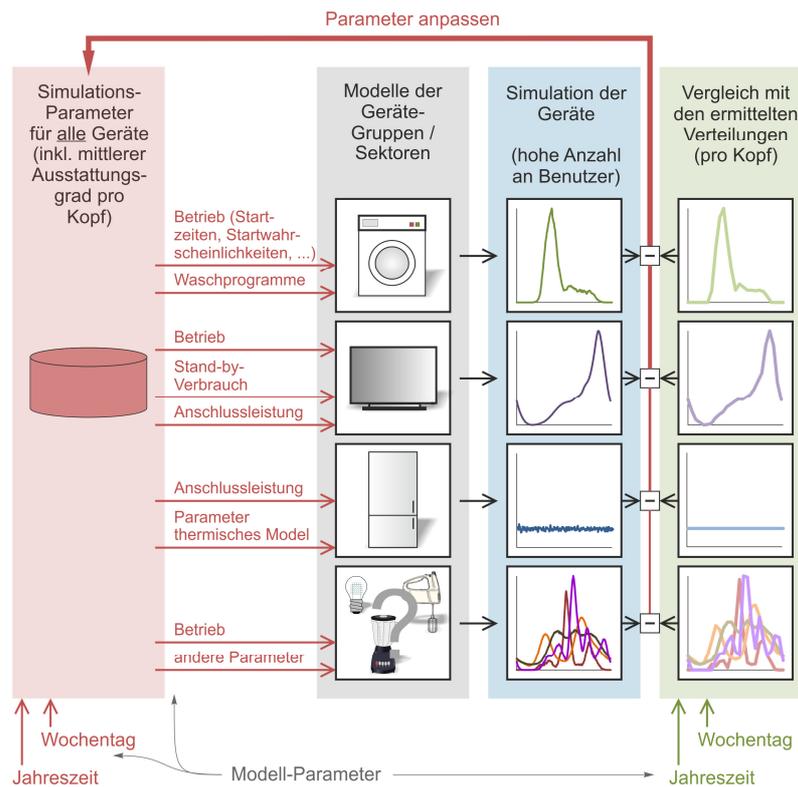


Abbildung 5: Ablauf zur Ermittlung der Parameter für die Gerätegruppen im Modell

3.4 Simulation der Leistungsaufnahme

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, basiert die Parametrisierung des Modells auf der Untersuchung des Verhaltens des durchschnittlichen Benutzers, welcher in einem durchschnittlichen Haushalt lebt (letzte Spalte in Tabelle 1). Für die Simulation der Modellsiedlung müssen aber nun unterschiedliche Haushalte mit deren individuellen Ausstattungen berücksichtigt werden. Abbildung 6 zeigt den kompletten Ablauf, der für die Generierung der synthetischen Lastprofile notwendig ist.

Unter Verwendung der Daten in Tabelle 1 werden alle Haushalte der Modellsiedlung mit einer konkreten ganzzahligen Anzahl von Geräten verknüpft. Dies basiert auf probabilistischen Methoden, um sicherzustellen, dass der gleiche mittlere Ausstattungsgrad in der Modellsiedlung erreicht wird, wie er in Tabelle 1 angegeben ist. Neben der Gesamtanzahl an Geräten von jeder Gruppe für die Simulation wird auch eine Zuordnung jedes einzelnen Geräts zu einem bestimmten Haushalt gespeichert, angedeutet in Abbildung 6 durch den violetten und grünen Block.

Nun steht die Anzahl an Geräten von jeder Gerätegruppe in der Modellsiedlung zur Verfügung. Aus den Geräteklassen, mit denen die einzelnen Gruppen beschrieben werden können und den zeitunabhängigen Parametern werden entsprechende Anzahlen an Geräteinstanzen erzeugt (grauer und türkiser Block) und damit die Siedlung mit individuellen („realen“) Geräten ausgestattet. Dieser Geräteinstanzen bleiben nun während der gesamten Simulationslaufzeit beibehalten, was bedeutet, dass sich die Geräteausstattung der Siedlung innerhalb des simulierten Jahres nicht ändert. In dieser Stufe ist das Simulationsmodell komplett: Die Geräteinstanzen aller Haushaltsgeräte der Siedlung, die individuelle Parameterwerte aufweisen (wie Anschlussleistung, Stand-by-Verbrauch, mögliche

Programme ...) gemeinsam mit derer Zuordnung zu bestimmten Haushalten sind nun definiert.

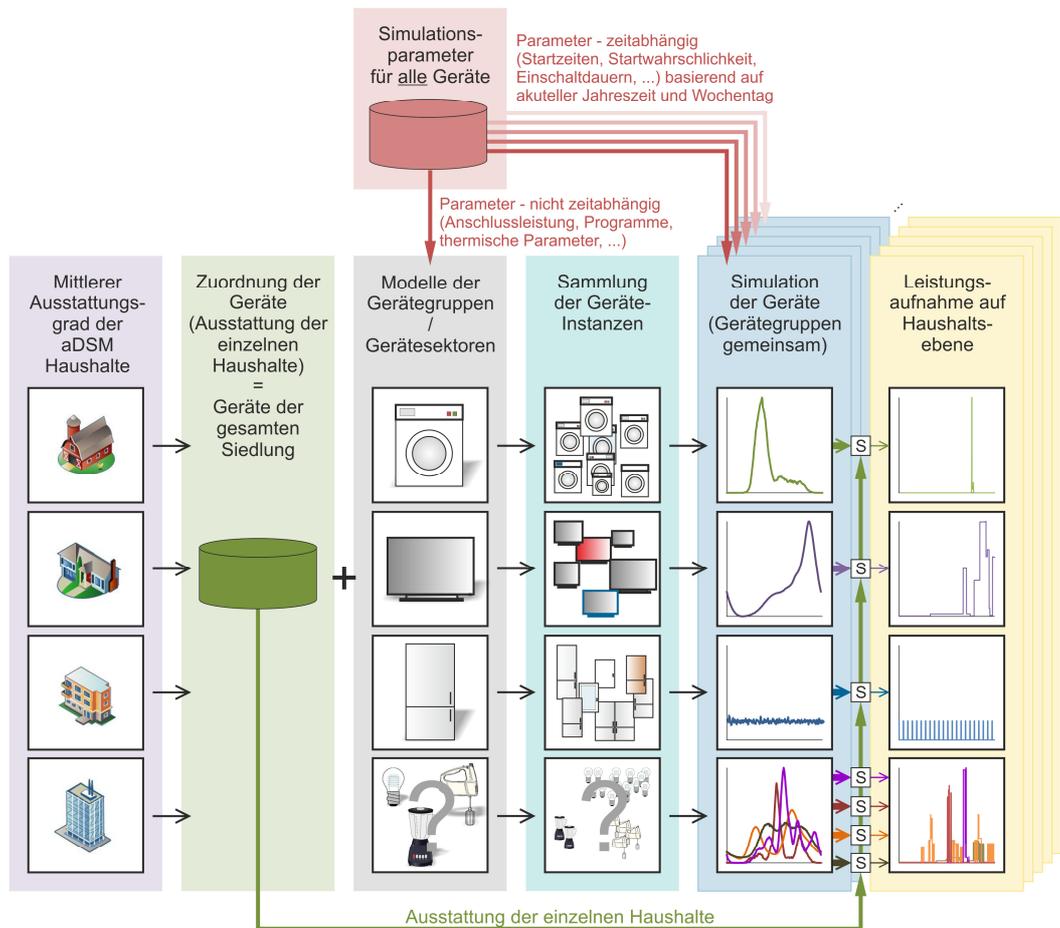


Abbildung 6: Ablauf bei der Erzeugung von Geräteprofilen auf Siedlungsebene

Im letzten Schritt werden die synthetischen Profile der Leistungsaufnahme für die gesamte Siedlung für ein ganzes Jahr erzeugt (blauer und gelber Block). Dazu wird eine Serie von Einzeltagesimulationen durchgeführt, in welcher die verschiedenen Tagestypen und Jahreszeiten berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass zunächst fünf Werktagen gefolgt von einem Samstag und einem Sonntag simuliert werden, folgend von weiteren fünf Werktagen usw. Die ersten 79 Tage des Jahres werden als Wintertage simuliert, gefolgt von 55 Tagen in der Übergangszeit, 123 Sommertagen, 47 Tagen Übergangszeit und schließlich 61 Wintertagen. In jeder Tagessimulation erhalten alle Geräteinstanzen einen neuen Satz von zeitabhängigen Parametern aus der Verteilung ihrer Gerätegruppe (vergl. Abschnitt 3.3). Das bedeutet, dass z.B. alle Startzeiten und Einschaltdauern auf neue Werte gesetzt werden, die sonstigen Betriebsparameter (z.B. Anschlussleistung) aber nicht verändert werden.

Nach Abschluss der Tagessimulation werden die Profile der einzelnen Geräte gemäß ihrer Haushaltszugehörigkeit ausgewählt und in ein Ausgabeformat zusammengefasst (gelber Block). Gemeinsam mit den reinen Leistungsprofilen der Geräte werden zusätzliche Daten erhoben, wie Listen mit den Start- und Stopzeiten für jedes Gerät oder der Gesamtleistungsaufnahme des Haushalts, und werden gemeinsam mit den Geräteinstanzen gespeichert.

Die drei Stufen der Profilerzeugung (anfängliche Zuordnung der Geräte zu den Haushalten – Simulation der Geräte in deren Gerätegruppen bzw. Sektoren zusammen – abschließende Zuordnung der Simulationsergebnisse gemäß der am Beginn getroffenen Zuordnung) wurde aufgrund eines optimierten Ablaufs der Simulation notwendig: Die einzelnen Gerätegruppen können unabhängig voneinander simuliert werden, wodurch die Simulation gut parallelisierbar ist. Dadurch kann die Simulationszeit beträchtlich herabgesetzt werden und rechtfertigt damit den zusätzlichen Aufwand.

Nach einem kompletten Simulationsdurchlauf werden die erzeugten Profile als ein Set von Dateien, eine für jeden Tag, gespeichert, zusammen mit einer Zusammenfassung über die gesamte Siedlung (Energieverbrauch auf Siedlungs-, Haushaltstypen und Gerätesektorebene für jeden Tag und das gesamte Jahr) sowie den Modellparametern. Mit diesen zusätzlichen Daten kann die Simulation relativ schnell auf Plausibilität geprüft werden.

4 Ergebnisse

Für das Projekt “aDSM” wurde eine Siedlung simuliert, die aus zehnmal so vielen Haushalten besteht, wie in Tabelle 1 angegeben (1.260 anstatt 126). Dies wurde durchgeführt, um die Möglichkeit zu haben, aus einen größeren Pool von verschiedenen Haushalten wählen zu können um z.B. relativ schnell eine neue Modellsiedlung zusammenstellen. Auch werden in der Modellsiedlung unterschiedliche Regionen abgebildet (rurale und urbane Gebiete), was auch einen Einfluss auf die Geräteausstattung der Haushalte hat. Durch geeignete Auswahl der Haushalte aus dem simulierten Pool kann daher die Modellsiedlung unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen passend zusammengestellt werden.

Diese erweiterte Modellsiedlung mit 1.260 Haushalten wurde einer Analyse unterzogen, um zu überprüfen, ob die Simulation jene Statistiken widerspiegelt, auf denen die Siedlungsdefinition beruht. Tabelle 3 fasst den elektrischen Energieverbrauch von Haushalten unterschiedlicher Größe zusammen. Diese Daten können mit der gleichen Auswertung für die simulierten Haushalte verglichen werden, zusammengefasst in

Aufgrund der kleinen Größe des Samples von simulierten Haushalten (z.B. wurden nur 420 Single-Haushalte simuliert) muss die statistische Analyse in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** daher unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen betrachtet werden. Dennoch zeigen sich deutliche Übereinstimmungen mit den Daten aus [6], insbesondere wenn alle Haushalte betrachtet werden (letzte Zeile in beiden Tabellen). Es ist weiters zu sehen, dass die Standardabweichung etwas kleiner in der simulierten Siedlung ist. Das bedeutet, dass die simulierten Haushalte sich in ihrem Energiekonsum eher ähneln als reale Haushalte.

Tabelle 4.

Tabelle 3: Jährlicher elektrischer Energieverbrauch von Haushalten unterschiedlicher Größe nach [6] basierend auf Daten von 3.548.352 Haushalten

Anzahl an Personen pro Haushalt	Jährlicher el. Energieverbrauch [kWh]		
	<i>Mittelw.</i>	<i>Median</i>	<i>Std. Abw.</i>
1	2.836	2.489	2.222
2	3.821	3.308	2.286
3	6.132	5.020	4.320

4 und mehr	6.159	5.224	3.498
alle Haushalte	4.390	3.679	3.325

Aufgrund der kleinen Größe des Samples von simulierten Haushalten (z.B. wurden nur 420 Single-Haushalte simuliert) muss die statistische Analyse in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** daher unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen betrachtet werden. Dennoch zeigen sich deutliche Übereinstimmungen mit den Daten aus [6], insbesondere wenn alle Haushalte betrachtet werden (letzte Zeile in beiden Tabellen). Es ist weiters zu sehen, dass die Standardabweichung etwas kleiner in der simulierten Siedlung ist. Das bedeutet, dass die simulierten Haushalte sich in ihrem Energiekonsum eher ähneln als reale Haushalte.

Tabelle 4: Jährlicher elektrischer Energieverbrauch von Haushalten unterschiedlicher Größe basierend auf den Daten der simulierten erweiterten Modellsiedlung mit 1.260 Haushalten

Anzahl an Personen pro Haushalt	Jährlicher el. Energieverbrauch [kWh]		
	Mittelw.	Median	Std. Abw.
1	3.259,9	2.465,7	2.328,4
2	3.760,4	3.228,4	1.910,6
3	4.955,8	4.319,8	2.536,1
4 und mehr	5.924,0	5.031,9	2.962,0
alle Haushalte	4.256,4	3.693,3	2.623,1

In Tabelle 5 werden die Ausstattungsgrade der simulierten Haushalte mit jenen von Tabelle 1 verglichen. Die Abweichungen werden in Prozent angegeben, wenn die Abweichung 10% übersteigt, ist die entsprechende Zelle grau markiert.

Tabelle 5: Geräte-Ausstattungsgrade der Haushaltstypen in der simulierten Siedlung in Geräten pro Haushalt und die Abweichung zu den Ausstattungsgraden von Tabelle 1 (Prozentwerte)

Gerätetyp ↓	Haushaltstyp ↓	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4+	Wohnung 1	Wohnung 2	Wohnung 3	Wohnung 4+	Gesamt
		Anzahl	130	170	120	190	290	190	90	80
Kühlschrank	1.05 0%	1.56 -1%	1.82 -1%	1.84 -1%	1.06 -2%	1.27 2%	1.26 2%	1.34 -1%	1.38 0%	
Gefriergerät	0.69 16%	0.96 -1%	1.12 0%	1.19 -1%	0.26 -2%	0.48 -11%	0.51 7%	0.50 -11%	0.69 0%	
Waschmaschine	0.92 0%	0.94 0%	0.93 1%	0.94 3%	0.79 -4%	0.86 0%	0.93 3%	0.80 -8%	0.89 0%	
Wäschetrockner	0.11 -9%	0.37 4%	0.38 -10%	0.35 -21%	0.12 38%	0.13 1%	0.29 46%	0.25 -6%	0.23 -1%	
Geschirrspüler	0.45 -10%	0.78 -4%	0.74 -9%	0.89 3%	0.48 -5%	0.73 5%	0.77 -1%	0.75 -2%	0.68 -2%	
TV-Gerät	1.58 -2%	2.00 0%	2.86 1%	2.62 0%	1.15 2%	1.50 -3%	1.88 0%	2.08 1%	1.85 0%	
PC	0.44 -9%	0.84 -2%	1.61 0%	2.17 2%	0.71 1%	1.13 -3%	1.87 6%	2.01 -2%	1.23 0%	
Wärmepumpe	0.00 0%	0.02 -54%	0.03 -30%	0.08 -9%	0.00 0%	0.00 0%	0.00 0%	0.00 0%	0.02 -24%	
el. Heizung	0.17 35%	0.04 61%	0.13 -13%	0.06 36%	0.13 -3%	0.09 17%	0.00 0%	0.00 0%	0.09 12%	
Umwälzpumpe	0.69 0%	0.86 1%	0.74 3%	0.86 1%	0.20 0%	0.37 -7%	0.41 10%	0.21 -1%	0.53 1%	
Wasserboiler	0.26 -10%	0.25 14%	0.45 3%	0.26 -14%	0.46 -1%	0.43 4%	0.53 22%	0.74 11%	0.40 2%	
Durchlauferhitzer	0.08 2%	0.03 6%	0.07 53%	0.04 11%	0.09 8%	0.02 -28%	0.00 0%	0.06 -6%	0.05 7%	

Die simulierte Siedlung liefert eine relative gute Übereinstimmung mit den statistisch ermittelten Werten. Aufgrund der doch kleinen Siedlungsgröße können aber ein paar deutliche Abweichungen festgestellt werden, aber diese beruhen oft nur auf der An- oder Abwesenheit eines einzelnen Gerätes: z.B. repräsentiert ein einziger fehlender Wäschetrockner bereits eine Abweichung von 5%. In einigen Testläufen, in denen nur der erste Teil der Simulation durchgeführt wurde (Geräteinstanzerzeugung und Zuordnung zu den Haushalten), stimmten die Ausstattungsgrade viel besser überein, je größer die Anzahl der simulierten Haushalte wurde.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für die Leistungsaufnahme der Geräte eines einzelnen Haushalts an einem bestimmten Tag. Spezielle Geräte sind separat markiert, um deren Betrieb deutlicher zu zeigen. Aufgrund der stochastischen Modellierung des Verhaltens von einzelnen Geräten kann eine sehr realistische Nachbildung von Haushaltsgeräten mit hohem Detailgrad und hoher zeitlicher Auflösung erzielt werden. Für jeden simulierten Haushalt der Modellsiedlung kann eine ähnliche Darstellung wie in Abbildung 7 für jeden Tag innerhalb des simulierten Jahres gegeben werden.

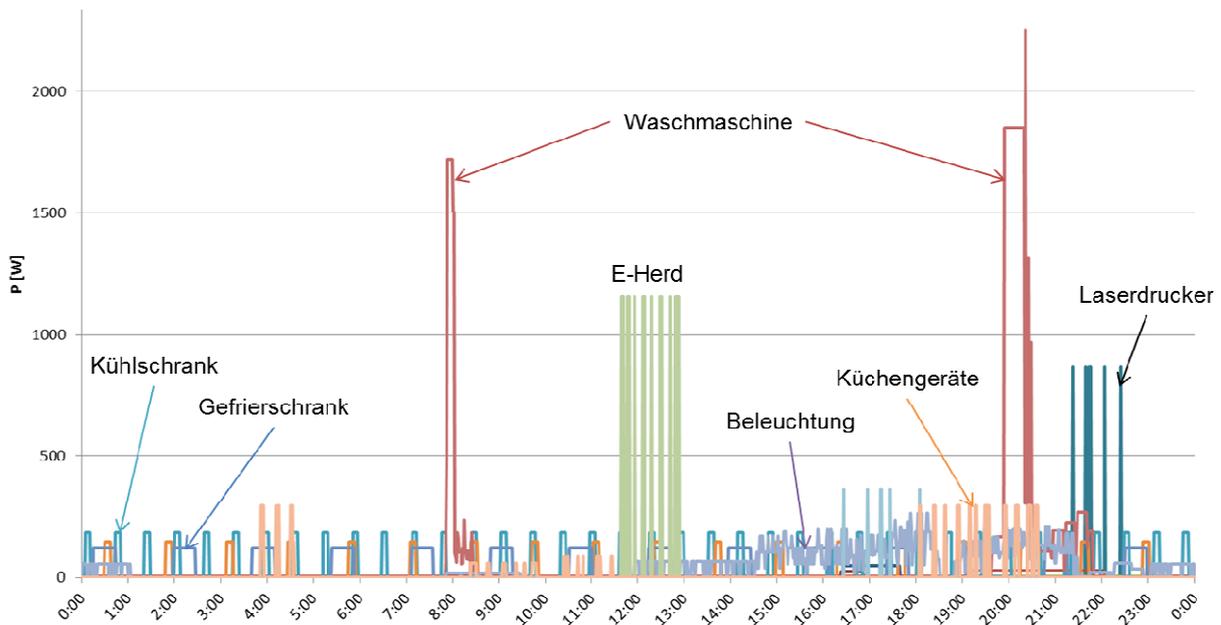


Abbildung 7: Exemplarischer Geräteeinsatz eines Haushalts: Typ "Haus 2" an einem Sommer Sonntag

5 Zusammenfassung und Anwendung der Profile

Wie die vorhergehenden Ausführungen zeigten, wurde im Projekt aDSM eine komplette synthetische Siedlung geschaffen, welche die Situation in Österreich in einem kleinen Maßstab widerspiegelt. Alles in der Siedlung ist bekannt oder definiert, von der Gebäudezusammensetzung, Haushaltszusammensetzung über das elektrische Netz bis hin zur Leistungsaufnahme jedes einzelnen Gerätes, dass in dieser Siedlung in Verwendung ist. Das vorgestellte Modell ist in der Lage, diese hochaufgelösten Daten auch für lange Zeitreihen (Jahresreihe) effizient zu erzeugen. Es zeigt sich, dass das Modell gut die gewünschten Statistiken und Kenngrößen, auf dem die Siedlungsdefinition beruhte,

nachbilden kann. Mit den erstellten Daten kann jedes Gerät durch eine DSM-Systemsimulation angesteuert und dessen Betrieb beeinflusst werden.

Im Projekt aDSM werden diese Daten in Minutenaufösung verwendet, um verschiedene Optimierungen der Leistungsaufnahme von Haushaltsgeräten und Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung der Einspeisung durch PV-Anlagen über ein ganzes Jahr durchzuführen. Die Erzeugungsprofile beruhen auf realen Messdaten, die Ladeprofile von Elektrofahrzeugen wurden durch ein separates Tool ebenfalls synthetisch generiert. Das Ziel der durchgeführten Optimierungen ist es, das maximale Potential von möglichen DSM-Systemen abzuschätzen und weiters den Einfluss der Güte einer Einspeise-Prognose z.B. basierend auf Wetterdaten für das entwickelte „aktive Demand-Side-Management durch Einspeiseprognose“ zu untersuchen.

In einem ersten Schritt wurde ein „perfektes System“ (perfekte Last- und Einspeiseprognose für ein ganzes Jahr) untersucht, das verschiedene Optimierungsziele verfolgt, z.B. Erhöhung des Eigenverbrauchs der dezentral erzeugten Leistung. Dieses System arbeitet auf der Basis von einfachen „DSM Regeln“ [3] welche definieren, wie weit das DSM-System in den Gerätebetrieb eingreifen kann. Die Ergebnisse des „perfekten Systems“ liefern das maximale Potential für DSM im Haushaltsbereich. Näheres dazu findet sich in [2].

In weiteren Schritten wurde ein hierarchisches DSM System entwickelt, das auch Wetterprognosen berücksichtigt und dessen Auswirkungen auf Haushalts- und Siedlungsebene mit Hilfe der erstellten Modellsiedlung dargestellt. Auch konnten Veränderungen in der Gerätezusammensetzung (z.B. Austausch älterer Geräte durch effizientere Geräte, Substitution von Heizsystemen mit Wärmepumpensystemen) mit Hilfe des entwickelten Gerätemodells einfach übernommen und für nachfolgende Untersuchungen in Form von neuen synthetischen Lastprofilen zur Verfügung gestellt werden. Ergebnisse zu diesen Untersuchungen sind in [2] dargestellt.

Der hohe Detailgrad und die Anpassungsfähigkeit des vorgestellten Modells werden in weiterer Folge zukünftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet unterstützen.

Das Projekt aDSM wird aus den Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt.



6 Literatur

- [1] V. Hamidi, F.-R. Li, L. Z. Yao, und M. Bazargan, “Domestic demand side management for increasing the value of wind,” China International Conference on Electricity Distribution, 2008. CIGRE 2008, Dec. 2008.
- [2] C. Maier, C. Groiß, M. Litzlbauer, und A. Schuster, “Eigenverbrauchssteigerung in Haushalten durch Demand-Side-Management,” 13. Symposium Energieinnovation, Graz, Feb. 2014.

- [3] C. Groß, C. Maier, und W. Gawlik, "Active and Anticipatory Demand-Side-Management in Households," 22nd International Conference on Electricity Distribution CIREN 2013, Stockholm, Sweden, Jun. 2013.
- [4] M. Mahidi, "Gebäude- und Wohnungszählung 2001: Hauptergebnisse Österreich," Bundesanstalt Statistik Österreich, Vienna, Austria, 2004.
- [5] C. Groß, C. Maier, und J. Scalet, "DSM-Potenziale in einer österreichischen Modellsiedlung," Technische Universität Wien, 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, Feb. 2013.
- [6] A. Wegscheider-Pichler, "Strom- und Gastagebuch 2008: Strom- und Gaseinsatz sowie Energieeffizienz österreichischer Haushalte Auswertung Gerätebestand und Einsatz," Statistik Austria, Wien, 2009.
- [7] A. Einfalt, A. Schuster, C. Leitinger, D. Tiefgraber, M. Litzlbauer, S. Ghaemi, D. Wertz, A. Frohner, und C. Karner, "ADRES-Concept: Konzeptentwicklung für ADRES - Autonome Dezentrale Regenerative EnergieSysteme," TU Wien, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Apr. 2011.
- [8] S. Ghaemi, "Efficiency potential in private sector in ADRES: (Autonomous Decentralized Renewable Energy Systems)," Dissertation, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Technische Universität Wien, Wien, 2011.
- [9] C. Groß, "Power Demand Side Management: Potentiale und technische Realisierbarkeit im Haushalt," Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Technische Universität Wien, Wien, 2008.
- [10] I. Knight, H. Ribberink, N. Kreutzer, M. Manning, und M. Swinton, "European and Canadian non-HVAC Electric and DHW Load Profiles for Use in Simulating the Performance of Residential Cogeneration Systems: A Report of Subtask A of FC+COGEN-SIM The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems," Ottawa, 2007.
- [11] F. Kupzog, "Frequency-responsive load management in electric power grids," Dissertation, Institute of Computer Technology, Technische Universität Wien, Wien, 2008.
- [12] Z. Xu, J. Østergaard, M. Togeby, und C. Marcus-Møller, "Design and Modelling of Thermostatically Controlled Loads as Frequency Controlled Reserve," IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, Tampa, FL, Jun. 2007.
- [13] F. Zeilinger, "Simulation von Demand Side Management mit frequenzabhängigen Lastprofilen in Inselnetzen," Diplomarbeit, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Technische Universität Wien, Wien, 2010.
- [14] F. Zeilinger, "Simulation of the Effect of Demand Side Management to the Power Consumption of Households," Leiria, Portugal, Jul. 2011.
- [15] F. Zeilinger und A. Einfalt, "Modell für hochauflösende synthetische Haushaltslastprofile," 12. Symposium Energieinnovation, Graz, Feb. 2012.